

Cartagena de Indias, 02 Marzo de 2012

Comité

INVESTIGACIONES Y PROYECTOS DE GRADO

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Cordial saludo,

Estoy remitiendo a usted mi Documento Final del Trabajo de Grado titulado “*Diagnosis de los Patrones De Deterioro en el Material Pétreo de la Muralla Influenciado por el Ambiente Húmedo Y Salino en la ciudad de Cartagena (Estudio del Caso: Sector Del Baluarte De San Ignacio Y La Cortina Entre Este Y El Baluarte De San Juan Evangelista)*” para su respectiva aprobación. Esperando prontamente su comunicación.

Atentamente,

GUILLERMO JESÚS ACUÑA ROBLES

Cod. 0210710036

DIAGNOSIS DE LOS PATRONES DE DETERIORO EN EL MATERIAL PÉTREO DE
LA MURALLA INFLUENCIADO POR EL AMBIENTE HÚMEDO Y SALINO EN LA
CIUDAD DE CARTAGENA.

(Estudio del Caso: Sector del Baluarte de San Ignacio y la Cortina entre este y el Baluarte
de San Juan Evangelista)



GUILLERMO JESÚS ACUÑA ROBLES

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

2012

DIAGNOSIS DE LOS PATRONES DE DETERIORO EN EL MATERIAL PÉTREO DE
LA MURALLA INFLUENCIADO POR EL AMBIENTE HÚMEDO Y SALINO EN LA
CIUDAD DE CARTAGENA.

Estudio del Caso: Sector del Baluarte de San Ignacio y la Cortina entre este y el Baluarte de
San Juan Evangelista



UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

2012

DEDICATORIA

A mi Dios quien me ha dado la fuerza, la sabiduría y a abrió cada sobrenatural una de las puertas que fueron necesarias para poder culminar este trabajo.

A mis padres quienes con sus palabras que fueron el mayor instrumento de Dios para sobrellevar cada uno de los altos y bajos ocurridos durante elaboración del mismo.

A mi familia en general que a la distancia me apoyo de todas la mas maneras que pudo.

Y a mis compañeros y amigos que creyeron en mis capacidades y en el sueño que Dios puso en mi corazón con este proyecto.

Guillermo Jesús Acuña Robles

AGRADECIMIENTOS

DOCENTES

EDGAR QUIÑONES BOLAÑOS. Docente de Ingeniería Civil. Director de Tesis.

MÓNICA ELJAIK URZOLA. Docente de Ingeniería Civil. Evaluador.

ROSARIO MUÑOZ MARTÍNEZ. Docente de Ingeniería Civil. Evaluador.

COLABORADORES

SOCIEDAD DE MEJORAS PÚBLICAS DE CARTAGENA

DPTO. APOYO LOGÍSTICO DE LA ALCALDÍA DE CARTAGENA

ALBERTO HERRERA DÍAZ. Arquitecto Restaurador.

FAMILIARES Y AMIGOS

Familia Acuña Robles.

Amigos y compañeros.

CONTENIDO

| | pag. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 15 |
| 1 OBJETIVOS | 17 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL | 17 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 17 |
| 2 ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO | 18 |
| 2.1 MARCO TEÓRICO | 18 |
| 2.1.1 Diagnostico..... | 18 |
| 2.1.2 Definición y Caracterización De La Caliza..... | 18 |
| 2.1.2.1 Wackstone y Packstone | 20 |
| 2.1.2.2 Grainstone | 20 |
| 2.1.2.3 Boundstone | 20 |
| 2.1.3 Clasificación Tipológica De Los Baluartes Y Cortinas Del Recinto Fortificado De Cartagena De Indias | 20 |
| 2.1.3.1 Cortina O Lienzo De Muralla De Recinto | 21 |
| 2.1.3.2 Baluarte O Bastion..... | 21 |
| 2.1.4 Categorías Constructivas..... | 21 |
| 2.1.4.1 Bl 1: Baluarte De Esquina Regular | 21 |
| 2.1.4.2 Bl 2: Baluarte Intermedio Regular..... | 22 |
| 2.1.4.3 Tipo C1: Cortina Atenazada Con Calle De Ronda | 22 |
| 2.1.4.4 Tipo C2: Cortina Con Edificio Adosado | 22 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.1.5 | Patrones de Deterioro según ICOMOS – ISCS (Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos) | 23 |
| 2.1.5.1 | Grieta | 23 |
| 2.1.6 | Humedad Y Tipología De Las Humedad..... | 36 |
| 2.2 | ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE | 38 |
| 2.2.1 | Cronología y Descripción Arquitectónica..... | 38 |
| 2.2.1.1 | Evolución e Intervenciones sobre el Baluarte San Ignacio de Loyola ... | 38 |
| 2.2.1.2 | Evolución e Intervenciones sobre la cortina entre el Baluarte San Juan Evangelista y San Ignacio de Loyola. | 41 |
| 2.2.1.3 | Uso actual del Baluarte San Ignacio y la Cortina entre éste y el Baluarte de San Juan Evangelista. | 44 |
| 2.2.2 | Informe de Patología Estructura: Baluarte de San Ignacio (2003)..... | 45 |
| 2.2.3 | Estudio fisicoquímico del deterioro del material pétreo estructural antiguo de las murallas de Cartagena De Indias-Colombia (Baluarte De Santiago) en el 2007 ... | 46 |
| 2.2.4 | Diagnostico del sistema de Drenaje y de los Factores Ambientales y Climáticos en la Restauración de los Lienzos de Muralla en la ciudad de Cartagena | 48 |
| 2.2.4.1 | Efecto Del Agua..... | 50 |
| 2.2.4.2 | Efecto Climatológico | 51 |
| 2.2.5 | Estudios sobre efecto de la salinidad sobre materiales pétreos | 52 |
| 2.2.6 | Deterioro en los monumentos debido a las sales solubles | 54 |
| 3 | METODOLOGÍA | 60 |
| 3.1 | RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA | 60 |
| 3.2 | LOCALIZACIÓN Y DELIMITACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO | 60 |
| 3.3 | DIAGNOSTICO..... | 61 |

| | | |
|---------|---|--------------------------------------|
| 3.3.1 | Análisis Ambiental..... | 61 |
| 3.3.1.1 | Relación de la Meteorología Anual con respecto a la posible aparición de los Patrones de Deterioro en el Material Pétreo..... | 61 |
| 3.3.1.2 | Estimación de depósitos atmosféricos | 61 |
| 3.3.1.3 | Efecto de la calidad del agua precipitada..... | 65 |
| 3.3.1.4 | Evaluación de la Calidad de Aire | 65 |
| 3.3.2 | Análisis de la Construcción..... | 65 |
| 3.3.2.1 | Caracterización de la Construcción | 66 |
| 3.3.2.2 | Caracterización y Clasificación del Material..... | 66 |
| 3.3.2.3 | Identificación del tipo y grado de humedad en la escarpa..... | 66 |
| 3.3.2.4 | Evaluación de la erosión por escorrentía | 66 |
| 3.3.2.5 | Evaluación de la Presión de Cristalización..... | 68 |
| 3.3.2.6 | Evaluación de la Presión de Hidratación | 69 |
| 3.3.2.7 | Evaluación del la Precipitación de Sales | 69 |
| 3.3.3 | Diagnóstico de Patologías en el Material Pétreo..... | 69 |
| 3.4 | COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON ESTUDIOS ANTERIORES | 70 |
| 3.5 | RECOMENDACIÓN DE PRESERVACIÓN Y RESTAURACIÓN..... | 70 |
| 4 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 71 |
| 4.1 | LOCALIZACIÓN Y DELIMITACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO | 71 |
| 4.2 | DIAGNÓSTICO..... | 72 |
| 4.2.1 | Análisis Ambiental..... | ¡Error! Marcador no definido. |
| 4.2.1.1 | Relación de la Meteorología Anual con respecto a la posible aparición de los Patrones de Deterioro en el Material Pétreo..... | 72 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.2.1.2 | Estimación de depósitos atmosféricos | 75 |
| 4.2.1.3 | Efecto de la calidad del agua precipitada..... | 79 |
| 4.2.1.4 | Evaluación de la Calidad de Aire | 80 |
| 4.3 | ANÁLISIS DE LA CONSTRUCCIÓN | 81 |
| 4.3.1 | Caracterización de la Construcción..... | 81 |
| 4.3.2 | Caracterización y Clasificación del Material | 81 |
| 4.3.2.1 | Wackestone..... | 82 |
| 4.3.2.2 | Packstone | 84 |
| 4.3.2.3 | Grainstone..... | 85 |
| 4.3.2.4 | Boundstone | 86 |
| 4.3.3 | Identificación del tipo y grado de humedad en | 87 |
| 4.3.3.1 | Humedad por Capilaridad..... | 88 |
| 4.3.3.2 | Humedad accidental..... | 89 |
| 4.3.3.3 | Humedad por infiltración..... | 91 |
| 4.3.4 | Evaluación de la erosión por escorrentía..... | 93 |
| 4.3.5 | Evaluación de la Presión de Cristalización | 94 |
| 4.3.6 | Evaluación de la Presión de Hidratación..... | 96 |
| 4.3.7 | Evaluación del la Precipitación de Sales..... | 96 |
| 4.4 | DIAGNÓSTICO DE LAS PATOLOGÍAS..... | 97 |
| 4.4.1 | Reconocimiento de los Patrones de Deterioro Influenciados por la Humedad y Salinidad..... | 97 |
| 4.4.2 | Otros patrones de relevancia indirecta | 109 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.5 | COMPARACIÓN DEL ESTADO DEL MATERIAL CON RESPECTO A ESTUDIOS ANTERIORES..... | 112 |
| 4.5.1 | Estudio de Patologías 2003 Vs. Estudio Actual..... | 112 |
| 4.5.2 | Comparaciones con el Diagnostico del sistema de Drenaje y de los Factores Ambientales y Climáticos en la Restauración de los Lienzos de Muralla en la ciudad de Cartagena en 2008..... | 113 |
| 4.6 | RECOMENDACIÓN DE PRESERVACIÓN Y RESTAURACIÓN..... | 115 |
| 5 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 117 |
| 5.1 | CONCLUSIONES..... | 117 |
| 5.2 | RECOMENDACIONES | 118 |
| 6 | BIBLIOGRAFÍA | 120 |
| 7 | ANEXOS | 1 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Imagen 1. Clasificación de las rocas según Dunham | 19 |
| Imagen 2. Tipos de Baluarte | 21 |
| Imagen 3. Cortina Tipo C1 | 22 |
| Imagen 4. Cortina tipo C2..... | 22 |
| Imagen 5. Tipos del Grietas. | 23 |
| Imagen 6. Ampollamiento..... | 24 |
| Imagen 7. Tipos de Desintegración..... | 25 |
| Imagen 8. Fragmentación..... | 26 |
| Imagen 9. Escamamiento | 27 |
| Imagen 10. Alveolizacion | 27 |
| Imagen 11. Erosión | 28 |
| Imagen 12. Microkarst | 29 |
| Imagen 13. Corteza | 30 |
| Imagen 14. Deposito | 30 |
| Imagen 15. Descoloración..... | 32 |
| Imagen 16. Eflorescencia..... | 32 |
| Imagen 17. Incrustación | 33 |
| Imagen 18. Pátina..... | 34 |
| Imagen 19. Manchar..... | 34 |
| Imagen 20. Subflorencia..... | 35 |
| Imagen 21. Colonización Biológica..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Imagen 22. Tipología de las Humedades | 37 |
| Imagen 23. Estancamiento de aguas. Baluarte de San Ignacio. | 50 |
| Imagen 24. Ubicación de los testigos sobre el tramo evaluado | 62 |
| Imagen 25. Centro Histórico de Cartagena de Indias | 71 |
| Imagen 26. Diferentes tipos de piedra presentes en el Lienzo del Baluarte de San Ignacio. En la parte superior se observa la única muestra de tipo Wackston | 83 |
| Imagen 27. 1. Microfotografía de la muestra TE-58-2008. I-06 en donde se observan los fragmentos fósiles flotando en la matriz de lodo calcáreo. Roca tipo Wackstone. A la izquierda, imagen general de la roca. | 84 |
| Imagen 28. Microfotografía de la muestra TE-58-2008. I-08 en donde se observan los fragmentos fósiles tocándose puntualmente en la matriz de lodo calcáreo. | 84 |
| Imagen 29. Microfotografía de la muestra TE-58-2008. I-12 en donde se observan los fragmentos dentro de la matriz de cemento calcáreo. A la derecha imagen general de la roca. | 86 |
| Imagen 30. Microfotografías de las muestras TE-58-2008. I-13. Se observan los diferentes poros e intersticios generados por las estructuras esqueléticas del coral. | 87 |
| Imagen 31. Humedad por capilaridad | 88 |
| Imagen 32. Secciones delgadas de piedra <i>Boundstone</i> y <i>Grainstone</i> | 89 |
| Imagen 33. Canal en mal funcionamiento | 90 |
| Imagen 34. Drenaje de grifo de agua en la Alcaldía Mayor de Cartagena y su efecto sobre la humedad de las rocas de la muralla. | 91 |
| Imagen 35. Área de la escarpa inmediatamente inferior al peripeto en donde se acumula la humedad | 92 |
| Imagen 36. Cartografía de Humedad en una Sección | 93 |
| Imagen 37. Fracturas en el Material Pétreo | 97 |

| | |
|---|-----|
| Imagen 38. Fisuras y Microfisuras en el Material Pétreo | 98 |
| Imagen 39. Desmoronamiento y Desintegración Granular en el Material Pétreo | 99 |
| Imagen 40. Disolución en el Material Pétreo en un sillar del remate superior | 100 |
| Imagen 41. Erosión Diferencial por pérdida de componentes en el Material Pétreo..... | 101 |
| Imagen 42. Erosión Diferencial por pérdida de la matriz en el Material Pétreo..... | 101 |
| Imagen 43. Redondeo en el Material Pétreo | 102 |
| Imagen 44. Costras Negras sobre el Material Pétreo | 103 |
| Imagen 45. Decoloración en la superficie del Material Pétreo | 106 |
| Imagen 46. Incrustaciones sobre la escarpa del Baluarte San Ignacio..... | 107 |
| Imagen 47. Colonización Biológica la escarpa del Baluarte San Ignacio..... | 109 |
| Imagen 48. Perdida de Sillares y Argamasa en el Baluarte San Ignacio | 110 |
| Imagen 49. Alveolización sobre la escarpa del Baluarte San Ignacio | 111 |
| Imagen 50. Arañazos sobre la escarpa del Baluarte San Ignacio..... | 111 |
| Imagen 51. Comparación estado de la escapara del Baluarte San Ignacio 2008 y 2011 ... | 113 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Evolución Histórica del Baluarte del San Ignacio | 41 |
| Tabla 2. Evolución Histórica de la cortina entre el Baluarte San Juan Evangelista y San Ignacio..... | 44 |
| Tabla 3. Presiones de hidratación (atm) para algunas sales solubles a distintas temperaturas y humedades relativas | 56 |
| Tabla 4. Humedades relativas de precipitación para las sales | 58 |
| Tabla 5. Especificaciones de los muestreos | 63 |
| Tabla 6 – Caudales para Cada Periodo de Retorno..... | 67 |
| Tabla 7. Promedios Multianuales de los principales parámetros Meteorológicos de Cartagena..... | 73 |
| Tabla 8. Análisis Químico a la solución de los testigos..... | 75 |
| Tabla 9. Confirmación de análisis químico..... | 76 |
| Tabla 10. Calculo de la tasa de deposición de Cloruros | 77 |
| Tabla 11. Calculo de la tasa de deposición de Salinidad | 77 |
| Tabla 12. Calculo de la tasa de deposición de Sulfatos | 78 |
| Tabla 13. Análisis Químico al Agua Precipitada..... | 79 |
| Tabla 14. Velocidades máximas para los recorridos Considerados..... | 94 |
| Tabla 15. Intervalos para la distribución de radios de poros | 95 |
| Tabla 16. Distribución de poros en la Roca | 95 |
| Tabla 17. Presiones Máximas Teóricas para los grupos de Poros | 95 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 18. Presiones parciales para los grupos de Poros y las presiones totales para cada muestra analizada | 95 |
| Tabla 19. Comparación de Tasas de deposición 2008 y 2011 | 114 |
| Tabla 20. Comparación de muestras de agua precipitada 2008 y 2011 | 115 |

TABLA DE ECUACIONES

| | |
|---|----|
| Ecuación 1. Exceso de Presión calculado por Wellman y Willson | 55 |
| Ecuación 2. Concentracion de Cloruros | 64 |
| Ecuación 3. Concentracion de Salinidad..... | 64 |
| Ecuación 4. Concentracion de Sulfatos..... | 64 |
| Ecuación 5. Caudal Maximo Promedio | 67 |
| Ecuación 6. Velocidad Promedio..... | 68 |

RESUMEN

Diagnosis de los Patrones de Deterioro en el Material Pétreo de la Muralla Influenciado por el Ambiente Húmedo y Salino en la Ciudad de Cartagena

(Sector del Baluarte de San Ignacio y la Cortina entre este y el Baluarte de San Juan Evangelista)

Desde 1985 las Murallas de Cartagena de Indias son consideradas por la Organización de Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) como Patrimonio Cultural de la Humanidad, pero debido a la contaminación atmosférica generada por los parques automotores, la urbanización total de sus alrededores en combinación con el ambiente húmedo y salino característico de esta ciudad costera, la vida y preservación de estas obras está en riesgo. Es por esta situación que el presente trabajo de grado busca diagnosticar y recomendar tratamientos para los patrones de deterioro relacionados con el entorno húmedo y salino al cual está expuesto el material pétreo que compone la escarpa de la muralla, tomando en especial consideración el sector del Baluarte de San Ignacio y la cortina entre éste y el Baluarte de San Juan Evangelista.

Dentro de esta investigación se implementaron análisis a los depósitos atmosféricos, caracterizaciones fisicoquímicas de las aguas de lluvia, análisis de humedades y la salinidad en relación con la meteorología, emplazamiento de la estructura y uso de la estructura, evaluaciones al sistema constructivo y sus materiales y un diagnóstico de los patrones de deterioro basando en inspecciones de campo y correlaciones de los análisis anteriores. De lo anterior se pudo determinar que la muralla se encuentra asediada por procesos de erosión, disolución y formación de costras, atribuidos principalmente a las condiciones húmedas y salinidad que el ambiente costero le proporciona a la estructura. De igual forma mediante este diagnóstico se pudo reconocer el efecto estético y físico que la contaminación del aire tiene sobre la estructura, el cual es responsable de su color actual y textura.

Se efectuó además una comparación de los resultados obtenidos con los de otros estudios sobre realizados al cordón amurallado que reafirmaron el estado progresivo del deterioro y

se presentaron como recomendaciones para la preservación estética y cultural de la estructura, la limpieza, restitución de sillares y mantenimiento de los sistemas de drenaje.

ABSTRACT

Diagnosis of Deterioration Patterns in the Wall rock materials influenced by the environment humidity and salinity in the City of Cartagena

(Sector San Ignacio's Bastion and the curtain between this and the Bastion of St. John the Evangelist)

Since 1985 the Walls of Cartagena de Indias are regarded by United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) Cultural Heritage of Humanity, but because the air pollution from motor vehicles, the total urbanization the surrounding areas in combination with the salt and wet environment characteristic of this coastal city, the life and preservation of these construction is in risk situation. This research seeks diagnose and recommend treatments for decay patterns associated with the salt and wet environment which is exposed stonework composes escarpment of the battlement, paying special attention to the area of Bastion San Ignacio and the curtain between this and the Bastion of San Juan Evangelista.

In this research were implemented to analysis atmospheric deposition, physicochemical characterizations of rainwater, analysis of moisture and salinity in relation to weather, location of the structure and use of the structure, evaluations to the building system and materials and a diagnosis of the decay patterns basing on field inspections and correlations of the previous analysis. From the above it was determined that the battlement is besieged by processes of erosion, dissolution and crusting, primarily attributed to the wet and salinity conditions presents in coastal environment. In the same way, during this diagnosis was recognized the aesthetic effect and physical that air pollution has on the structure, which is the main responsible for the color and texture current.

It was performed a comparison of results with those of other studies performed on the cord walled reaffirming the progressive deterioration and was presented recommendations for preserving aesthetic, physical and cultural of structure, cleaning and repositioning of blocks and maintenance of drainage systems.

INTRODUCCIÓN

Cartagena, poseedora de un centro histórico y una exquisita línea de playas y hoteles, se define como ciudad turística y su atractivo turístico se encuentra en la “Ciudad Antigua”, la cual se caracteriza por una arquitectura colonial, apreciada tanto en las fachadas de las casas como en el cordón amurallado que rodea el conjunto de residencias y espacios comerciales. Dicho cordón se distingue por sus 4 km de longitud y transcendencia histórica, que junto con los fuertes, puertos y demás monumentos es reconocido desde 1985 como Patrimonio Cultural de la Humanidad por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Lastimosamente las condiciones físicas en las que se encuentran las murallas no son las mejores, debido a la insuficiencia y deficiencia de los planes de restauración y conservación, además de su emplazamiento dentro de un entorno ambientalmente agresivo (Cunin & Rianudo, 2007).

Aunque hoy no está siendo asediada por ataques piratas, sí por mecanismos naturales y antropogénicos como fuertes vientos, ambientes húmedos y salinos propios de la costa, el incremento de la contaminación atmosférica y la falta de civismo de los visitantes y ciudadanos, los cuales tallan el material pétreo y abandonan indiscriminadamente basuras sobre él (Cunin & Rianudo, 2007; Herrera Díaz, Quiñones, & Martínez Batista, 2008).

Investigaciones como el *Estudio Físicoquímico del Deterioro del Material Pétreo Estructural Antiguo de las Murallas de Cartagena de Indias-Colombia (Baluarte de Santiago)* (Barbosa, Buendía, & Cortes, 2007) y los resultados de consultorías realizadas durante la ejecución de las obras de TRANSCARIBE, particularmente el *Diagnóstico del Sistema de Drenaje y de los Factores Ambientales y Climáticos en la Restauración de los Lienzos de Muralla en la Ciudad de Cartagena (Entre el Monumento de la India Catalina y el Museo de la Marina en Cartagena, pasando por la Torre del Reloj)* (Quiñones & Martínez Batista, 2008), han establecido que la muralla se encuentra vulnerable a su

ambiente, en especial al entorno húmedo y salino. Por ello este trabajo desarrolló un *Diagnóstico de los Patrones de Deterioro en el Material Pétreo del Lienzo de la Muralla influenciado por el Ambiente Húmedo y Salino del Sector del Baluarte de San Ignacio y de la cortina entre éste y el Baluarte de San Juan Evangelista*, con el fin de estimar el deterioro que sufre la muralla.

Dentro del alcance de esta investigación se elaboraron análisis de depósitos atmosféricos, características fisicoquímicas de las aguas de lluvia, análisis de humedades y salinidades en relación con la meteorología y emplazamiento de la estructura, evaluaciones al sistema constructivo y sus materiales, un diagnóstico de los patrones de deterioro basando en inspecciones de campo y correlación de los análisis anteriores. Se efectuó además como valor agregado una comparación de los resultados obtenidos con los de otros estudios sobre realizados al cordón amurallado y se presentaron recomendaciones para la preservación y restitución estética y cultural de la estructura.

Entendiendo la importancia de esta construcción y los resultados de dicho estudio, se considera éste, una suma a los recientes esfuerzos de preservación y control de la edificación, aprendiendo por medio de él, que el valor de la ingeniería no está solo en construir a lo grande, si no en mantener a los grandes.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diagnosticar los patrones de deterioro, relacionados con el entorno húmedo y salino al cual está expuesto el material pétreo de las murallas en el sector Baluarte de San Ignacio, y la cortina entre éste y el Baluarte de San Juan Bautista, mediante un análisis descriptivo y experimental de las condiciones medio ambientales de la zona y su incidencia sobre los sillares; esto para recomendar medidas preventivas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los posibles efectos de las variaciones climáticas y procesos constructivos que pudiesen representar un efecto sobre las condiciones del material pétreo de la muralla.
- Determinar los diferentes tipos de deterioro presentes en los sillares de la muralla.
- Relacionar por medio de análisis ambientales y del estado del material pétreo como el escenario salino y húmedo incide en los patrones de deterioro que presenta la muralla en la actualidad
- Recomendar medidas de cuidado y preservación podrían realizarse sobre el material pétreo para disminuir el efecto de deterioro.

2 ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

2.1 MARCO TEÓRICO

Durante esta sección se definió las principales teorías y conceptos utilizados durante el desarrollo de este proyecto, haciendo hincapié de manera especial las características de la roca, los patrones de deterioro y las diferentes tipologías de humedades.

2.1.1 Diagnóstico

Según Broto, el diagnóstico de lesiones (patrones de deterioro) se define como el conjunto de de investigaciones in situ (en el lugar) y de laboratorio que permiten determinar el estado del material y los casuales del deterioro. Los estudios in situ están relacionados con la construcción y su entorno. Los análisis de laboratorio tienen que ver con la caracterización y diagnóstico de las piedras propiamente dichas. Los dos elementos son necesarios y complementarios para poder determinar cuáles son las causales de las lesiones y obtener un buen resultado a la hora de enfrentarse a una restauración (o conservación) de construcciones que involucren a los materiales pétreos.

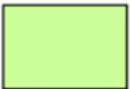
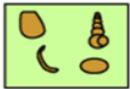
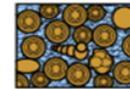
El análisis in situ está compuesto mayormente por análisis del clima, de los factores geológicos, de la contaminación ambiental, de los factores sociológicos, políticos y culturales, análisis históricos y caracterizaciones de la construcción.

2.1.2 Definición y Caracterización De La Caliza

En la actualidad, se define la caliza como una roca compuesta por lo menos del 50% de carbonato de calcio (CaCO_3), con porcentajes variables de impurezas, en su interpretación más amplia, el término incluye cualquier material calcáreo que contenga carbonato de calcio como mármol, creta, travertino, coral y marga (Diccionario Enciclopédico Dominicano de Medio Ambiente, 2011).

En aras de simplificar la comprensión de los tipos de piedras estudiadas en el presente trabajo utilizaremos la clasificación de calizas propuestos por Dunham (Imagen 1), el cual la agrupa en: Wackestone, Packstone, Grainstone y Boundstone.

Imagen 1. Clasificación de las rocas según Dunham

| Original components not bound together at deposition | | | | Original components bound together at deposition. Intergrown skeletal material, lamination contrary to gravity, or cavities floored by sediment, roofed over by organic material but too large to be interstices |
|---|---|--|--|--|
| Contains mud (particles of clay and fine silt size) | | Lacks Mud | | |
| Mud-supported | | Grain-supported | | |
| Less than 10% Grains | More than 10% Grains | | | |
| Mudstone  | Wackestone  | Packstone  | Grainstone  | Boundstone  |

Fuente: Tomado de C.G.St.C. Kendall 2005 AAPC.

Esta clasificación tiene en cuenta una serie de características de las piedras carbonatadas tales como el grado de empaquetamiento y el tipo de matriz en la que se encuentran los fragmentos aloquímicos.

Se distinguen dos tipos de matrices en la roca, el primero que corresponde a lodo calcáreo o micrita (contracción del inglés para *microcrystalline calcite*) la cual es una calcita de cristales muy finos que se comporta como un material amorfo y el segundo tipo de matriz corresponde a la *esparita* o calcita cristalina que presenta cristales de un tamaño superior a las 10 micras y que funciona como un cementante de los fragmentos, por lo que también se denomina cemento calcáreo. Es importante anotar, que en las diferentes piedras el proceso de cristalización del lodo calcáreo, o su transformación en esparita, es un fenómeno progresivo por lo que es normal encontrar especímenes heterogéneos cuya matriz contiene zonas de micrita y esparita al mismo tiempo. Los cuatro grupos principales de piedras calcáreas se describen a continuación:

2.1.2.1 *Wackstone y Packstone*

Son rocas compuestas por fragmentos calcáreos que se encuentran aglutinados por una matriz amorfa de lodo calcáreo. La característica que diferencia estos dos grupos de piedras radica en el contacto entre los fragmentos. Para el caso de las piedras *Wackstone*, los fragmentos se presentan flotando en la matriz mientras que para las *Packstone*, los contactos son principalmente puntuales.

2.1.2.2 *Grainstone*

Están compuestas por fragmentos calcáreos (como fósiles, intraclastos, pellets, etc.) ubicados dentro de una matriz de calcita cristalina (esparita). Estas piedras proceden de ambientes de sedimentación tales como playas de naturaleza calcárea. A nivel textural, la porosidad de este tipo de piedras puede variar de un ejemplar a otro.

2.1.2.3 *Boundstone*

Este tipo de calizas están constituidas por diferentes componentes orgánicos originales que se han depositado construyendo la piedra de acuerdo con su morfología originaria; estos fósiles que pueden ser de distinto tipo, generan una gran diversidad de estructuras en la roca.

2.1.3 **Clasificación Tipológica De Los Baluartes Y Cortinas Del Recinto Fortificado De Cartagena De Indias**

De acuerdo con la clasificación realizada por el Arq. Alberto Herrera (2009) dentro de su estudio detallado de los elementos actuales que componen las unidades de intervención que nos interesan en este trabajo, podemos apreciar dos formas constructivas básicas dentro del sistema abaluartado de la ciudad de Cartagena, las cuales se presentan de manera repetitivas e independientes de otras formas constructivas de defensa que hacían parte de este recinto, estas formas son: *Cortina o lienzo de muralla y Baluarte o Bastión*.

2.1.3.1 Cortina O Lienzo De Muralla De Recinto

Es un muro escarpado y recto que une dos baluartes, estos forman un frente defensivo o abaluartado muy dinámico, pues es donde se establecen los fuegos directos y cruzados. La cortina tiene una magnitud establecida que cambia en diferentes épocas, de acuerdo al desarrollo de la tecnología armamentista.

2.1.3.2 Baluarte O Bastión

El bastión o baluarte es un reducto fortificado que se proyecta hacia el exterior del cuerpo principal de una fortaleza, situado generalmente en las esquinas de los 'muros de cortina', como punto fuerte de la defensa contra el asalto de tropas enemigas. Puede tener la forma pentagonal y en este caso, se compone de dos caras, dos flancos y la línea de gola por la cual se entra a la obra. El diseño del Baluarte y el hecho de que sobresalga del cuerpo de la fortaleza permiten cubrir los otros baluartes y los muros de cortina con fuego cruzado.

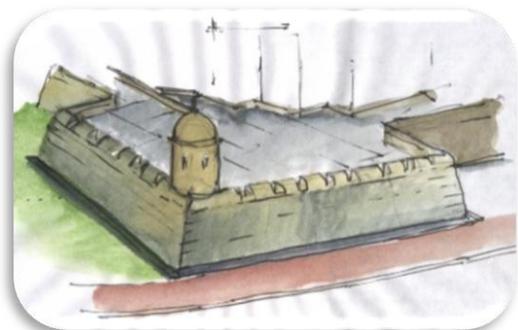
2.1.4 Categorías Constructivas

Se clasificaron las cortinas teniendo en cuenta sus variaciones dentro del sistema fortificado de la ciudad y unidad objeto de estudio:

2.1.4.1 Bl 1: Baluarte De Esquina Regular

Este tipo de baluarte está ubicado en la esquina de un recinto fortificado, además, presenta flancos regulares o simétricos, independiente de la forma de la gola.

Imagen 2. Tipos de Baluarte



2.1.4.2 Bl 2: Baluarte Intermedio Regular

Pertenece al tipo de baluarte que se encuentra en una zona intermedia del recinto fortificado y sus cortinas a ambos lados de esta, están construidas de forma perpendicular a este



Fuente: Alberto Herrera, 2009

De igual forma se clasificaron las cortinas teniendo en cuenta sus variaciones dentro del sistema fortificado de la ciudad y unidad objeto de estudio:

2.1.4.3 Tipo C1: Cortina Atenazada Con Calle De Ronda

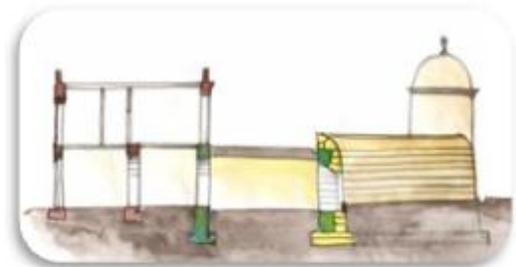
Consiste en una cortina, compuesta por dos tramos, las cuales por su ubicación en Angulo abierto con respecto a los baluartes que unen, forman una tenaza, a su vez presentan una calle de Ronda paralela a esta.



Fuente: Alberto Herrera, 2009

2.1.4.4 Tipo C2: Cortina Con Edificio Adosado

Esta cortina presenta un edificio adosado a todo lo largo de esta y se integra a este con una función específica.



Fuente: Alberto Herrera, 2009

2.1.5 Patrones de Deterioro según ICOMOS – ISCS (Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos)

Dado que este estudio está referido principalmente a la determinación de los patrones de deterioro y su correlación con el ambiente salino, su determinación estará basada en glosario ICOMOS-ISCS. Es necesario aclarar que el glosario ISCS solo contiene términos relacionados al elemento de piedra como un elemento individual dentro de un objeto o escultura ya construida. En consecuencia, los términos no están relacionados a la descripción del deterioro de una estructura de mampostería en piedra como tal. A continuación se realizara una breve descripción de los patrones de deterioro.

2.1.5.1 Grieta

Fisura individual, claramente visible a simple vista, resultado de la separación entre una parte y la otra. Se puede clasificar en:

- *Fractura*: grieta que cruza completamente la superficie de piedra.
- *Grieta estrella*: grieta que tiene la forma de una estrella. El hierro oxidado o el impacto mecánico son causas posibles de este tipo de daño.
- *División*: fracturación de la piedra a lo largo de debilidad tales como microgrietas o capas de sedimentos, en casos donde los elementos estructurales están estructurados verticalmente.

Imagen 5. Tipos del Grietas.

Craquele - Craquelado



Fractura



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

☞ Ampollamiento

Elevaciones hemisféricas altas separadas y llenas de aire en la cara de una piedra, resultantes del desprendimiento de una capa exterior de piedra. Este desprendimiento no está relacionado con la estructura de piedra. En algunos casos es causado por sales solubles.

Imagen 6. Ampollamiento



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

☞ Desintegración

Desprendimiento de granos solos o agregados de granos y se subclasifica en:

- *Desmoronamiento*: el desprendimiento de agregados de grano de substrato. Estos agregados son generalmente limitados en tamaño (menos de 2 cm). El tamaño depende de la naturaleza de la piedra y sus alrededores.
- *Desintegración granular*: ocurre en granulados sedimentarios (ej. arenisca) y granulados cristalinos (ej. granito). La *desintegración granular* produce desechos, comúnmente llamados como comida de roca y pueden ser vistos acumulándose al pie de la pared que es deteriorada activamente. Si la superficie de piedra forma una cavidad, el material desprendido puede ser acumulado al fondo de la cavidad por la gravedad. El tamaño del grano de la piedra determina el resultado del material desprendido. Los siguientes términos específicos, todos relacionados con *desintegración granular*, se refieren o al tamaño, o al aspecto de los granos correspondientes:

- *Pulverizando, atizando*: términos que son algunas veces utilizados para describir la desintegración granular de granos finos.

Las piedras pueden presentar patrones de deterioración intermedia entre *desintegración granular* y *desmoronamiento*, *ampliamiento*, o patrones de *deformación*. La *desintegración granular* parcial o severa usualmente lleva a características de la superficie tales como *alveolización* o *redondeo*.

Imagen 7. Tipos de Desintegración.

Desmoronamiento (Crumbling)



Desintegración Granular



Pulverización (Desintegración Granular)



Desmoronamiento (Crumbling)



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

☞ Fragmentación

La fractura completa o parcial de una piedra a porciones de dimensiones variables que son irregulares en forma, grosor, y volumen. *La fragmentación puede ser encontrada cuando los bloques de piedra son sometidos a sobrepeso. Las partes superiores al igual que las partes inferiores de las columnas monolíticas son particularmente propensas al astillamiento (mucho peso soportado en un área muy pequeña).*

Imagen 8. Fragmentación



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

☞ Escamamiento

Desprendimiento de la piedra como una escama o una torre de escamas que no siguen la estructura de la piedra y se desprenden como escamas de pez o paralelas a la superficie de la piedra. El grosor de una escama es generalmente milimétrica o centimétrica, y es ignorable comparada con la dimensión de la superficie. Se puede clasificar en:

- *Descamacion:* escamacion en delgadas y planas o curvas escalas de un grosor submilimétrico o milimétrico, organizadas como escamas de pez.
- *Escamamiento del contorno:* escamamiento en el cual la interfaz es paralela a la piedra.

Imagen 9. Escamamiento

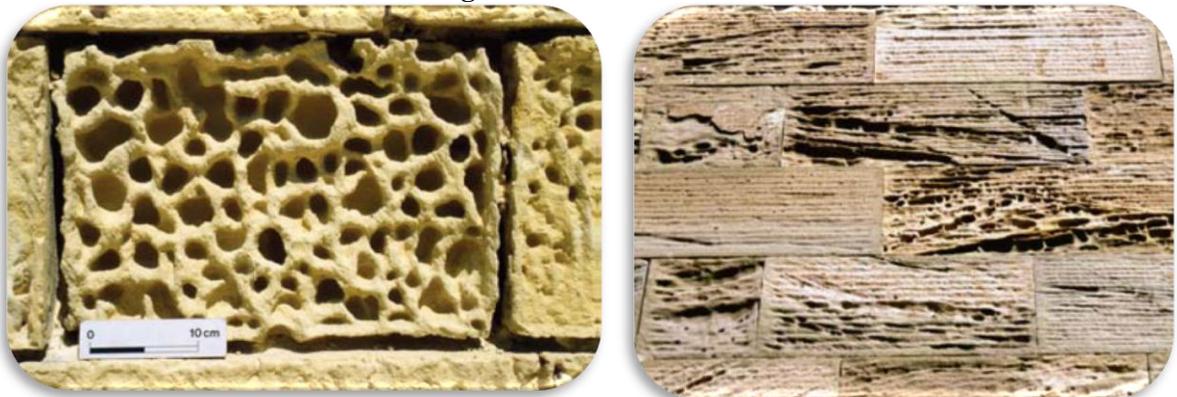


Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

☞ Alveolización

Formación de cavidades (alveolas) en la superficie de la piedra que pueden estar interconectadas y pueden variar en formas y tamaños (generalmente miden centímetros, a veces metros).

Imagen 10. Alveolización



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

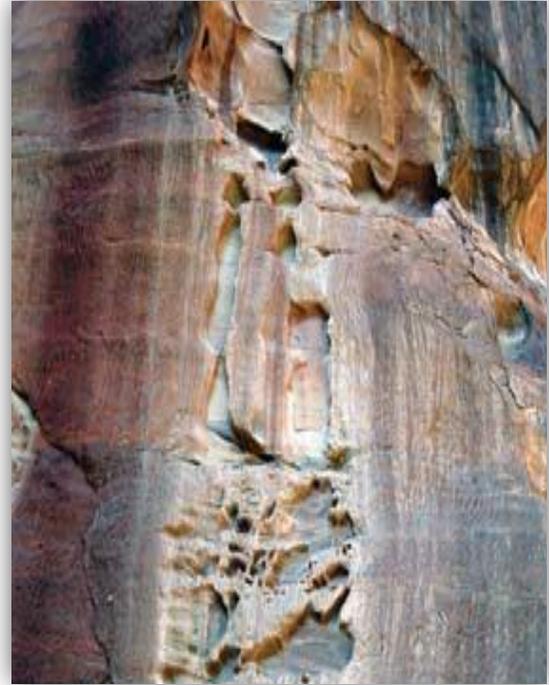
☞ Erosión

Perdida de la superficie original, que conlleva a formas alisadas, esta puede tener causas naturales o antropogénicas. Puede darse gracias a procesos químicos, físicos, y/o biológicos. Se subclasifica en:

- *Erosión diferencial*

- *Perdida de los componentes*
- *Perdida de la matriz*
- *Redondeo*
- *Raspado*

Imagen 11. Erosión



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

☞ Microkarst

Red de pequeñas depresiones que miden milímetros o centímetros que están interconectadas y que en algunos casos parecen una red hidrográfica. Los patrones de microkarst se deben a una disolución parcial o selectiva de superficies calcerosas expuestas al agua. No hay trazos de *desintegración granular* o *descamación* sobre la superficie.

Imagen 12. Microkarst



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

☞ Corteza

Es generalmente una acumulación de materiales coherentes en la superficie. Una corteza puede incluir una combinación de depósitos exogenitos y materiales derivados de la piedra. Una corteza usualmente presenta un color oscuro (*corteza negra*), pero también hay cortezas en colores claros. Una corteza puede tener un grosor homogéneo y ser una réplica de la superficie de la piedra, o puede tener un grosor irregular y estorbar los detalles de la superficie de la piedra.

Subtipos:

- *Corteza negra:* un tipo de corteza que se produce generalmente en áreas que están protegidas contra la lluvia directa en un ambiente urbano. La corteza negra se adhiere firmemente al sustrato. Están compuestas en su mayor parte de partículas de la atmosfera atrapadas en la matriz del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
- *Corteza salina:* corteza compuesta de sales solubles, las cuales se desarrollan en la presencia de altos niveles de sal y círculos que se secan y se mojan.

Imagen 13. Corteza



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

☞ Deposito

Una acumulación de material exogenito de grosor variable. Algunos ejemplos de depósitos son los aerosoles de agua salada, partículas atmosféricas como el polvo, restos de materiales conservativos como la celulosa, etc. Es de vital importancia saber que un depósito carece de adhesión con la superficie de la piedra.

Imagen 14. Deposito



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

☞ Descoloración

Cambio del color de la piedra en uno de estos tres parámetros: tonalidad, valor, y croma.

- La **tonalidad** responde a las características más prominentes del color (azul, rojo, amarillo, naranja, etc....)
- El **valor** corresponde a la oscuridad (tonalidades oscuras) o a la claridad (tonalidades claras) del color.
- El **chroma** corresponde a que tan puro es el color. Los colores con una chroma alta lucen ricos y llenos. Los colores con una chroma baja lucen grisáceos y aburridos. La chroma también puede ser llamada saturación.

La *descoloración* es producida frecuentemente por sales, la corrosión de metales (hierro, plomo, cobre), microorganismos, o exposición al fuego. Algunos tonos típicos de descoloración, como amarillo, naranja, café, y negro se dan gracias a la presencia de carotinoides y melanina, producidas por los hongos y la cianobacterias. Asimismo, se pueden encontrar zonas oscuras producidas por la humedad de diferentes formas y extensiones de acuerdo a sus orígenes como: tuberías rotas, comportamiento húmedo de algo dado por la presencia de sales y condensación. La descoloración se puede subclasificar.

- *Coloración*: cambio en la tonalidad, valor, y/o incremento en el chroma.
- *Blanqueamiento*: incremento en el valor gracias a el deterioro químico de los minerales (ej. reducción de los compuestos hierro y magnesio) o extracción del material colorante (lixiviación), o una pérdida de brillo generalmente muy superficial. Los mármoles de colores oscuros o muy vivos usualmente muestran blanqueamiento como un resultado de exposición al clima.
- *Área húmeda*: corresponde a la zona oscura (tonalidad oscura) de una superficie por la humedad. La denominación *área húmeda* es preferible a *sitio húmedo*, *zona húmeda*, o *área húmeda visible*.
- *Manchas*: un tipo de descoloración generalmente limitada y de apariencia inatractiva.

Imagen 15. Descoloración



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

☞ Eflorescencia

Cristales delgados en la superficie de un color generalmente blanco o polvoriento. Las eflorescencias tienen una cohesión pobre y están hechas de cristales solubles de la sal. Su adhesión al sustrato es bastante débil lo cual facilita su remoción.

Imagen 16. Eflorescencia



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

☞ Incrustación

Mineral duro y compacto en la capa externa adherido a la piedra. La morfología de la superficie y el color son usualmente diferentes a los de la piedra. Las incrustaciones usualmente son encontradas en las áreas del edificio donde el agua se está colando o se ha colado en el pasado. Las incrustaciones generalmente están adheridas firmemente a la piedra y cuando una incrustación es removida, los materiales de la piedra que están adheridos también se pueden haber removidos.

Las incrustaciones en los monumentos son generalmente depósitos de materiales movilizadas por la colación de agua: carbonatos, sulfatos, óxidos metálicos, y sílica.

Imagen 17. Incrustación



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

☞ Pátina

Modificación cromática del material, generalmente un resultado artificial o natural del tiempo y que en muchos casos no muestra un deterioro visible en la superficie, se clasifican en:

- *Patinas ricas en hierro*: una capa natural delgada de color café o negro y enriquecido con materiales de la arcilla/hierro, el cual puede ser encontrado en el hierro que contiene piedras areniscas.

- *Patina de oxalato*: una capa delgada de color café o naranja enriquecida con oxalatos de calcio. Este tipo de patina se puede encontrar en un ambiente al aire libre y en muchos casos sobre superficies de mármol o substratos de piedra caliza.

Imagen 18. Pátina



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

∞ Manchar

Un depósito en forma de una capa delgada de partículas exógenas (ej. hollín), que le dan una apariencia sucia a tierra. Con las manchas pueden tener muchos grados de adhesión y cohesión con el substrato y su presencia no se considera una afectación a la estructura.

Imagen 19. Manchar



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

☞ Subflorencia

Sales solubles con una adhesión pobre, comúnmente blancas, localizadas debajo de la superficie de la piedra. Las subflorencias están escondidas a menos que la capa de piedra sobre ellas se desprenda. En ese caso, los cristales de la sal se vuelven visibles en la nueva superficie expuesta.

Imagen 20. Subflorencia



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

☞ Colonización Biológica

Colonización de la piedra por plantas y microorganismos como bacterias, hongos, algas, líquen, y cianobacterias. La colonización biológica también incluye la influencia de otros animales como los que hacen sus nidos sobre la piedra. La relación generalmente es fuerte y se desarrolla generalmente en las cavidades de la piedra. Su incidencia puede ser aún mayor si bajo la presencia de árboles o animales cerca.

Imagen 21. Colonización Biológica



Fuente: Icomos – Iscs: Glosario Ilustrado De Patrones De Deterioro De La Piedra En Edificaciones Y Monumentos, 2010

2.1.6 Humedad Y Tipología De Las Humedad

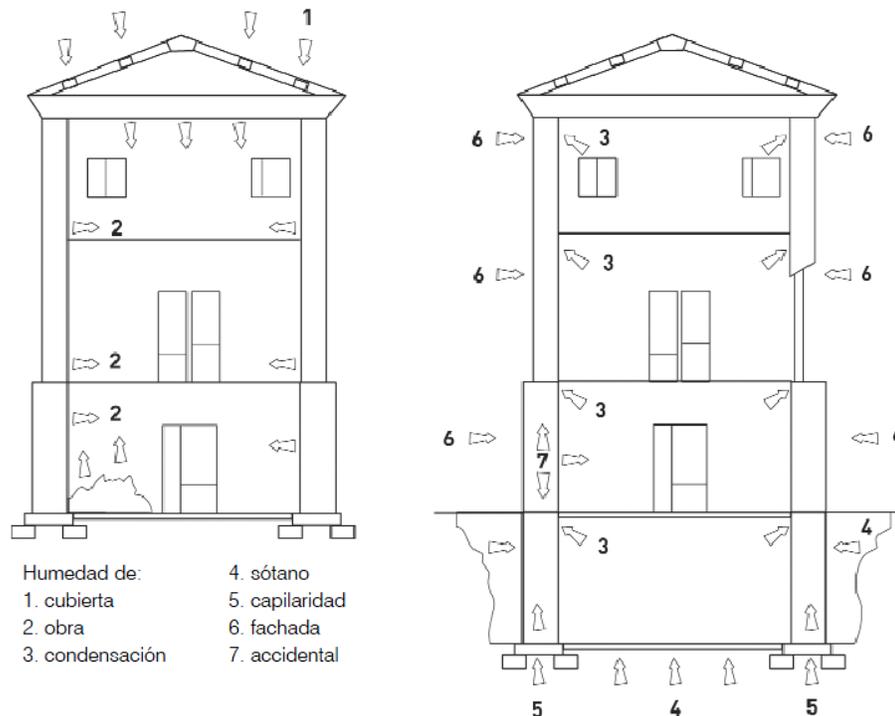
La humedad se puede definir como la presencia no deseada de agua en esta líquido en lugares o períodos de tiempo variables. La aparición de humedad provoca patologías bien conocidas, como descomposiciones o disgregaciones de los materiales sobre los que se forma, efectos antiestéticos o desagradables como (olores, manchas, cambios de color, etc.) o bien ambientales perjudiciales para la salud, pero en muchas ocasiones las humedades son también el origen de lesiones constructivas más grandes que pueden llegar a implicar un elevado riesgo.

Por ello es conveniente conocer bien algunas propiedades y características del agua y distintos tipos de humedades que pueden afectar a un edificio.

En la construcción de un edificio se utiliza una gran variedad de materiales, cada uno con características y capacidades de absorción de agua muy distintas. En función de la procedencia o de la manera de extenderse del agua se pueden distinguir los siguientes tipos de humedades:

- **De La Obra:** Debida al contenido residual de agua utilizada en los procesos constructivos y que no se haya evaporado, así como al agua que contienen los propios materiales.
- **Capilar:** el agua procede del terreno sobre el cual se encuentra el edificio y, por capilaridad asciende por los elementos que están en contacto con el terreno.
- **De Filtración:** Causada por la acción de la lluvia y el viento. El agua penetra a través de elementos constructivos.
- **De Condensación:** la condensación del aire puede dar lugar a la formación de gotas que cuando se van agregando llegan a formar núcleos húmedos. Este fenómeno se puede producir tanto en el interior como en el exterior del edificio.
- **Accidental:** la falta de mantenimiento de las instalaciones del edificio, el mal uso de las mismas o algún fallo puntual también pueden provocar humedades.

Imagen 22. Tipología de las Humedades



Fuente: Enciclopedia Broto de Patologías en la Construcción, 2005.

2.2 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

A continuación se presenta una recopilación de la historia de las murallas en general, concentrada en los baluartes a analizar. Acompañada a ésta, se presentarán parte de las conclusiones más significativas, los estudios más recientes sobre las condiciones de los baluartes y cortinas de las murallas.

2.2.1 Cronología y Descripción Arquitectónica

El cinturón de murallas y baluartes que rodean la zona histórica de la ciudad, además de su valor patrimonial, es el principal centro de las actividades en la ciudad, aquí se localizan actividades de gobierno a nivel Departamental y Distrital, así como de comercio, turismo, culturales y residenciales. Estas actividades aunque fundamentales, en algunas zonas han creando peligrosos desequilibrios por su saturación.

2.2.1.1 Evolución e Intervenciones sobre el Baluarte San Ignacio de Loyola

El Baluarte de San Ignacio de Loyola hace parte del proyecto general realizado por Bautista Antonelli en 1595. Trazado en 1602 y construido entre 1614 y 1616 por los Ingenieros Cristóbal de Roda y Francisco de Murga, también fue llamado Baluarte de los Moros. Su misión junto con el Baluarte de San Francisco Javier (Baluarte de los Cestones) era castigar cualquier intento de ataque contra el muelle de la contaduría (ubicado en la Bahía de las Ánimas) o contra las riberas del arrabal de Getsemaní.

En el año de 1639 se desata un conflicto entre los Jesuitas y el ingeniero Cristóbal de Roda, debido a que el trazado de éstas interfería con un solar que se le había asignado al grupo religioso para la construcción del Colegio de la Compañía de Jesús.

Roda intentó llegar a una propuesta intermedia, pero la muralla ya se encontraba construida de acuerdo a las exigencias de la defensa y protección de Cartagena, lo cual imposibilitaba modificar su trazado. Al llegar el ingeniero Francisco de Murga a la ciudad en 1629 se encontró aún con este conflicto y al parecer tantas fueron las presiones de los religiosos a la Corona, que el ingeniero y Gobernador Murga autorizó construir el convento ocupando

toda la fortificación y cimentando el muro exterior sobre la escarpa de la cortina de la muralla.

Fue entonces cuando el Ingeniero Juan de Somovilla y Tejada hizo una propuesta que protege el patrimonio religioso y construyen una nueva cortina de muralla más adelantada, que aunque no cumple con las obligadas reglas del Arte de la Fortificación y es técnicamente discutible, separa las funciones militares de la de los religiosos.

La propuesta es aceptada por la Corona, autorizando la construcción de una nueva muralla con camino intermedio que permita el paso de las fuerzas militares y la modificación de los dos baluartes adyacentes, San Ignacio y San Francisco Javier, a cambio de que la orden religiosa se haga cargo de los costes de la construcción. Debido a que este conflicto duró aproximadamente 30 años, se encontró relevancia en este evento al explicar y reconocer una diferencia sustancial de tiempo entre los materiales y las labores constructivas dentro de la misma unidad tipológica.

En el año 1910 se inició la demolición de la cortina entre el Baluarte San Ignacio y San Francisco, pues se considerada innecesaria y además estrechaba el patio del antiguo colegio de la Compañía (después hospital San Juan de Dios y hoy Museo Naval), donde funcionaba el cuartel en que se alojaba el batallón Sucre. Y en cercanías del próximo centenario de la Declaración de Independencia absoluta en 1911 el comandante en jefe, General Francisco Burgos Rubio concibió la idea de que una vez demolida, honrar a la patria erigiendo con los sillares de la muralla destruida un Monumento a la Bandera, sobre el Baluarte de San Ignacio.

Para el año de 1969 Juan Manuel Zapatero hace el reconocimiento de este Baluarte diciendo lo siguiente: “...Es el San Ignacio el baluarte de más prestancia y casi el de más importancia de todo el recinto. Obra de Herrera y Sotomayor que lo levantó a partir de 1721, sobre la anterior fábrica de Roda y Murga (siglo XVIII), es un Baluarte irregular, de caras excesivamente prolongadas y de flancos relativamente cortos, con merlones romos, característicos de las obras realizadas por este ingeniero. En el ángulo capital se encuentra la garita-cuerpo de guardia, precioso ejemplar de arquitectura militar del siglo

XVIII. Faltan los merlones suprimidos posiblemente para dar “vistosidad” al monumento levantado en la semigola del Baluarte.”

Para su intervención Juan Manuel Zapatero Plantea:

- 1. La reconstrucción de los merlones que faltan en las caras y flancos, de los que quedan testigos que facilitaría la reconstrucción.*
- 2. En la semigola se ha levantado el Monumento a la Bandera, sin duda de acertado y feliz simbolismo, pero de inadecuada situación dentro del Baluarte. Desde el Punto de vista de un estudio técnico histórico como el del presente Estudio Asesor se considera que este monumento debería ser trasladado a otro lugar más apropiado, e incluso con otra idea artística que permita recuperar esa preciosa serie de cañones de antigua y nueva ordenanza que están sirviendo de pretexto de adorno y que serían de extrema utilidad en la instalación museográfica que se esboza en este estudio.*
- 3. Reconstrucción de la Gola del Baluarte una vez desaparecido el monumento, conforme a la traza técnica de estas piezas y de las que existen ejemplos en el baluarte del recinto. El pináculo de la baranda del pasamanos de la rampa, aparece encima del parapeto de la cortina entre los baluartes de San Ignacio y San Francisco Javier, dando lugar a erróneas opiniones como la de considerarlo como el antiguo amarre de embarcaciones.*

La restauración de este baluarte se realizó en el año 1971, de acuerdo a las recomendaciones del Asesor Juan Manuel Zapatero, se restituyó el tendal, se desmontó el Monumento a la Bandera, se restituyeron y ambientaron los merlones con la colocación de cañones en las troneras recuperadas, se recuperó el solado y la rampa de acceso.

En la Tabla 1 se resumen los eventos principales anteriormente mencionados.

Tabla 1. Evolución Histórica del Baluarte del San Ignacio

| AÑO | EVENTO |
|-----------|---|
| 1595 | Se plantea inicialmente dentro del proyecto general de la plaza por el ingeniero Militar Bautista Antonelli |
| 1620-1630 | Ingenieros Cristóbal de Roda y Francisco de Murga (Obra Primera) |
| 1656 | Diseño de adelantamiento de Juan de Somovilla y Tejada |
| 1667 | Construcción de adelantamiento Juan de Somovilla y Juan Bettin |
| 1718 | Intervención de Juan Herrera y Sotomayor |
| 1889-1951 | Obras de construcción del ferrocarril. Generación de retiro del cuerpo de agua del baluarte |
| 1910 | Demolición parcial de la cortina |
| 1911 | Construcción del Monumento a la Bandera sobre su explanada |
| 1969 | Reconocimiento y recomendaciones de Juan Manuel Zapatero para sus restauración |
| 1971 | Obras de recuperación y adoquinamiento de la Calle de la Ronda. Consolidación de la cortina por Juan Manuel Zapatero. |
| 1958 | Construcción de Avenida Venezuela |
| 1986 | Intervención del Baluarte de San Francisco Javier y señalización a nivel de piso de la cortina demolida |
| 2005 | Construcción de vías para la operación del sistema integrado de transporte masivo |
| 2007 | Reconstrucción del muelle de La Bodeguita |

Fuente: Cabellos, 2003; Herrera Diaz, 2009; el Autor.

2.2.1.2 Evolución e Intervenciones sobre la cortina entre el Baluarte San Juan Evangelista y San Ignacio de Loyola.

Por su parte la cortina entre el Baluarte San Juan Evangelista y San Ignacio de Loyola, se remonta a 1571 cuando el Gobernador Pedro Fernández de Bustos ante la insuficiencia del muelle viejo para el tráfico del puerto, escribió al rey la conveniencia de construir un pretil de cal y canto que uniera al muelle viejo con el nuevo. Esta obra permitió la construcción de “2 tambores circulares unidos por una muralla en ángulo según directrices de los

ingenieros italianos traídos por Carlos V, de influencia medieval tardía y que todavía muy lejos de los sistemas abaluartados” (Cabellos Barriero, 1991).

Según Marco Dorta, en 1580 se establece la posibilidad de la ya existencia de un edificio para la aduana.

El plano del Ingeniero Cristóbal de Roda, la plaza tiene forma trapezoidal, debido al ángulo que forma la muralla a la cual se adosa el edificio de las Casas Reales, pero no se construyó en esta forma. La muralla se hizo recta entre los Baluartes San Juan Bautista y San Ignacio, adoptando la misma disposición del edificio de la aduana y conservando así la plaza su forma triangular, tal como la tuvo en principio y la tiene hoy.

En 1688 Francisco Ficardo, elabora el plano de reconstrucción de la muralla destruida por causa de temporales y la construcción de Getsemaní, en este plano se destaca la presencia de la plataforma rectangular y paralela a la cortina de la muralla entre los baluartes de San Ignacio y San Juan Bautista hoy en el Muelle de la Contaduría.

En 1887 se construyó una nueva puerta por el visitador fiscal D, simón G de Piñeres (según lápida en mármol adosada a la pared).

Posteriormente se demolió el muelle y se dio al servicio una vía que corría paralela desde el Baluarte de San Pedro Mártir hasta la entrada de Bocagrande, donde se hizo una rotonda y se colocó en su centro una escultura conmemorativa al General Santander, protagonista importante de la historia de nuestro país.

En 1969 Juan Manuel Zapatero, hace las siguientes recomendaciones sobre este baluarte: *“Estas bellas obras en su fábrica se conservan bastante bien, salvo la puerta abierta a fines del siglo pasado, presentan más que otros sectores probablemente, la extrema necesidad de su cuidado y adecentamiento, pues son las primeras que ve el visitante que acude a conocer la ciudad.”*

“El cuerpo perfecto en sus escarpas y contramurallas está bien, solamente el adarve de la cortina presenta levantado el solado por arbustos y matojos que crecen y son suprimidos.

La estampa del adarve es única, dan a él las ventana enrejadas de la Contaduría y aun están los respiraderos de las naves bajas.”

Entre las recomendaciones que presenta el asesor Juan Manuel Zapatero para su restauración señala las siguientes:

1. *Solar, nuevamente el adarve de la cortina.*
2. *La supresión de la nueva Puerta de Piñeres, probablemente provocaría trastornos en las comunicaciones de la ciudad, pera la observación se hace obligada ante un proteico de recuperación artística de Cartagena, ... suprimir los arbustos que han crecido en el adarve y los escasos árboles que aparecen junto al escarpado dando cobijo a puestos de barberías ambulantes, limpiabotas, etc., que ocupan los glacis y causan lamentable impresión, se procedería a sembrar de césped los cortos glacis y colocar en ellos rótulos y diales que ilustren a los visitantes sobre la importancia del recinto ante el que se encuentran.*

A finales del siglo XX se cerró la Boca Piñeres y se dio al servicio para oficinas de la alcaldía de Cartagena de Indias. Según estos registros el tramo no representó daños o modificaciones notables a su estructura, pero si en su uso. En las recomendaciones realizadas por Zapatero se denota la presencia de un ambiente arborizado alrededor de este tramo, ambiente que todavía se mantiene parcialmente.

En la tabla 2, se resumen los eventos principales anteriormente mencionados.

Tabla 2. Evolución Histórica de la cortina entre el Baluarte San Juan Evangelista y San Ignacio

| AÑOS | EVENTO |
|-----------|--|
| 1571 | Se inicia la construcción de un pretil que unía el muelle nuevo con el viejo, el cual consistía en 2 tambores circulares unidos por una muralla en ángulo. |
| 1595 | Se plantea inicialmente el trazado dentro del Proyecto General de la plaza por el Ingeniero Militar Bautista Antonelli. |
| 1620-1630 | Inician su construcción los ingenieros Cristóbal de Roda y Francisco de Murga (Obra Primera). |
| 1718 | Finalización de las obras de construcción por el Ing. Juan de Herrera y Sotomayor |
| 1887 | Construcción de la Puerta Piñeres |
| 1889-1951 | Obras de construcción del ferrocarril. Generación de retiro del cuerpo de agua del baluarte |
| 1969 | Reconocimiento y recomendaciones de Juan Manuel Zapatero para su restauración. |
| 1971 | Obras de restauración recomendadas por Juan Manuel Zapatero. |
| 1992 | Intervención en el solado modificando sus materiales y niveles e instalación de ductos y equipos de aire acondicionado - Alcaldía de Cartagena de Indias |
| 2005 | Construcción de vías para la operación del sistema integrado de transporte masivo en el año |
| 2009 | Intervención en el solado-alcaldía de Cartagena |

Fuente: Cabellos, 2003; Herrera Díaz, 2009; el Autor.

2.2.1.3 Uso actual del Baluarte San Ignacio y la Cortina entre éste y el Baluarte de San Juan Evangelista.

Actualmente el “Manual de uso temporal y aprovechamiento económico del espacio público de las murallas del Centro Histórico de Cartagena de Indias, bien de interés cultural del ámbito nacional e inscrito en la Lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO”, reconoce al Baluarte San Ignacio de Loyola como de uso institucional, comercial y turístico.

2.2.2 Informe de Patología Estructural: Baluarte de San Ignacio (2003)

Durante este estudio efectuado por el ingeniero Jorge Rocha en el 2003 se reconocieron por primera las patologías y deterioros presentes en el material pétreo del Baluarte de San Ignacio. Se tuvo como objetivo principal el diagnosticar y presentar recomendaciones para la preservación del monumento, basando su metodología en un reconocimiento visual por parte de un equipo de profesionales especializados en restauración e ingeniería estructural.

Como resultado de este trabajo se logro una descripción de todas las alteraciones detectadas sobre la estructura, las cuales se presentan a continuación:

- ❖ Pérdida total en bloques de piedra caliza.
- ❖ Perdida de juntas en argamasa.
- ❖ Deterioro plataforma
- ❖ Pérdida drenajes originales.
- ❖ Fracturas en el lienzo.
- ❖ Asentamiento de la escarpa externa.
- ❖ Erosión de superficie-porosidad superficial.
- ❖ Deterioro sillares de remates de las escarpas externas
- ❖ Afectación visual por elementos electromecánicos.

Se llego a la conclusión que las condiciones que generaban o fomentaban el deterioro eran:

- a) Corrosión de piedra calcárea y caliza.
- b) Agresión mecánica o de impacto
- c) Disolución por escorrentía superficial
- d) Impacto del viento
- e) Perdida de piedra caliza
- f) Fracturas en Estructura Pétreo.
- g) Perdida de Juntas
- h) Deterioro Piso Plataformas

- i) Perdida Drenajes Originales
- j) Porosidad Superficial
- k) Desestabilización y Pérdida Sillares.
- l) Deterioro Librillo de Remate
- m) Asentamiento de la Escarpa Externa del Baluarte San Ignacio
- n) Instalación de equipos de en el Edificio de la alcaldía a través de la muralla.

Durante se concluyo además que era necesario intervenir la estructura pues esta no presentaba deterioros prominentes y presento como recomendaciones de restauración tales como la restitución de sillares y argamasa, la limpieza de los capas vegetales y la restitución de los sistemas de drenaje.

A pesar de que este estudio logro una descripción detallada de las condiciones físicas del baluarte, los análisis y conclusiones solo están referidos a una apreciación subjetiva del estado del material por parte del un equipo de trabajo, quedaron dudas sobre la veracidad e relevancia que los orígenes planteados tienen sobre la estructura.

Por otra parte, por la naturaleza de la investigación esta solo considero patologías a nivel que estructural de origen mecánico, dejando a un lado otras patologías de origen ambiental que pudiesen generar alteraciones en la roca.

2.2.3 Estudio fisicoquímico del deterioro del material pétreo estructural antiguo de las murallas de Cartagena De Indias-Colombia (Baluarte De Santiago) en el 2007

Fue la primera vez que se reportan daños analíticos para evidenciar por diferentes técnicas espectroscópicas el deterioro del material pétreo constituyente de los monumentos históricos. Se utilizaron fluorescencia de rayos X, análisis de cloruros, análisis termogravimétricos, espectrometría IR, difracción de rayos X, microscopia electrónica de transmisión y microscopía de barrido electrónico.

Se pudo comprobar que la dureza no tiene relación con la cinética de descomposición de las rocas.

Con técnicas de Difracción de Rayos X se determinó que el estado mineral en que se encuentra la roca es el CaCO_3 el cual es el constituyente de las *calcita*, siendo según los autores uno de aporte mineralógico muy importante del proyecto, dado ya que para el entonces no se reportaba información bibliografía científica respecto a las rocas nativas de la ciudad de Cartagena y sus alrededores.

El estudio apreció una disminución en el contenido de CaO del 3.08% para la piedra antigua de las murallas en relación a la piedra del malecón, la cual obtuvo el valor más alto, condición que estaría de acuerdo con un grado de deterioro leve, por otra parte el factor más agravante resultó ser el contenido de azufre y cloruros en un 0.023% y 527ppm, respectivamente, que provocan la lixiviación del material cementante y generación de oquedades en forma de cráteres que facilitan la posterior pulverización y caída de la roca; además se evidenció una estabilidad térmica intermedia por parte de la roca antigua constituyente de las murallas, en una reacción de descomposición con respecto a las rocas no intemperizadas, lo cual es muy bueno para nuestro monumento, debido a que en la ciudad de Cartagena las temperaturas son relativamente altas.

Se estableció que en el entorno natural del monumento es un factor de deterioro constante e inmodificable se asumiéndose ser el responsable de un alto deterioro y de las oquedades en forma de cráteres en las murallas

En el estudio, se reconoció un grado de deterioro de las murallas de Cartagena en el baluarte de Santiago en una escala de *III-Moderadamente Deteriorada*, según la escala de deterioro o alteración de D.G Moye, basado en los criterios de reconocimiento como lo son: presencia de manchas amarillentas, costras negras y resistencia mecánica variable en diferentes partes del monumento; también se determinó un grado de meteorización según los parámetros de Deere y Patton de *débilmente meteorizada*, debido a la pérdida de color

original por parte de la superficie, fracturas de algunos milímetros o centímetros hacia el interior de la roca, entre otros.

Si bien, este estudio logró una visión detallada tanto a nivel descriptivo como experimental del grado de deterioro del material pétreo, se vio limitado por la utilización de escalas para determinación del grado de deterioro que por propia definición de las mismas está basada en una apreciación muy subjetiva del estado del sillar. Tanto la escala de D.G Moye como la de Deere y Patton, resaltan características cualitativas de la piedra que pueden verse afectadas por factores climáticos presentes en el día de la inspección y otros factores no al parecer no fueron tenidos en cuenta dentro de determinación de las mismas.

Por otra parte, las técnicas espectroscópicas utilizadas para analizar el deterioro del material pétreo constituyente de los monumentos históricos se basaron en muestras de piedras que se encontraban en estados extremos de deterioro y que estaban siendo remplazadas en el momento del inicio de la investigación. De los estudios técnicos de restauración y las imágenes fotográficas consolidadas, se puede apreciar que la condición de deterioro que motivo al cambio de estos sillares no homogénea dentro de la unidad de intervención.

2.2.4 Diagnóstico del sistema de Drenaje y de los Factores Ambientales y Climáticos en la Restauración de los Lienzos de Muralla en la ciudad de Cartagena

El presente estudio contempló el diagnóstico del estado actual del sistema de drenaje, y el análisis de las variables ambientales en relación con las estructuras de muralla de la ciudad de Cartagena Colombia conocidas como: La Cortina entre el Baluarte de Francisco Javier y Baluarte de San Ignacio, Baluarte de San Ignacio, Cortina entre el Baluarte de San Ignacio y San Juan Evangelista, Baluarte de San Juan Evangelista, Cortina de la Boca del Puente o Torre del Reloj, Baluarte de San Pedro Mártir, Cortina entre el Baluarte de San Pedro Mártir y San Lucas y sus áreas de influencia.

Se evaluó la influencia del drenaje sobre el grado de disolución de los sillares y la argamasa y se establecieron recomendaciones relacionadas con el drenaje del terraplén con el fin de

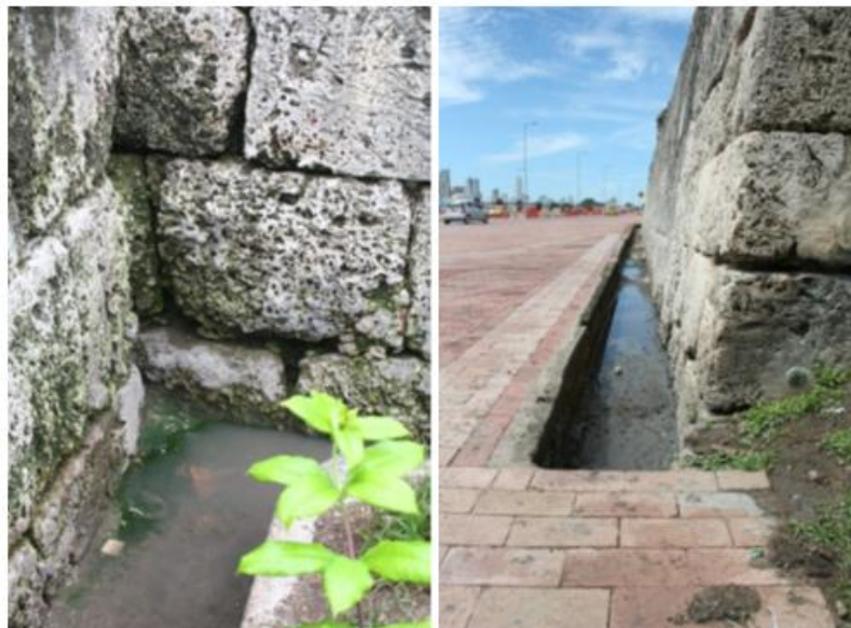
reducir la incidencia del agua de escorrentía sobre el lienzo de muralla. Asimismo, se realizó un el levantamiento detallado de los sistemas de drenaje del terraplén y las descargas sobre la muralla.

Se estableció la influencia ambiental y climatológica sobre el comportamiento y curvas de deterioro de los elementos de la muralla; para el efecto, se realizó un estudio de las componentes atmosféricas, pluviométricas y climáticas y se analizaron los registros pluviométricos, de viento, temperatura, entre otros disponibles en el IDEAM.

Del mismo modo se realizaron estudios sobre agua lluvia colectada en el sitio, se estableció la cantidad de contaminantes, el pH y análisis químicos.

Del inventario realizado al sistema de drenaje se estableció un total de 67 tipos drenajes, de los cuales se encuentra funcionando correctamente cerca del 60%. También se observaron entre las principales causas de mal funcionamiento, la falta de mantenimiento y derrumbes internos, presencia de vegetación y residuos sólidos, sedimentos acumulados, corrosión, pendientes invertidas y específicamente en los drenajes de pie de muralla (DPM) se observo que muchos de ellos tienen las salidas obstruidas, por lo que las aguas permanecen estancadas causando malos olores y proliferación de microorganismos.

Imagen 23. Estancamiento de aguas. Baluarte de San Ignacio.



Fuente: Universidad Externado del Colombia, 2009

2.2.4.1 Efecto Del Agua

Se concluyó que de no ser presentarse el efecto ácido causado por la contaminación, las aguas lluvias no incidirían en el deterioro de los materiales. Se determinó que la influencia de las aguas lluvias sobre el grado de disolución los sillares y argamasas es mínimo, pero detectable en largos periodos de tiempo.

Asimismo este estudio determinó que la composición fisicoquímica del agua no proporcionaba condiciones agresivas pero que podrían tener repercusiones a largo plazo, cabe mencionar que del mismo estudio climático realizado por los autores se concluyó era necesario analizar las primeras lluvias de los periodos de invierno, pues son estas las que contienen mayores concentraciones de contaminantes y así evaluar la incidencia que podrían tener sobre el deterioro de los lienzos de muralla.

Se determinó a su vez, que los bajos niveles de DBO_5 registrados en las aguas freáticas que están en contacto con los cimientos de muralla imposibilitan la proliferación de grandes

cantidades de microorganismos y su acidez no representa una amenaza al material pétreo. Sin embargo, de estos análisis fisicoquímicos se considero que los altos contenidos de Cl⁻ pueden ser estos son los principales responsables del deterioro encontrado en los materiales pétreos.

Es preciso mencionar que queda incertidumbre del análisis de la calidad del agua freática, debido a que antes de tomar la muestra del cuerpo de agua, el mismo ya había tenido contacto con la atmósfera. Sin embargo el bajo valor de DBO₅ fue considerado como un elemento de juicio significativo para apoyar las teorías mencionadas.

2.2.4.2 Efecto Climatológico

Durante este estudio se evaluaron como las condiciones climatológicas y ambientales pueden afectar los materiales que componen la muralla, para ello se utilizo los registros climatológicos tomados hasta el 2004, por la estación de monitoreo meteorológico ubicada en el Aeropuerto Rafael Núñez, estando esta ultima ubicada a tan solo cuatro (4) kilómetros de distancia del área de influencia de las unidades de intervención.

Como producto de este estudio se determinó que la mayor fuente de contaminación atmosférica en el sector amurallado es al tráfico automotor que circula alrededor y que las emisiones generadas por este no son lo suficientemente altas como para causar una atmósfera agresiva o corrosiva para proporcionar el deterioro de los elementos de murallas (Quiñones & Martinez Batista, 2008).

Como parte de este estudio, se realizo un muestreo de los depósitos salinos sobre el material pétreo, aunque viéndose restringido debido a que solo se realizaron análisis de salinidad en un solo período, y no se logro establecer el grado de afectación por no contar con una segunda información que sirviera de referencia.

2.2.5 Estudios sobre efecto de la salinidad sobre materiales pétreos

Según los estudios del Grossp & Esbert (1994) las sales solubles más frecuentes en monumentos son los **sulfatos** y los **cloruros** seguidos de los **carbonates**, **nitratos** y, más raramente, **nitritos**. Los cationes más frecuentes son, por lo general, **calcio**, **sodio**, **magnesio** y **potasio** (en orden decreciente de frecuencia) (Lazzarini y Laurenzi-Tabasso, 1986). Pueden ser también frecuentes entre los aniones los **oxalatos** y, entre los cationes, el **amonio** (Arnold y Zehnder, 1989).

Asimismo según Grossp & Esbert las sales solubles en los edificios, en general, y en los monumentos en particular proceden generalmente de:

- a) Iones lixiviados de la alteración de rocas, morteros, ladrillos y otros materiales de construcción:

Las piedras de construcción (tanto natural como artificial), así como los morteros de unión, generalmente contienen sales solubles que actúan como agentes alterantes. Algunos materiales usados en la preparación de morteros pueden contener pequeñas cantidades de **sulfatos** que pueden disolverse en el agua y migrar hacia la superficie formando eflorescencias. El uso de yeso en restauraciones también puede dar lugar a la aparición de sulfatos. Se ha descubierto que la calcita (CaCO_3) también puede reaccionar con el SO_2 atmosférico en ambientes contaminados y dar lugar a la formación de yeso que cristaliza con dos moléculas de agua ($\text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

La disolución de la calcita (CaCO_3) de las calizas es una fuente importante de iones Ca^{+2} y CO_3^{-2} . El **carbonato** de calcio es prácticamente insoluble en agua, sin embargo, puede disolverse como bicarbonato cuando el agua, en contacto con la piedra, contiene una cantidad determinada de CO_2 , procedente de la atmósfera, principalmente en zonas industriales. Este CO_2 se disuelve en el agua y forma ácido carbónico (H_2CO_3) que reacciona con el carbonato formando un bicarbonato, más soluble

Cuando un muro comienza a secarse, las sales de bicarbonato migran hacia la superficie y cuando tiene lugar la evaporación, se produce la formación de carbonato cálcico,

prácticamente insoluble, que se deposita rápidamente sobre la misma (Press y Siever, 1985; Teutónico, 1988).

Los **cloruros**, también pueden ser el resultado de impurezas en los materiales utilizados para preparar morteros y estucos.

b) El Suelo

Las aguas procedentes del suelo y que ascienden por las paredes de los edificios por capilaridad son, por lo general, soluciones salinas más o menos diluidas y contienen iones carbonato, sulfato, cloruro, nitrato, magnesio, calcio, sodio, potasio, y amonio.

c) Depósitos de Productos Atmosféricos: Aspersión Marina y Ambientes Contaminados

En la atmósfera, contaminada o no, pueden existir sales en suspensión o pueden estar presentes iones capaces de formar sales solubles.

Las sales marinas, mediante movimientos atmosféricos, pueden aparecer lejos de su origen y la cantidad de estas sales disminuye con la distancia al océano. La concentración de estas sales puede disminuir debido al agua de lluvia, dado que puede haber una eliminación parcial o total de las sales marinas de acuerdo con la solubilidad de las mismas.

Los estudios realizados por Keys y Williams (1981) demostraron que el ion Cl^- tiende a disminuir con la distancia al mar; y es esencialmente de origen marino debido que es el más abundante en el mar y poco abundante en las rocas. Los nitratos también los consideran de procedencia principalmente marina, vía aerosoles. El aumento de iones NO_3^- con la lejanía del mar, lo explican en base al aumento en la relación entre óxidos de nitrógeno y amoníaco debido, en parte, a la oxidación de este último, que es principalmente de origen marino.

Los contaminantes ambientales que pueden encontrarse en los depósitos, pueden proceder de gases tales como CO_2 , SO_2 , N_2O_3 , NO_2 , NH_3 , CH_4 ..., líquidos (ácidos, soluciones

salinas, etc.) o ser contaminantes sólidos, como óxidos de minerales metálicos, sulfuros, hollín, etc. Estos depósitos son la fuente principal de los **sulfatos**.

El efecto mejor conocido es la formación de costras negras de yeso en los edificios a partir del dióxido de azufre, ácido sulfúrico y sulfatos (Arnold y Zehnder, 1989) El yeso se puede formar en el aire y llegar como aerosol o sal a la superficie de los monumentos, o directamente sobre las piedras calcáreas por reacción del carbonato cálcico y el ácido sulfúrico. Del mismo modo la presencia de sulfatos en el ambiente se relaciona con la presencia de H_2SO_4 , el cual también es formado en el aire por la contaminación ambiental y que por su tendencia a neutralizarse con el material calcáreo de las murallas, puede llegar a causar meteorización química.

d) Acción de Microorganismos

La acción de los seres vivos puede ser una fuente importante de iones. Así, por ejemplo, las zonas habitadas por humanos pueden ser ricas en cloruros y nitratos; hay cloruros en la comida y excrementos de hombres y animales. Los microorganismos producen nitratos a partir de excrementos y residuos. De todos modos, así como los nitratos tienen una clara fuente biológica, ésta no es tan segura para los cloruros (Arnold y Zehnder, 1989).

Los sulfatos también pueden tener un origen microbiológico. Hay algunos microorganismos capaces de metabolizar formas reducidas del azufre y oxidarlas a sulfatos, así como otros capaces de producir sulfuros. Estos organismos están a menudo presentes en piedras, principalmente calcáreas y en morteros a base de carbonato de calcio (Teutónico, 1988).

2.2.6 Deterioro en los monumentos debido a las sales solubles

Se ha establecido que la cristalización de sales solubles en los poros de los materiales es a menudo una causa importante de su deterioro. El efecto de la cristalización de sales solubles es debido a una combinación de factores entre los que cabe citar, por una parte, el

tipo y propiedades de sal (cambios de solubilidad con la temperatura, coeficiente de expansión térmica...), su concentración y el grado de sobresaturación alcanzado; y por otra parte, las propiedades del material rocoso como el tamaño y distribución de los espacios vacíos u otras discontinuidades, la capacidad de absorción de agua, la resistencia mecánica, etc. (GOUDI, COOKE, & EVANS, 1970).

La mayoría de los autores consideran la existencia de una serie de mecanismos de distinta naturaleza, tales como:

La cristalización. Las sales cristalizan a partir de una solución sobresaturada. Esta cristalización puede continuar incluso frente a presiones considerables de confinamiento.

El empuje del cristal al crecer en un poro o fisura produce tensiones locales que tienden a agrandar dichos espacios vacíos. El deterioro se produce cuando las tensiones superan la resistencia a la tracción de la roca. La cristalización continúa hasta que el esfuerzo alcanza una magnitud determinada relacionada directamente con el grado de sobresaturación e inversamente con la solubilidad de la sal (EVANS, 1970).

El exceso de presión ΔP , fue calculado por Wellman y Willson (1968) correlacionando las dimensiones de los poros, bajo la ecuación:

$$\Delta P = 2\sigma \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde σ es la tensión de interface entre la solución en y el crecimiento del cristal (en Mpa); r es el radio de los poros pequeños y R es el radio de los poros grandes, siendo ambas medidas tomadas en metros (m). Esta ecuación sugiere que la presión desarrollada por el crecimiento del cristal es más alta en los poros pequeños que la desarrollada por los poros grandes.

Para simplificar la ecuación el valor de $1/R$ se elimino introduciendo un pequeño error, y se tomo la tensión de interface del NaCl calculada por Rodríguez-Navarro y Dohene como $\sigma = 8.35 Pa$.

Para calcular la presión de cristalización efectiva que puede alcanzar la sal en la roca, fue necesario considerar el porcentaje de poros de cada clase V_r en relación con el porcentaje de poros gruesos. V_r/V_R para la máxima presión de cristalización de cada clase. La presión total (tensión) que soportara la roca cuando el NaCl se cristalice es la suma de la presión efectiva en cada clase de poro. Una vez calculado este valor se debe comparar con la tensión soportada por cada roca.

La hidratación. Existen sales que pueden presentar diferentes estados de hidratación (ej.: $MgSO_4 \cdot H_2O$; $MgSO_4 \cdot 6H_2O$; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$). Estas sales, una vez cristalizadas al variar las condiciones de humedad y temperatura, pueden tomar o liberar agua de hidratación.

Cuando se hidratan pueden desarrollar presiones en las paredes de los poros que pueden conducir al deterioro de la piedra que las contiene.

Tabla 3. Presiones de hidratación (atm) para algunas sales solubles a distintas temperaturas y humedades relativas

| HR (%) | Temperatura (°C) | | | |
|--|------------------|------|------|-----|
| Basanita ($CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$) a yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) | | | | |
| | 0 | 20 | 40 | 60 |
| 100 | 2190 | 1755 | 1350 | 926 |
| 90 | 2000 | 1571 | 1158 | 724 |
| 80 | 1820 | 1372 | 941 | 511 |
| 70 | 1600 | 1145 | 702 | 254 |
| 60 | 1375 | 884 | 422 | |
| 50 | 1072 | 575 | 88 | |

Fuente: Arnold y Zehnder, 1990

Otra causa de deterioro, relacionada, en parte, con la hidratación-deshidratación es la citada por Pühringer (1983): son *cambios estructurales en la sal*. Las sales depositadas no son

cristales ideales, son formaciones salinas de textura porosa fina. En estas formaciones salinas pueden producirse cambios estructurales (que pueden ser debidos a hidratación y deshidratación parcial) debidos a cambios en las condiciones de humedad y temperatura, que pueden conducir a la ruptura del material del substrato. El deterioro de las piedras por sales, aparte de poder ser una combinación de estos mecanismos, suele ser un proceso cíclico. Se necesitan, por lo general, varios ciclos de cristalización-disolución o hidratación-deshidratación para que la roca se deteriore (AMOROSO & FASSINA, 1983).

Los daños ocasionados por los distintos tipos de sales y su distribución en las obras:

Sulfatos: Los más frecuentes son el $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y el Na_2SO_4 con diferentes estados de hidratación (AMOROSO & FASSINA, 1983); menos frecuentes son el MgSO_4 y K_2SO_4 . Según Amoroso y Fassina, el daño producido por los sulfatos no es debido a su solubilidad en agua, sino a su propiedad de cristalizar en diferentes estados de hidratación ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$: mirabilita- Na_2SO_4 : thenardita; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: epsomita – $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$: kieserita; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: yeso – CaSO_4 : anhidrita). Estas sales pueden presentarse en estado anhidro o hidratado dependiendo de las condiciones de temperatura y de humedad relativa. Cada estado de hidratación está caracterizado por un volumen específico, por tanto cada vez que se produce una transformación, tiene lugar un cambio de volumen. Los sulfatos son en general menos solubles y móviles que otras sales, solamente pueden moverse cuando aún están en disolución. Precipitan en forma hidratada y posteriormente pueden transformarse en sales anhidras.

Si una vez anhidras, la humedad no es muy alta, las sales no se disuelven, sino que se hidratan, ejerciendo una presión en las paredes de los poros.

Según Winkler y Wilhelm (1970), la hidratación del sulfato de magnesio monohidrato (kieserita) a heptahidrato (epsomita) puede producirse en un solo día; y la hidratación y deshidratación del sulfato de sodio puede producirse varias veces al día causando que bajas presiones de hidratación afecten a la roca de manera importante. La deshidratación de la

mirabilia a 39°C no dura más de 20 minutos; sin embargo la hidratación es un proceso más lento (ARNOLD, 1976).

Carbonatos: El más importante es el carbonato de sodio. Forma dos hidratos diferentes: $\text{Na}_2\text{SO}_4 + 10\text{H}_2\text{O}$ (natritra) y $\text{Na}_2\text{CO}_3, \text{H}_2\text{O}$ (termonatrita). A temperaturas por debajo de 32°C precipita como decahidrato. El comportamiento de esta sal es similar a la del sulfato de sodio y el deterioro producido también puede ser similar (Arnold, 1976; Amoroso & Fassina, 1983).

Cloruros: Los más comunes son el NaCl (halita), KCl (silvita) y $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (antárticita) (AMOROSO & FASSINA, 1983). Según estos autores son extremadamente peligrosos, ya que son muy solubles e higroscópicos. En solución son muy móviles y pueden penetrar profundamente. Su acción agresiva es debida principalmente a la cristalización y la forma de alteración predominante es la pulverización.

Es necesario aclarar, que los procesos de hidratación y cristalización van acompañados por procesos implícitos de precipitación de la sales. En la tabla 4, se muestran las humedades relativas de precipitación de las sales más comunes en los monumentos.

Tabla 4. Humedades relativas de precipitación para las sales

| Sal | 0°C | 5°C | 10°C | 15°C | 20°C | 25°C | 30°C |
|-----------------|--|------|------|------|------|------|------|
| Antárticita | CaCl ₂ ·6H ₂ O | 41.0 | 37.7 | 33.7 | 30.8 | 28.6 | 22.4 |
| Bischofita | MgCl ₂ ·6H ₂ O | 33.7 | 33.6 | 33.5 | 33.3 | 33.1 | 32.4 |
| Nitrocalcita | Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O | 59.0 | 59.6 | 56.5 | 54.0 | 53.6 | 46.8 |
| Nitromagnesita | Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | 60.4 | 58.9 | 57.4 | 55.9 | 54.4 | 51.4 |
| Nitro amónico | NH ₄ NO ₃ | | | | | 61.8 | |
| Nitratita | NaNO ₃ | | 78.6 | 77.5 | 76.5 | 75.4 | 73.1 |
| Halita | NaCl | 75.5 | 75.7 | 75.7 | 75.6 | 75.5 | 75.1 |
| Thenardita | Na ₂ SO ₄ | | | | | 82.0 | 84.3 |
| Silvita | KCl | 88.6 | 87.7 | 86.8 | 85.9 | 85.1 | 83.6 |
| Epsomita | MgSO ₄ ·7H ₂ O | | | 86.9 | | 90.1 | 88.0 |
| Natrón | Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O | | | | 96.5 | 97.9 | 83.2 |
| Miralbita | Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O | | | | 95.2 | 93.6 | 87.9 |
| Nitro (salitre) | KNO ₃ | 96.3 | 96.3 | 96.0 | 95.4 | 94.6 | 92.3 |

Fuente: Arnold y Zehnder, 1990

En cuanto al grado de alteración inducido por las distintas sales, Lewin (1989) señala que para un deterioro por sales se necesita una tendencia a la sobresaturación: "un soluto depositado bajo condiciones de equilibrio no libera ninguna energía y no ejerce trabajo mecánico".

Como la mayoría de los estudios de laboratorio con sales solubles son con sulfato de sodio y magnesio y cloruro de sodio, la mayoría de los autores encuentran que la sal más dañina es el sulfato de sodio; seguida en importancia por el sulfato de magnesio y el cloruro de sodio respectivamente (Alcalde & Martín, 1990; Smith & McGreevy, 1988); aunque debe tenerse en cuenta que el cloruro de sodio es importante en el deterioro de monumentos en zonas desérticas y ambientes marinos.

3 METODOLOGÍA

La investigación realizada fue de tipo descriptiva y orientada a diagnosticar el deterioro producido por el ambiente húmedo y salino en la ciudad de Cartagena, al lienzo de la muralla. Para tal efecto se ejecutó un *análisis in situ del escenario* que rodea la estructura (condiciones meteorológicas y efectos de la contaminación), *un análisis de la construcción* (sistema constructivo, uso actual del elemento y sus intervenciones) y una *evaluación del estado de la roca* (caracterización del material y evaluación de las lesiones presentes). A partir de lo anterior se plantearon recomendaciones para la prevención y/o mitigación de los daños encontrados.

3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Durante esta etapa se recopiló la información secundaria necesaria para el desarrollo del diagnóstico. Se utilizaron los estudios publicados por la Universidad de Cartagena, la Sociedad de Mejoras Públicas de la ciudad de Cartagena y la bibliografía local, de ellos se obtuvieron:

- Los Levantamientos Topográficos del sector.
- Documentación fotográfica de los estudios de patología del material y estudios ambientales de años anteriores
- Estudios de Patología del Cordón Amurallado
- Clasificación Tipológica del Cordón Amurallado
- Estudios Ambientales del Sector
- Caracterización y Clasificación de los sillares del tramo evaluado

3.2 LOCALIZACIÓN Y DELIMITACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Se identifico espacialmente el terreno a evaluar y en base a los datos del IDEAM procesados por el CIOH, se reconoció el clima de la ciudad de Cartagena. También como parte de la localización se evaluó el entorno que actualmente rodea la muralla. Una descripción detalla de la localización se encuentra en los resultados (véase sección 4.1)

Este trabajo comprendió solo el estudio de la escarpa del Baluarte y la cortina, y se limitó el diagnóstico al área visible hasta el nivel del suelo.

3.3 DIAGNOSTICO

Durante este proceso se realizaron las evaluaciones necesarias para diagnóstico del estado del material pétreo. Sólo se evaluó el material pétreo encontrado en la escarpa de la muralla y aunque no se valoró como deterioro las pérdidas de juntas o cerámicas, si se consideraron las repercusiones que éstas pueden traer sobre la piedra adyacente.

3.3.1 Análisis Ambiental

El estado de conservación de las edificaciones, depende en gran medida de las características ambientales a las que éstas se exponen (Broto, 2005), por ello se estimó la vulnerabilidad del material a las condiciones de interés que lo rodean. Como parte del análisis se realizó:

3.3.1.1 Relación de la Meteorología Anual con respecto a la posible aparición de los Patrones de Deterioro en el Material Pétreo.

Este análisis se basó en una relación la construcción y su lugar de emplazamiento con la meteorología multianual registrada por el CIOH hasta la fecha. Durante este proceso, se consideraron cuáles son las principales épocas del año y como se comportan las variables meteorológicas en ellas, y en base a esa consideración se hizo un estimativo partiendo de su definición de cómo ellas podrían afectar el material pétreo de la muralla. Las variables meteorológicas estudiadas fueron la velocidad de viento, la humedad, precipitación y brillo solar.

3.3.1.2 Estimación de depósitos atmosféricos

Para este procedimiento se instalaron *testigos* en los lienzos de las murallas, que para el caso se definen como placas rectangulares de 60 x 60 cm hechas de material acrílico liso, en el que por deposición atmosférica el polvo y la salinidad característicos del ambiente

costero circundante a la muralla, se depositan en un intervalo de tiempo. Para efectos de este ensayo se estableció que el tiempo de exposición sería variable de acuerdo a la permanencia de las condiciones atmosféricas. Los testigos fueron colocados en lugares representativos del lienzo, en los que se consideró que no había barreras físicas o posibles factores antrópicos que pudieran generar una alteración (Imagen 24).

Imagen 24. Ubicación de los testigos sobre el tramo evaluado



Fuente: Google Earth, fotografía tomada el 11/02/2009.



Fuente: Por el Autor, 30/09/2011

Considerándose los análisis meteorológicos multianuales realizados por el CIOH hasta el 2009, la época de humedad del año presenta un régimen de vientos de intensidad variable entre 02 y 05 nudos (equivalente a 3.7 y 9.26 km/h) y en raras ocasiones sobrepasando los 10 nudos (18.52 km/h), se estableció que las fechas de muestreo corresponderían a velocidades:

- 1) Menores de 2 nudos (3.7 km/h).
- 2) Superiores a 2 nudos (3.7 km/h).

Las velocidades y la humedad relativa que aparecen en la Tabla 5 corresponden a los pronósticos del CIOH para el día de prueba.

Tabla 5. Especificaciones de los muestreos

| Testigos | Fecha | Velocidad de Viento (Nudos) | Dirección de Viento Predominate | Humedad Relativa (%) |
|----------|------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------|
| 1 | 10/10/2011 | 6.5 | SE | 76% |
| 2 | | | | |
| 1 | 14/10/2011 | 1-2 | S | 82% |
| 2 | | | | |

Fuente: Del autor, 2011.

Los testigos se ubicaron: el testigo 1 en la primera tronera de la cortina hacia el Baluarte San Juan Evangelista y el testigo 2 se ubicó en la tercera tronera de la Cara derecha del Baluarte San Ignacio.

La muestra en los testigos se recolectó a través del lavado de los mismos con agua destilada, obteniéndose una solución en la que se determinó por medio de un análisis químico en los laboratorios de la Universidad de Cartagena los Cloruros, Sulfatos y Salinidades presentes en ésta. Estos resultados se encuentran tabulados en la Tabla 8, encontrada en la sección 4.2.1.2

Como confirmación de que la deposición de los testigos era correcta, se adicione un testigo adyacente a uno ellos y al realizar cada análisis se comprobó que entre estos dos estos resultados se encontraran muy cercanos o iguales.

Las concentraciones de los depósitos de cloruros, salinidad y sulfatos se calcularon con las siguientes formulas:

☞ Cloruros:

$$C_{cl^-} = \frac{[Cl^-]xV_{Agua}}{A_t x t_t}$$

Ecuación 2

Donde:

C_{cl^-} = Cantidad de cloruros depositados (g/m². año)

$[Cl^-]$ = Concentración de cloruros (g/l)

A_t = Área del testigo

t_t = Tiempo del testigo en el lugar.

☞ Salinidad

$$C_s = \frac{[Salinidad]xV_{Agua}}{A_t x t_t} = \frac{[g/l]xL}{0.36m^2 x años}$$

Ecuación 3

Donde:

C_s = Concentración de salinidad

$[Salinidad]$ = Cantidad de sal depositada (g/l)

A_t = Área del testigo

t_t = Tiempo del testigo en el lugar.

☞ Sulfatos:

$$C_{cl^-} = \frac{[SO_4^-]xV_{Agua}}{A_t x t_t}$$

Ecuación 4

Donde:

C_{cl^-} = Cantidad de cloruros depositados (g/m². año)

$[Cl^-]$ = Concentración de sulfatos (g/l)

A_t = Área del testigo

t_t = Tiempo del testigo en el lugar.

Una vez realizado el cálculo se relaciono su presencia con los patrones deterioro que se podrían presentar por su presencia.

3.3.1.3 Efecto de la calidad del agua precipitada

Entendiendo el desarrollo que el parque automotor ha tenido y como esto repercute en la contaminación atmosférica se evaluó la presencia de lluvia acida, por medio de un análisis fisicoquímico a 3 muestras de agua precipitada, tomadas de manera aleatoria durante el desarrollo de la investigación. Los análisis de laboratorio se realizaron en las instalaciones de los laboratorios de la Universidad de Cartagena y por medio de análisis los resultados obtenidos de ellos se estimó la vulnerabilidad que podían tener estas rocas hacia este tipo de fenómenos. Las variables evaluadas fueron: pH, acidez, cloruros, sulfatos y nitratos.

3.3.1.4 Evaluación de la Calidad de Aire

Por medio de una evaluación de los resultados obtenidos del *Monitoreo de Calidad de Aire* efectuado por la Universidad de Cartagena en compañía de Codesia Ltda. y Equisam Ltda durante los días comprendidos entre el 12 y 23 de junio del 2011 en una de sus estaciones ubicada en el Claustro de la Merced, se estimo el efecto que la calidad de aire tiene sobre el material pétreo perteneciente al lienzo de la muralla. El estudio investigo cuales fueron las concentraciones de Material Particulado y Dióxido de Azufre.

3.3.2 Análisis de la Construcción

Durante este análisis se reconoció cada una de las características de relevancia de la materia y de la construcción, dividiéndose este análisis en:

3.3.2.1 Caracterización de la Construcción

Se estableció por medio de observación y un reconocimiento de la información bibliográfica local una descripción arquitectónica de sus componentes y la tipología del elemento.

3.3.2.2 Caracterización y Clasificación del Material

En el 2009 mediante análisis morfológicos, exámenes de secciones delgadas y Análisis instrumentales (Microscopía electrónica de barrido – SEM-EDX) la Universidad Externado de Colombia caracterizo y clasifico diferentes muestras del material pétreo en el sector de estudio y sus alrededores, estos resultados fueron analizados cualitativa y cuantitativamente por la presente investigación con el fin de dar una definición global y precisa de los materiales en el tramo de interés.

3.3.2.3 Identificación del tipo y grado de humedad en la escarpa

Como producto de los análisis realizados por la Universidad Externado de Colombia, en el 2009, se logró determinar para las zonas representativas dentro del tramo evaluado por esta investigación, el contenido de humedad presente en los sillares y la argamasa que componen la estructura. Estos resultados fueron presentados por medio de una serie de gráficas que describen el grado y tipo de humedad presentado a lo largo y ancho de la sección. Con base a estas gráficas y la identificación realizada, se determinó cuáles son las más vulnerables a las afecciones causadas por este factor.

Asimismo se correlacionó la vulnerabilidad que tienen los diferentes tipos de piedras caracterizadas y clasificadas dentro de la sección anterior a este factor, refiriendo como parámetro principal la porosidad encontrada en cada una.

3.3.2.4 Evaluación de la erosión por escorrentía

Esta evaluación consistió de los siguientes procedimientos:

1. Con base la forma de la estructura y sistema de drenaje de la estructura, se estableció cuales eran los recorridos del agua en la escarpa. Y se evaluado que cada recorrido como un canal.
2. A partir de un promedio de los anchos medidos para los canalillos reconocidos en él la Cortina hacia el Baluarte San Juan Evangelista, se estableció el ancho promedio de los canalillos y se asocio éste al posible ancho que podría tener el flujo del agua sobre la escarpa.
3. De los estudios *Diagnostico del Sistema De Drenaje y de los Factores Ambientales y Climáticos en la Restauración de los Lienzos De Muralla en la Ciudad De Cartagena*, se tomo el caudal de flujo de agua hidrológico máximo promedio (Q_{maxp}), para periodos de retorno de 5, 10, 15 y 20 años; basados en los caudales hidrológicos máximos de cada canal identificado en el inventario (Tabla 6).

Tabla 6 – Caudales para Cada Periodo de Retorno.

| Periodo de Retorno (años) | 5 | 10 | 15 | 20 |
|------------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Q_{maxp} (L/s) | 4.4 | 4.9 | 5.02 | 5.5 |

Fuente: *Diagnostico del Sistema De Drenaje y de los Factores Ambientales y Climáticos en la Restauración de los Lienzos De Muralla en la Ciudad De Cartagena, 2009*

4. Con base las tablas calculadas por Ven Te Chow para canales erosionables (Ver Anexo 5), se estableció el número de Maning para las superficie rocosa.
5. Utilizando la siguiente formula junto con los valores anteriormente mencionados se calcularon las tirantes (h_p) para cada tiempo de retorno estipulado.

$$Q_{\max p} = \frac{(Bp * h_p)^{(5/3)} S_p^{1/2}}{n(Bp + 2h_p)^{2/3}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde

Bp : Base promedio de los canalillos

h_p : Tirante Promedio

n : Numero de Manning para superficie rocosa

S_p : Pendiente Promedio del Canal

Cabe aclarar que el valor de S_p cambia con relación al caso en evaluación tomando valores de 2% y 10% para el primero y el segundo respectivamente, siendo estas últimas cantidades extraídos de los estudios *Diagnostico del Sistema De Drenaje y de los Factores Ambientales y Climáticos en la Restauración de los Lienzos De Muralla en la Ciudad De Cartagena*.

6. Con base a las tirantes (h_p) despejadas de las ecuación anterior evaluada para cada uno de los periodos de retorno estipulados, se calculo el área mojada y se despejo la velocidad del flujo (V_p). La expresión utilizada para este cálculo fue:

$$V_p(m/s) = \frac{Q_{\max p}}{h_p \times B_p} \quad \text{Ecuación 6}$$

Una vez obtenido este último el valor de la velocidad fue comparado con los valores de Velocidad Máxima Permisible para este tipo de roca establecido por el RAS 2009, con el fin de referenciar el efecto erosivo que podría tener este fenómeno sobre el material pétreo de la escarpa.

3.3.2.5 Evaluación de la Presión de Cristalización

Se tomaron 3 muestras representativas de imágenes de secciones delgadas para diferentes rocas de las que habían sido previamente analizadas, con base a ellas y con la ayuda del Autocad 2009, se realizo el cálculo de las áreas encontradas en las imágenes. Con base a dichas áreas, se calculo el radio de poros de estas rocas y se estableció la distribución de estos en la porosidad del material.

Utilizando el valor de los radios de poros (Véase sección 2.2.6), se calculo el valor teórico de la presión máxima de cristalización y para cada poro. La relación V_f/V_R , se calculo con base la imagen de la sección delgada.

Una vez calculada la presión para cada una de las diferentes distribuciones de poros, se sumaron para la obtención de la presión total de cristalización ejercida en los poros en la roca evaluada y se comparó con el valor de resistencia de las piedras coralina calculado por Covo (2009). Este último proceso se repitió en cada una de las otras 3 muestras consideradas.

3.3.2.6 Evaluación de la Presión de Hidratación

Con base a los valores de temperatura y Humedad Relativa ambiental, se determinó por asociación de estos valores con la Tabla 3, la presión máxima de hidratación que podría sufrir el material pétreo a nivel de poros y se comparo con la resistencia máxima que posee este material a los efectos de tensión, este ultimo valor fue calculado por Covo (2009) para las piedras coralinas del sector.

3.3.2.7 Evaluación del la Precipitación de Sales

En la sección 2.2.6 se muestran las Humedades relativas de Equilibrio de las principales sales solubles sensibles a la humedad relativa y con forme con los datos meteorológicos anuales calculados por el CIOH, para la ciudad de Cartagena se estimo su precipitación y comportamiento.

3.3.3 Diagnóstico de Patologías en el Material Pétreo

Las alteraciones de la piedra fueron determinadas por medio de una inspección visual y una correlación de los datos obtenidos en los análisis precedentes. Se utilizó la clasificación de patrones de deterioro propuesta por ICOMOS – ISCS en el *Illustrated glossary on Stone deterioration patterns* de 2010. Se debe aclarar, que exceptuando los patrones de origen físico mecánico, cada patrón de deterioro está correlacionado desde el momento de su definición con las condiciones ambientales que lo producen.

3.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON ESTUDIOS ANTERIORES

Se estudió toda la información obtenida referente al tramo de estudio y se relacionó con las conclusiones de esta investigación. Los datos puestos a comparación fueron:

- Las patologías registradas en el 2003 sobre el Baluarte de San Ignacio.
- Las tasas de salinidad encontrada en el Diagnostico del sistema de Drenaje y de los Factores Ambientales y Climáticos en la Restauración de los Lienzos de Muralla en la ciudad de Cartagena en 2008.

3.5 RECOMENDACIÓN DE PRESERVACIÓN Y RESTAURACIÓN

Conforme con los resultados obtenidos en el diagnóstico del material pétreo y las recomendaciones y tratamientos a las patologías, encontradas en las investigaciones del Dr. Broto, se sugirieron algunas medidas de mitigación y control de daños para el caso estudio.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 LOCALIZACIÓN Y DELIMITACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El área evaluada por este proyecto se encuentra dentro del cordón amurallado, específicamente el tramo del Baluarte de San Ignacio y la Cortina que hay entre éste y el Baluarte San Juan Evangelista, emplazada en las coordenadas $10^{\circ}25'16.57''$ N y $75^{\circ}32'59.84''$ O.

Imagen 25. Centro Histórico de Cartagena de Indias



Fuente: Google Earth, fotografía tomada el 12/06/2009 a una altura de 1.29Km sobre nivel del mar.

El tramo comprendido por el Baluarte San Ignacio y la cortina entre éste y el Baluarte De San Juan Evangelista, posee aproximadamente una extensión de 150m y de altura variable de acuerdo a la unidad estructural en evaluación.

4.2 DIAGNÓSTICO

Antes del reconocimiento de los patrones de deterioro y su posible causa era necesario conocer el contexto ambiental, constructivo y material del caso de estudio, por ello se desarrollaron análisis ambientales al medio circundante de la muralla y estudios a la estructura enfocados a establecer la relación de sus características con el medio ambiente.

4.2.1 Análisis Ambiental

Para estimar la vulnerabilidad ambiental hacia la humedad y salinidad se realizaron los siguientes análisis unitarios:

4.2.1.1 Relación de la Meteorología Anual con respecto a la posible aparición de los Patrones de Deterioro en el Material Pétreo

En el 2009 El CIOH se realizó una determinación de los promedios multianuales de condiciones meteorológicas en la ciudad de Cartagena de Indias hasta la fecha. En dicho informe se estableció que la ciudad posee un clima tropical semiárido y que tiene un promedio de humedad cercano a 80%, con la estación lluviosa típicamente entre abril-mayo y septiembre-noviembre.

En la Tabla 7, se encuentran los promedios multianuales de cada una de las variables meteorológicas analizados por el CIOH, para la ciudad de Cartagena hasta el 2009. Con respecto a ella en el mismo informe se identificaron en la urbe tres períodos climáticos principales, llamados Época Seca (verano) y Época Húmeda (invierno) y una época de Transición.

Tabla 7. Promedios Multianuales de los principales parámetros Meteorológicos de Cartagena

| Climatológica de Cartagena | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|-------------------|-------------|-------------|------|------|---------------|--------|---------|--------------|-------|
| Temperatura (°C) | | | | | | | | | | | | |
| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
| Mínima promedio | 22.9 | 23.1 | 23.6 | 24.6 | 24.9 | 25.0 | 24.7 | 24.9 | 24.7 | 24.4 | 24.4 | 23.5 |
| Promedio | 26.8 | 26.8 | 27.1 | 27.7 | 28.3 | 28.4 | 28.3 | 28.3 | 28.2 | 27.8 | 27.8 | 27.3 |
| Máxima promedio | 31.1 | 31.0 | 31.1 | 31.5 | 31.7 | 31.9 | 32.0 | 31.9 | 31.7 | 31.2 | 31.4 | 31.3 |
| Precipitación, brillo solar y humedad relativa | | | | | | | | | | | | |
| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
| Precipitación (mm) | 8 | 1 | 1 | 29 | 92 | 115 | 94 | 124 | 143 | 244 | 132 | 37 |
| Días lluvia | 1 | 0 | 1 | 3 | 10 | 13 | 10 | 13 | 14 | 17 | 12 | 3 |
| Humedad relativa (%) | 79 | 78 | 78 | 79 | 81 | 81 | 80 | 81 | 81 | 82 | 82 | 81 |
| Brillo Solar (horas/mes) | 279 | 242 | 244 | 210 | 196 | 190 | 216 | 206 | 176 | 175 | 202 | 245 |
| Evaporación (mm) | 170 | 172 | 194 | 187 | 163 | 150 | 163 | 154 | 144 | 140 | 132 | 148 |
| Datos medidos en: <u>Aeropuerto Internacional</u> <u>Rafael Núñez</u> | | | Promedios anuales | Evaporación | Temperatura | | | Precipitación | | | Brillo Solar | |
| | | | | mm | Min | Med | Max | Total | Lluvia | Humedad | | |
| | | | | mm | °C | °C | °C | mm | Días | % | | horas |
| | | | | 1.917 | 24.2 | 27,7 | 31,5 | 1.021 | 95 | 80 | 245 | |

Fuente: Climatológica De Los Principales Puertos Del Caribe Colombiano; CIOH, 2009

Como producto de una evaluación de cada periodo climático de la ciudad según su precipitación, humedad relativa, brillo solar y régimen de viento, se estimó para cada época la amenaza que representa, además de la incidencia de las variaciones meteorológicas sobre la aparición de los patrones de deterioro influenciados por la humedad y salinidad en la estructura:

☞ *La Época Seca*

Durante esta época, que inicia desde el mes de diciembre hasta el mes de marzo, es donde se encuentran los vientos más fuertes de todo el año alcanzando velocidades hasta de los 50 km/h, también es donde se registran las velocidades más fuertes en todo el año con orientaciones N, NNE y NE. En esta época los vientos inciden perpendicularmente sobre la escarpa causando irregularidades (alveolización) en la superficie de la roca y que

facilitando la deposición de sales y contaminantes atmosféricos. Esta época representa la mayor amenaza a nivel de aspersion y deposición de humedad y salinidad marina.

También es cuando la humedad relativa y las precipitaciones alcanzan los valores más bajos de todo el año, llegando a 79% y 1 mm/mes. Por su parte el brillo solar logra sus mayores valores en el mes de enero (hasta 279 horas/mes), provocando sobre el material pétreo un estado más resistente a los ataques de la humedad y la salinidad y erradicándose algunos tipos de afloramientos biológicos de su superficie.

☞ *Época Húmeda*

En la misma Tabla 7, se observa que la época humedad abarca los meses desde abril hasta noviembre, extendiéndose en ocasiones hasta la segunda semana del mes de diciembre, en donde las precipitaciones oscilan entre 29 y 244 mm/mes.

Dado que se presenta el régimen de viento más bajo con velocidades máximas de tan solo 19 km/h, en esta época la amenaza hacia el nivel de aspersion y deposición de salinidad marina es la más débil. Pero es cuando se experimenta la mayor humedad atmosférica y tasa de precipitación, considerándose éstas las directas responsables de los procesos de hidratación y cristalización de las sales depositadas durante los meses anteriores en los poros y la erosión generada por la escorrentía superficial (Broto, 2005). La escorrentía superficial también es la encargada de lavar y arrastra consigo los depósitos e incrustaciones acumulados previamente.

Dado el bajo régimen de vientos y el bajo brillo solar (175 horas/mes aprox.), las humedades en la estructura tienden a acumularse, lo que puede generar manchas y crecimiento biológico sobre las irregularidades de la superficie.

Aunque poco notorio, la orientación de los vientos N y NE coinciden una vez más con la alineación de la escarpa, haciéndola vulnerable al efecto de “*Impulsión de la Lluvia por Acción del Viento*”, siendo éste capaz de generar erosión a la roca a largo plazo (Se aclara

que el análisis de la vulnerabilidad de la construcción por la degradación de este efecto, escapa los alcances de esta investigación) (Blocken & Carmeliet, 2004).

☞ *Época de Transición*

Como su nombre lo indica, se da una transición entre los 2 periodos mencionados con anterioridad y sus efectos se presentan moderadamente. El brillo solar y el régimen de vientos empiezan a disminuir gradualmente y aumenta la precipitación, la humedad relativa y la temperatura. Se inician los procesos de hidratación y cristalización de las sales, levemente el lavado y erosión por la escorrentía, y la colonización biológica en las superficies irregulares como se describió anteriormente. La ciudad alcanza los mayores valores de temperatura en todo el año.

4.2.1.2 *Estimación de depósitos atmosféricos*

Con el fin de estimar el porcentaje de salinidad, cloruros y sulfatos que se depositan sobre el lienzo de la muralla, se colocaron los testigos sobre ésta y se realizaron los análisis químicos pertinentes. De estos se obtuvo:

Tabla 8. Análisis Químico a la solución de los testigos

| | | Fecha de Instalación /Recolección | Salinidad g/L | Cloruros, mg/L | Sulfatos, mg/L |
|------------------------------|---|--|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Mayores a 2 Nudos | 1 | 09/10/2011 (5:30p.m) | 0.007 | 6.85 | 0.14 |
| | | 10/10/2011 (01:00a.m) | | | |
| | 2 | 09/10/2011 (5:p.m) | 0.03 | 17.61 | 14.11 |
| | | 10/10/2011 (01:00a.m) | | | |
| Menores a 2 Nudos | 1 | 13/10/2011 (5:30p.m) | 0.01 | 7.145 | 0.765 |
| | | 14/10/2011 (11:50a.m) | | | |
| | 2 | 13/10/2011 (5:35p.m) | 0.01 | 7.44 | 0.75 |
| | | 14/10/2011 (11:55a.m) | | | |

Fuente: Análisis Químicos del Agua en laboratorio

Como una forma de confirmar que la tasa de deposición fuera la veracidad de los resultados en las mediciones, se colocó para cada periodo de muestreo un testigo adicional adyacente al testigo No. 1 (Denominado por esta investigación como 1A) y se compararon los resultados de sus análisis químicos. Los resultados de estas muestras paralelas y el cálculo de la discrepancia porcentual entre ellas se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Confirmación de análisis químico

| (10/10/2011) | | | | |
|-----------------------|----------|-----------|-----------------|-------------------------|
| | 1 | 1A | Promedio | Discrepancia (%) |
| Cloruros, mg/L | 6.850 | 7.070 | 6.960 | 3.212 |
| Sulfatos, mg/L | 0.140 | 0.150 | 0.145 | 6.667 |
| (14/10/2011) | | | | |
| | 1 | 1A | Promedio | Discrepancia (%) |
| Cloruros, mg/L | 7.440 | 6.850 | 7.145 | 7.930 |
| Sulfatos, mg/L | 0.790 | 0.860 | 0.825 | 8.861 |

Fuente: del autor, 2011

En la tabla 9, se observa que no hubo diferencia significativa dentro de las mediciones. En los datos se nota que las concentraciones del testigo 2 el día 10 de octubre, exceden por mucho los valores encontrados en el testigo 1 y 1A tomadas el mismo y día, haciéndonos presumir una posible contaminación de la muestra por aspectos antrópicos referente a los elementos donde se almacenó la muestra o posibles alteraciones, producto de la ubicación que tenía el lienzo. Se descartó este resultado.

Implementando las ecuaciones para el cálculo de la concentración de Cloruros, Salinidad y Sulfatos, se encontraron las diferentes tasas de concentración las cuales se presentan para cada velocidad y caso en siguientes tablas:

☞ Cloruros

Tabla 10. Calculo de la tasa de deposición de Cloruros

| Muestra | Fecha | Tasa de deposición de cloruros (g/ m ² . Año) | Velocidad de viento (km/h) |
|------------|------------|--|-------------------------------|
| 1.a | 09/10/2011 | 0.021 | 18 |
| 2.a | 13/10/2011 | 1.173 | 10.4 |
| 2.b | 13/10/2011 | 1.198 | 10.4 |

Fuente: del autor, 2011

☞ Salinidad

Se procedió a hallarla para cada uno de los testigos colocados

Tabla 11. Calculo de la tasa de deposición de Salinidad

| Muestra | Fecha | Tasa de deposición de salinidad (g/ m ² . Año) |
|------------|------------|---|
| 1.a | 09/10/2011 | 0.11 |
| 1.b | 13/10/2011 | 0.15 |
| 2.b | 13/10/2011 | 0.15 |

Fuente: del autor, 2011

Se obtuvo una tasa de deposición de cloruros y salinidad para una velocidad mayor a los 2 nudos de $1.07138 \text{ g/m}^2 \cdot \text{año}$ y $0.15 \text{ g/m}^2 \cdot \text{año}$ respectivamente, asimismo para una velocidad menor a los 2 nudos las máximas tasas de deposición fueron de $1.1605 \text{ g/m}^2 \cdot \text{año}$ y $0.11 \text{ g/m}^2 \cdot \text{año}$. Por ser la primera vez que se realizaba una investigación detallada de estas deposiciones en esta época del año, no se pudo contar con un punto de referencia que permitiera saber, que tan altas o bajas podían llegar a ser estas tasas, limitante que impidió determinar la magnitud de afectación de este factor.

Por otra parte, aunque se supuso una correlación proporcional entre la tasa de deposición y la velocidad de viento, la escasez de mediciones y las amplia cantidad de variables relacionadas con la dirección fluctuante, obstáculos de las corrientes de aire y posibles factores antropicos relacionados con el cuidado durante el tiempo de permanencia de la muestra, impiden afirmar con veracidad cualquier relación de proporcionalidad, mas sin

embargo, las concentraciones obtenidas de la salinidad y los cloruros en este ensayo, se puede decir, que se atribuyen principalmente a sales del ambiente marino que rodea la estructura, que aumentan su presencia en la cercanía con la costa (Grossp & Esbert, 1994). La acumulación de estas sales junto con ciclos de humectación/secado contribuye a la formación de costras salinas, costras negras, incrustaciones, eflorescencia, daños mecánicos por presiones de cristalización e hidratación de las sales, los cuales pueden terminar en grietas, ampollamientos y desprendimiento granular.

☞ Sulfatos:

Tabla 12. Calculo de la tasa de deposición de Sulfatos

| Muestra | Fecha | Tasa de deposición de sulfatos (g/ m². Año) | Velocidad de viento (km/h) |
|----------------|--------------|---|---------------------------------------|
| 1.a | 09/10/2011 | 0.021 | 18 |
| 2.a | 13/10/2011 | 1.173 | 10.4 |
| 2.b | 13/10/2011 | 1.198 | 10.4 |

Fuente: del autor, 2011

Se obtuvo una tasa de deposición de sulfatos para una velocidad de mayor a los 2 nudos de $0.021 \text{ g/m}^2 \cdot \text{año}$, asimismo para una velocidad menor a los 2 nudos la máxima tasa fue de $1.198 \text{ g/m}^2 \cdot \text{año}$. Por ser la primera vez que se realizaba una investigación detallada de estas deposiciones en esta época del año, no se pudo contar con un punto de referencia que permitiera saber, que tan altas o bajas podían llegar a ser estas tasas, limitante que impidió determinar la magnitud de afectación de este factor.

De lo anterior se pudo observar que hay un aumento notable en la concentración de estos en la medida que la velocidad se hace menor, condición atribuida a la poca dispersión de los contaminantes y las sales marinas por la baja fuerza y bajas velocidades de viento, sin embargo esta investigación reconoce la necesidad de continuar haciendo estudios en la zona que confinen experimental y teóricamente tal comportamiento. Muy a pesar de lo anterior, es válido afirmar que los sulfatos obtenidos como producto de este análisis se atribuyen a la contaminación atmosférica proporcionada por la quema de combustible fósil en los

automóviles y los aerosoles marinos presentes en el ambiente en evaluación, y se les atribuye el efecto de costras negras de yeso ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) en los edificios.

Es necesario anotar que la orientación del viento los días de muestreo era S y SE, condición que no favoreció a la tasa de deposición, pues al ser contraria a la de la escarpa, la estructura no tuvo contacto directo con las ráfagas de viento.

4.2.1.3 Efecto de la calidad del agua precipitada

De un análisis químico a 3 muestras de agua precipitada recogidas de manera aleatoria dentro del desarrollo del proyecto, se estableció un patrón significativo del pH, cloruros, sulfatos, nitratos y sólidos totales que contiene este tipo de agua. Los resultados de los análisis se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Análisis Químico al Agua Precipitada

| Características Muestras | pH (unidad) | Cloruros, mg/L | Sulfatos, mg/L | Nitratos, mg/L como CaCO_3 | Acidez, mg/L como CaCO_3 |
|-------------------------------|----------------|-------------------|-------------------|---|---|
| Muestra 1 (02/10/2011) | 6.43 | 5.87 | 0.57 | 0.14 | - |
| Muestra 2 (10/10/2011) | 6.38 | 7.83 | 0.22 | 0.44 | 25 |
| Muestra 3 (13/10/2011) | 6.41 | 13.31 | 2.57 | 0.49 | 29.49 |

Fuente: Análisis Químicos del Agua en laboratorio

El pH y la acidez en promedio encontrados fueron de 6.4 unidades y 27.3 mg/L como CaCO_3 respectivamente. Estos valores encajan en los rangos habituales en precipitaciones, por lo tanto no se les puede considerar “Ácidas” y no representan un elemento ambiental agresivo sobre la roca.

Los cloruros y los nitratos presentes en las muestras recolectadas se atribuyen al ambiente marino típico de la zona, más abundante de acuerdo a la cercanía al mar (Grossp & Esbert, 1994). Estos cloruros generalmente se relacionan con la presencia de sales solubles que se depositan sobre la roca y por la escorrentía superficial que se infiltran por las grietas y porosidades del material, con la capacidad de generar a largo plazo ampollamientos, daños

mecánicos a nivel microscópico por la presiones de cristalización, costras salinas, eflorescencias y subeflorescencias.

Por su parte los sulfatos y parte de los nitratos, se vinculan a la contaminación atmosférica. El dióxido de azufre (SO_2) en la atmósfera producto de la combustión fósil, reacciona con el oxígeno transformándose en anhídrido sulfúrico, que a su vez reacciona con el agua para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4) que ataca al carbonato de calcio del los sillares, convirtiéndose en sulfato de calcio, esta conversión implica alteración en la composición química de la roca que provoca una disolución (erosión) de la misma (Grossp & Esbert, 1994). Por el secado de la solución, los sulfatos de calcio forman cristales hidratados de mayor volumen que los carbonatos originales, constituyéndose incrustaciones y escamas friables que producen efectos conocidos como ampollas (hinchamiento), escamas, exfoliación (Parker, 2001).

Los óxidos de nitrógeno, mediante una serie de reacciones complejas, forman ácido nítrico (HNO_3) que reaccionando con el carbonato cálcico, dan lugar a la formación de nitrato de calcio [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{Hp}$] lo que implica una alteración en la composición química de la roca (Grossp & Esbert, 1994).

4.2.1.4 Evaluación de la Calidad de Aire

Esta investigación solo utilizo los resultados de la *Evaluación de Calidad de Aire* efectuada a las estaciones de muestreo ubicadas en el Claustro de la Merced y El CAI el Limbo (Ubicado en la Avenida Santander a la entrada de Bocagrande).

De los análisis químicos realizados a las muestras de las estaciones se estableció, que no hubo presencia detectable de Dióxido de Azufre en ninguna de ellas y que las máximas concentraciones para cada caso fueron de 56,42 y 126,17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, no sobrepasando estas, los estándares de calidad de aire establecidos en las Resoluciones 601 de 2006, 610 de 2010 y 2154 de 2010 del MAVDT, resultado que permite inferir, que el aire que rodea la muralla no posee contaminantes suficientes para considerarse una

amenaza directa para el material pétreo. Sin embargo, cabe aclarar que por muy baja que sea las concentraciones, estas pueden mezclarse con las precipitaciones y depositarse sobre la superficie del material formando costras negras a largo plazo.

4.3 ANÁLISIS DE LA CONSTRUCCIÓN

Durante este procedimiento se evaluó el sistema constructivo y su desarrollo al pasar el tiempo, se caracterizaron los materiales que componen la muralla, estimándose la respuesta y sensibilidad al medio ambiente húmedo que lo rodea.

4.3.1 Caracterización de la Construcción

Arquitectónicamente se define que la escarpa del Baluarte San Ignacio y la cortina entre éste y el Baluarte San Juan Evangelista está compuesta por un:

- ☞ **Remate superior:** Donde se encuentran los drenajes pluviales y el parapeto Romo a Barbeta. Este elemento está construido en piedra coralina tallada en forma de polígono regular tipo sillar, pegado con argamasa compuesta de hidróxido de calcio y arena.
- ☞ **Muro inclinado o escarpa:** Está construido con Piedra sillar trabada con 0.5 x 0.5 x 0.7 m pegada con argamasa y cuando se tenía la necesidad de hacer nivelaciones entre hiladas, se utilizan ladrillos militares cerámicos de 0,15 x 0.3 m.
- ☞ **Pedestal:** Compuesto por el cimientó y el rodapié. Se construyó en piedra sillar tallada de 0.5 x 0.5 x 0.7 m. Se cree que el cimientó se construyó por medio de casetones de madera llenos de piedra como un muro ciclópeo.

4.3.2 Caracterización y Clasificación del Material

La roca, el principal material de construcción de las murallas de Cartagena, era provisto de las formaciones geológicas aledañas a Cartagena de Indias, integradas por rocas sedimentarias de tiempos pliocénicos, de naturaleza caliza, las cuales a su vez estaban constituidas por pretéritas formaciones coralinas. Las piedras extraídas de estas formaciones se caracterizaban por ser porosas, no muy densas, relativamente blandas y que

si no eran demasiado adecuadas para soportar el embate de los elementos, tenían una textura perfecta para ser talladas y esculpidas. (Cabellos, 2003).

En un estudio realizado por la Universidad Externado de Colombia se muestreó, caracterizó y clasificaron según Dunham (Véase Imagen 1) nueve rocas representativas del Baluarte de San Ignacio y la cortina entre éste y el Baluarte de San Juan Evangelista. Para esta caracterización y clasificación, implementaron análisis morfológicos, instrumentales y de secciones delgadas, lo cual les permitió reconocer mejor los materiales constitutivos y los procesos internos sufridos por las mismas.

Dentro de su investigación, identificaron en el tramo la presencia de cuatro diferentes grupos de rocas: Packstone, Wackstone, Grainstone y Boundston. Las cuales están ubicadas sin ninguna relación entre el tipo de piedra y la zona de la muralla evaluada, poniendo como ejemplo el Baluarte San Ignacio que posee tres tipos de piedras en zonas relativamente cercanas entre sí.

4.3.2.1 Wackestone

De las muestras tomadas solamente una (TE-58-2008. I-06) corresponde a las rocas de tipo Wackstone (ver Imagen 26). La microfotografía de la Imagen 27 muestra diferentes fragmentos fósiles flotando en la matriz de micrita.

La roca está predominantemente compuesta por fósiles calcáreos (37.5%) aglutinados por micrita (o lodo calcáreo) (61.5%). En menor proporción se reconocieron partículas terrígenas (trazas) tales como: cuarzo monocristalino, cuarzo policristalino (con epidota y micas accesorias), feldespato, minerales micáceos (moscovita) y minerales pesados (epidota). El conjunto fósil está representado por: corales (con poros intragranulares), equinodermos (espinas), briozoos, algas fosilizadas, foraminíferos y bivalvos de concha gruesa (Imagen 27). La mayoría de bioclastos se encuentran recrystalizados y han perdido sus rasgos internos originales característicos, en algunos casos están parcial o casi completamente disueltos, atribuyéndose tal situación a la meteorización química

(infiltración de la lluvia ácida). En menor proporción ocurrieron otros procesos disolutorios representados por: desarrollo de algas (trazas) con formas irregulares y de fibras y concentración de partículas carbonosas (1%) en el borde externo de la muestra por polución. La micrita aglutinante en varios sectores está recrystalizada y levemente transformada en microesparita (calcita cristalina).

La textura encontrada en forma general era algo disuelta y corroída. Los contactos entre fósiles son en su mayoría flotantes y en menor proporción puntuales. Se determinó que el sector donde se formó la roca era restringido y cercano a un crecimiento arrecifal (lagoon o zona submareal).

La porosidad del ejemplar fue calculada en 16%. Se reconocieron: (1) poros generados por disolución de fósiles y micrita e (2) intersticios intragranulares naturales en fragmentos de corales.

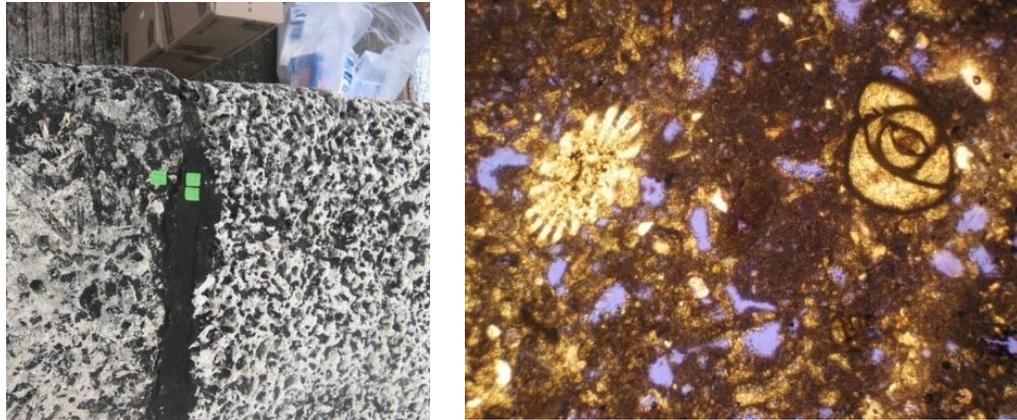
Imagen 26. Diferentes tipos de piedra presentes en el Lienzo del Baluarte de San Ignacio. En la parte superior se observa la única muestra de tipo Wackston



 Wackstone  Packstone  Grainstone  Boundstone

Fuente: Universidad Externado de Colombia, 2009

Imagen 27. 1. Microfotografía de la muestra TE-58-2008. I-06 en donde se observan los fragmentos fósiles flotando en la matriz de lodo calcáreo. Roca tipo Wackstone. A la izquierda, imagen general de la roca.

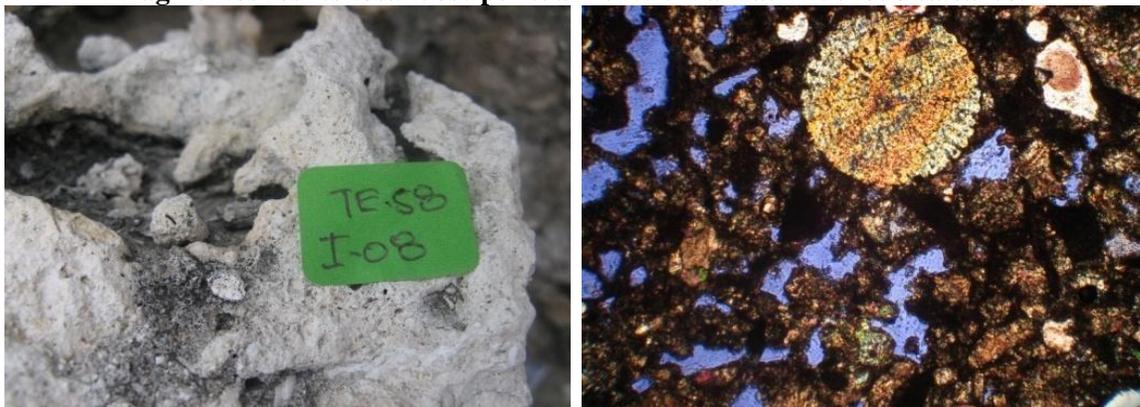


Fuente: Universidad Externado de Colombia, 2009

4.3.2.2 Packstone

Por su parte, más de la mitad de las muestras analizadas corresponde a piedras de tipo Packstone (TE-59-2008. I-01, TE-59-2008. I-03, TE-58-2008. I-08, TE-58-2008. I-09, TE-58-2008. I-10 y TE-59-2008. I-11) y son características de crecimientos de tipo arrecifal en sectores restringidos (ver Imagen 28). A nivel de textura, estas rocas presentaron diferentes tipos de poros e intersticios internos, alcanzado una porosidad entre 15-20% aproximadamente y siendo casi toda causadas por la disolución.

Imagen 28. Microfotografía de la muestra TE-58-2008. I-08 en donde se observan los fragmentos fósiles tocándose puntualmente en la matriz de lodo calcáreo.



Fuente: Universidad Externado de Colombia, 2009

La matriz de lodo calcáreo hace que en términos generales, este tipo de piedras tenga mejor resistencia a esfuerzos mecánicos, que las que presentan como cementante calcita microcristalina (esparita) debido al comportamiento plástico del lodo; sin embargo, esta propiedad depende del grado de recristalización que cada piedra tenga, es decir, del porcentaje de lodo que se transforma en esparita.

En todas las muestras tipo Packstone se encontraron procesos de disolución y corrosión intensa por meteorización química, desarrollo de algas (trazas) en el borde o justo por debajo de la superficie externa y concentración de partículas carbonosas (2%) igualmente en el borde externo de la muestra. A pesar de que los últimos dos efectos también contribuyeron a la disolución, su resultado es volumétricamente insignificante. La polución fue la responsable de la concentración carbonosa y asimismo la causante de la coloración negra. La caracterización de cada una de las 6 piedras encontradas se encuentra en los Anexo 2.

Por su parte, el análisis EDX (espectro y análisis semicuantitativo) realizado a una muestra representativa de estas rocas, demostró la presencia de elementos como O, S, y Ca, confirmando la formación de yeso a partir de contaminantes ambientales como el SO₂, incrementando la costra negra debido a la acumulación de hollín. Del mismo modo se encontraron cristales de sal de cloruros alcalinos.

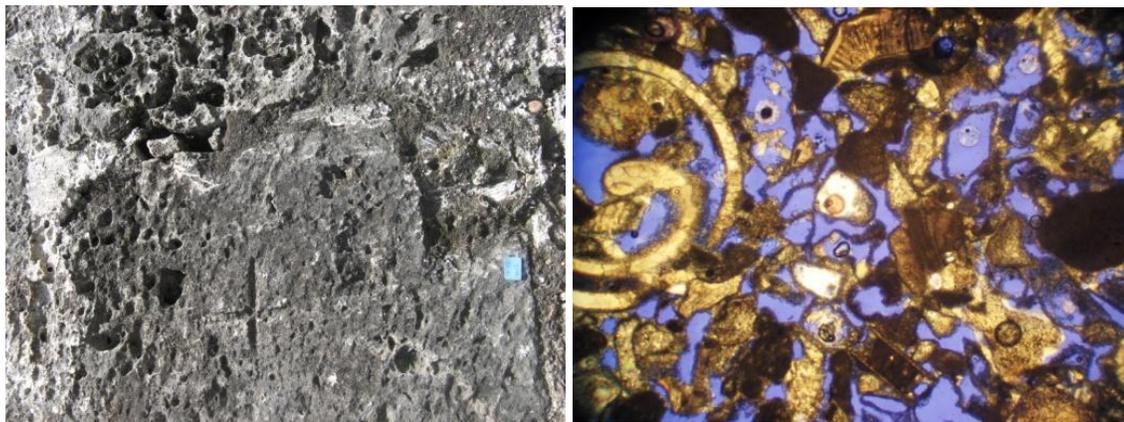
4.3.2.3 *Grainstone*

Dentro del tramo evaluado por esta investigación se encontró un ejemplar correspondiente a esta clasificación (TE-58-2008 I-12), en el caso se apreció en su composición fragmentos aloquímicos en un orden de 95.5%, que estaban representados por fósiles de: algas fosilizadas, gasterópodos, equinodermos (placas y espinas), bivalvos de concha gruesa y corales; que a su vez eran cementados con calcita cristalina del tipo esparita. Se apreció además, una notable disolución de los fósiles y de la esparita en la muestra. La porosidad de la sección analizada era de 20%. Se determinó que el ambiente de sedimentación en que

se formó la roca, corresponde a una playa calcárea cercana a un crecimiento arrecifal (ver Imagen 29).

Se encontraron efectos de disolución referidos a: (1) filtración de agua lluvia ácida (meteorización química), (2) corrosión por actividad biológica, producida por el crecimiento de algas (trazas) y (3) acumulación de partículas carbonosas (trazas), por contacto de la roca con CO₂. Los dos últimos efectos no fueron volumétricamente importantes y sólo perturbaron la superficie de la roca. El color negro externo es atribuido a la contaminación atmosférica.

Imagen 29. Microfotografía de la muestra TE-58-2008. I-12 en donde se observan los fragmentos dentro de la matriz de cemento calcáreo. A la derecha imagen general de la roca.



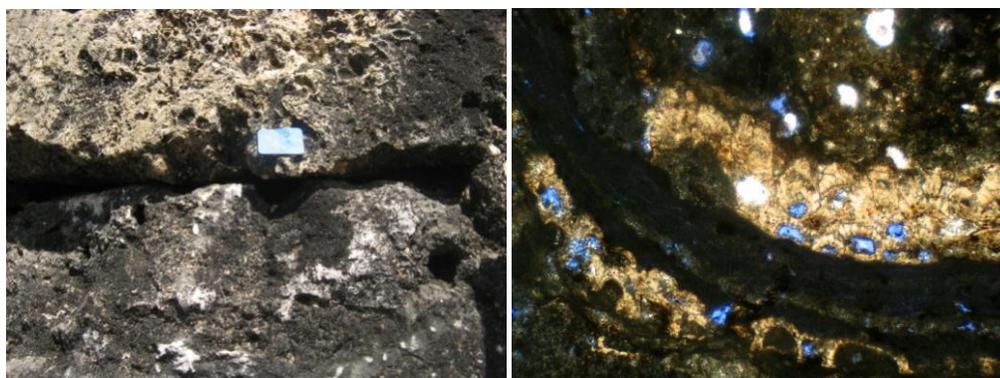
Fuente: Universidad Externado de Colombia, 2009

4.3.2.4 Boundstone

En el informe del tramo solo se registró una muestra (TE-58-2008. I-13, ver Imagen 30) que clasificada dentro de esta categoría y de acuerdo a los resultados encontrados en los exámenes de sección delgada se reconoció que: el ejemplar presenta dentro de su composición algas de ambientes arrecifales y fósiles de corales (bivalvos de concha gruesa, equinodermos (espinas y placas) y foraminíferos), aún cuando en general estos últimos han preservado su textura interna característica, se pudo reconocer que en algunos lugares están totalmente disueltos. Se halló lodo calcáreo relleno de los espacios interfosilíferos y en varios sectores también estaba levemente corroído y disuelto. Por su parte se estimó una porosidad del 16% y solo se identificaron poros por disolución.

Se halló disolución o lixiviación parcial de los diversos elementos calcáreos que componen los ejemplares (fósiles y matriz). Otro proceso menos importante desde el punto de vista volumétrico es la oxidación (3.5%) parcial de la roca con hematita y limonita. Estos minerales forman un anillo concéntrico en el borde externo y son los responsables de la coloración amarilla irregular. Las huellas de disolución fueron producidas esencialmente por la penetración de fluidos ácidos (agua lluvia). Adicionalmente, se desarrollaron algas en o cerca de la superficie externa, y se acumularon partículas carbonosas en el mismo lugar por contaminación. Por esta razón, la roca exhibe una tonalidad negra en la cara que está expuesta a condiciones atmosféricas.

Imagen 30. Microfotografías de las muestras TE-58-2008. I-13. Se observan los diferentes poros e intersticios generados por las estructuras esqueléticas del coral.



Fuente: Universidad Externado de Colombia, 2009

4.3.3 Identificación del tipo y grado de humedad en

Con base a los análisis realizados a superficie de la roca de la muralla por la Universidad Externado de Colombia, y la tipología de humedades reconocidas por este proyecto, se realizó una determinación del grado y tipo de humedad que sufre la muralla para el tramo y una estimación de la vulnerabilidad que tiene el material pétreo con relación a estos resultados. Las cartografías de las otras secciones de caso de estudio aparecen en el Anexo 4.

4.3.3.1 Humedad por Capilaridad

Las mediciones realizadas por la Universidad Externado de Colombia (2009) determinaron la presencia de un *zócalo capilar definido*, que aunque no se aprecia a simple vista, puede alcanzar un promedio de 1 metro de altura (Imagen 31).

Imagen 31. Humedad por capilaridad

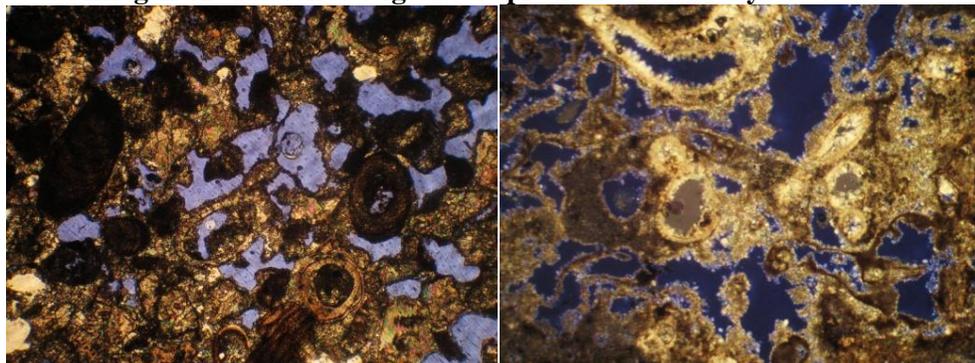


Fuente: Universidad Externado de Colombia, 2009

Se observó que de acuerdo a la pendiente del terreno, la ubicación geográfica del muro y el grado de exposición que tiene a la incidencia del viento y del sol, la humedad ascendente puede disminuir o aumentar de acuerdo sea el caso (ver Imagen 36). Las orquedades irregulares de cada material permiten el ingreso de la humedad al muro, pero al mismo tiempo, favorecen el proceso de transferencia horizontal del vapor de agua hacia el exterior.

De la caracterización de material mencionado en los análisis precedentes, se observó que las piedras del tipo Boundstone presentan mayor cantidad de poros y un tamaño mayor que las piedras de tipo Grainstone (Ver la Imagen 32), en la cual las zonas azules corresponden a poros y orquedades de los materiales. Esto conlleva a las piedras Grainstone por reducido tamaño de poros a tener dificultades en el proceso de transferencia de humedad y favoreciendo a la capilaridad.

Imagen 32. Secciones delgadas de piedra *Boundstone* y *Grainstone*



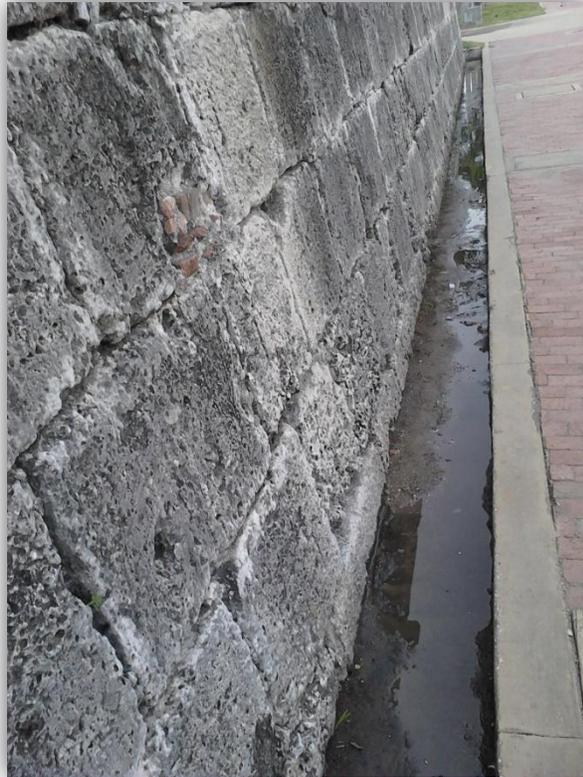
Fuente: Universidad Externado de Colombia, 2009

Este tipo de humedad se presenta después generalmente después de altas temporadas de lluvia y con bajas temperaturas y brillo solar, como las presentadas durante la época humedad.

4.3.3.2 Humedad accidental

En la inspección realizada el día 12 de Noviembre de 2011 por este proyecto, muestra que esta condición se relaciona con el estado y mal funcionamiento de los canales presentes en la base de las murallas (Imagen 33), situación que no ha cambiado desde la primera medición. La acumulación y el estancamiento de agua constituyen una fuente constante de humedad, que se acentúa principalmente hacia esquinas aumentando el nivel alcanzado por la humedad por capilaridad en estas regiones y haciendo a estas zonas aun más vulnerables.

Imagen 33. Canal en mal funcionamiento



Fuente: El Autor, 2011.

Este tipo de humedad se presenta después generalmente después de altas temporadas de lluvia y con bajas temperaturas y brillo solar, como las presentadas durante la época humedad.

Se reconoció que en bajas cantidades, los aires acondicionados y un grifo de agua de la Alcaldía Mayor de Cartagena adicionan una fuente de humedad al muro. Lo anterior debido a que éstos drenan en la plataforma de la cortina, la cual a su vez drena hacia los canalillos de la muralla, quienes por su limitada capacidad hidráulica (debido a la acumulación de basuras en ellos) retienen el agua prolongadamente. Esta condición genera vulnerabilidad en los canalillos del remate superior y los sillares cercanos a la estructura de drenaje.

Imagen 34. Drenaje de grifo de agua en la Alcaldía Mayor de Cartagena y su efecto sobre la humedad de las rocas de la muralla.



Fuente: El Autor, 2011.

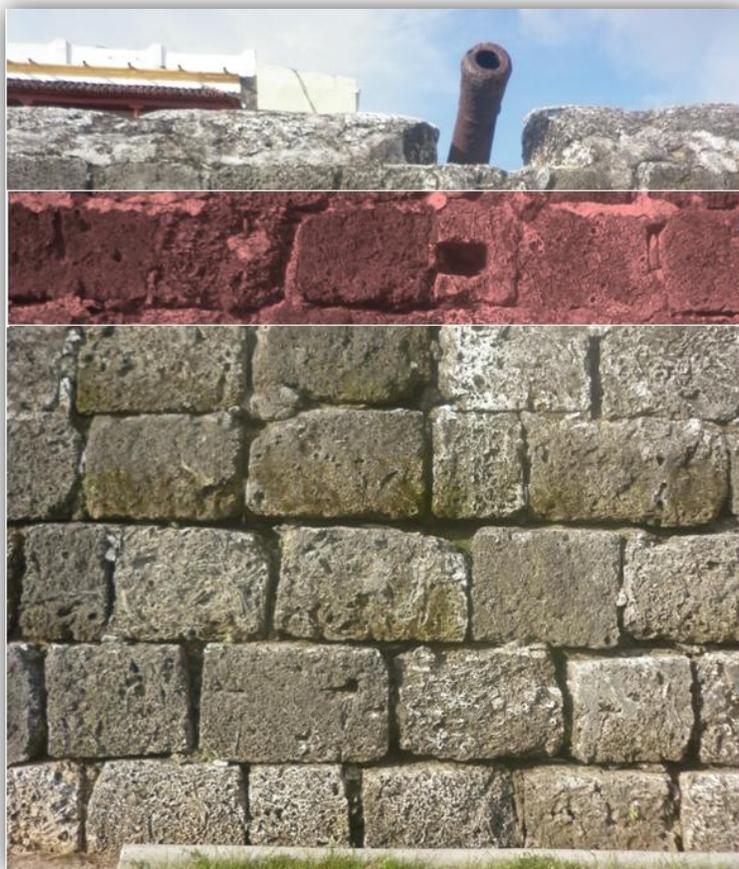
4.3.3.3 Humedad por infiltración

Se reconocieron a lo largo de la muralla diferentes fenómenos relacionados con la infiltración de las aguas lluvias, escurrimientos, drenajes pluviales, aspersion marina y salpicaduras.

Se determinó que en la zona del remate superior de la muralla, agua proveniente de la precipitación que ingresa de manera directa a los muros y en aquellas áreas planas como el solado, el agua lluvia tiende a estancarse para luego pasar al muro; este fenómeno ocurre de manera similar en el cordón de la muralla y en las cornisas y salientes de las garitas.

En las zonas del remate superior de la muralla donde existe el peripeto curvo, el ángulo de inclinación permite que el agua lluvia descienda por la escarpa. Esto explica en parte por qué los extremos más superiores en estas secciones del lienzo, presentan un contenido de humedad menor (además de estar más expuestos) mientras que, la hilera de piedras inmediatamente debajo del peripeto, presenta una mayor humedad debido al recorrido del agua que termina de ingresar al muro por infiltración (ver Imagen 35).

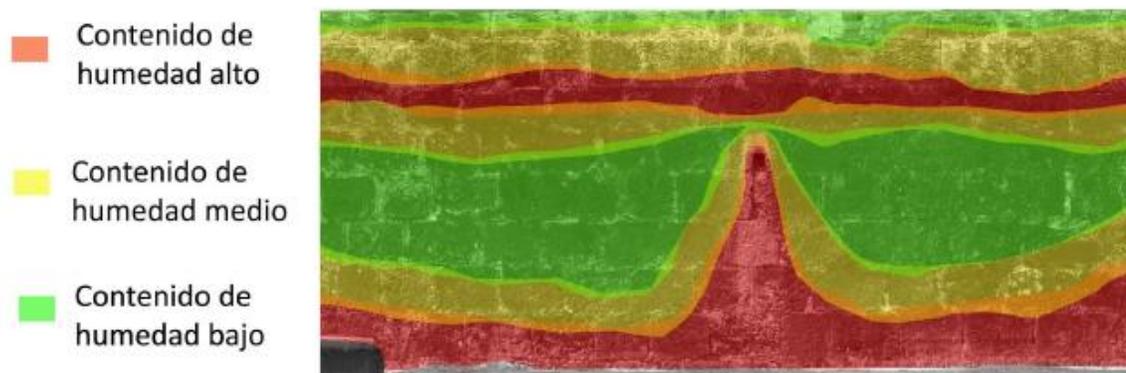
Imagen 35. Área de la escarpa inmediatamente inferior al peripeto en donde se acumula la humedad



Fuente: Por el Autor, 2011

El ingreso de humedad por infiltración en los muros, es la causa que explica el contenido elevado registrado en las mediciones a distintas alturas, coincidiendo con estas fuentes constantes de humedad (ver Imagen 36).

Imagen 36. Cartografía de Humedad en una Sección



Fuente: Universidad Externado de Colombia, 2009

Debido a la cercanía con el mar, la muralla sufre un tipo de humedad poco convencional, y es la humedad por aspersión marina, en la cual el viento rocía en pequeñas proporciones el agua de mar sobre la escarpa. Este tipo de humedad no fue cuantificado, pero si fue reconocido dado que es responsable que de la inclusión de sales solubles marinas al material pétreo después de que esta se evapora (ARNOLD & ZEHNDER, 1988). La zona más afectada es indudablemente el Baluarte de San Ignacio debido a estar más expuesto al viento y la cantidad de humedad proporcionada depende de la velocidad y orientación del viento, siendo de acuerdo con la sección 4.2.1.1 la época seca en la que se presenta con mayor fuerza.

Con el fin de analizar si las corrientes de agua que fluyen por los drenajes y las escarpas de los lienzos de muralla, están causando el desprendimiento y transporte de los materiales que conforman su perímetro mojado; se desarrolló el siguiente procedimiento, haciendo las consideraciones a mencionar:

4.3.4 Evaluación de la erosión por escorrentía

Para esta evaluación se dividió el recorrido del flujo en dos partes:

1. Paso por la canal
2. Pasa sobre la escarpa inmediatamente perpendicular al canal

Para ambos casos se asumió que el ancho promedio de la película de agua que baja sobre la escarpa es de es igual al ancho promedio de la base de los canalillos del sistema de drenaje, siendo este ultimo valor igual a 17cm; y se implementó la tabla de coeficiente de Manning realizada por el Dr. Ven Te Chow, en la que bajo la consideración el material como *roca cortada* se obtuvo un valor de $n= 0.035$.

Implementando las fórmulas No. 5 y 6 expresada en la sección 3.3.2.4, se presenta los resultados de estas operaciones se presentan en la Tabla 14:

Tabla 14. Velocidades máximas para los recorridos Considerados

| Periodo de Retorno (años) | Qmaxp(L/s) | 1er Recorrido | | 2do Recorrido | |
|---------------------------|------------|---------------|----------|---------------|----------|
| | | hp (m) | Vp (m/s) | hp (m) | Vp (m/s) |
| 5 | 4.4 | 0.598 | 0.0433 | 0.0342 | 0.86 |
| 10 | 4.5 | 0.06 | 0.441 | 0.0366 | 0.891 |
| 15 | 5.02 | 0.066 | 0.449 | 0.037 | 0.895 |
| 20 | 5.5 | 0.07 | 0.462 | 0.0399 | 0.926 |

Fuente: El Autor, 2011.

Comparando con el valor de velocidad máxima permisible de 3m/s registrada por RAS correspondiente sobre canales de rocas calcáreas compactadas, se determinó que esta velocidad no presenta una amenaza sobre el material. Sin embargo, es necesario tener presente que aunque la velocidad no supera el valor establecido, el deterioro del monumento puede ocasionar una disminución en la resistencia en donde a largo plazo esta velocidad pudiese causar notables efectos.

4.3.5 Evaluación de la Presión de Cristalización

Con ayuda de Autocad 2009 se analizaron las imágenes de sección delgada y se estableció aproximadamente cual era el área de los poros que se encontraban en la imagen. Una vez establecido esto, se calculo el radio aproximado de cada uno de los poros considerados y se realizo una distribución de estos poros en grupos (tabla 15). Del análisis de las imágenes se

puedo determinar que las rocas examinadas eran mesoporosas y su distribución se muestra en la Tabla 16.

Tabla 15. Intervalos para la distribución de radios de poros

| I | II | | III |
|-------------|-----------|----------|------------|
| < 0.00001 m | 0.00005 m | 0.0001 m | > 0.0001 m |

Fuente: El Autor, 2011.

Tabla 16. Distribución de poros en la Roca

| Rango | T58-I08 | T59-I09 | T58-I13 |
|-------|---------|---------|---------|
| I | 37% | 50% | 19% |
| II | 41% | 39% | 49% |
| III | 22% | 11% | 32% |

Fuente: El Autor, 2011.

Una vez obtenida esta distribución se procedió a calcular las máximas presiones teóricas resistidas por los poros:

Tabla 17. Presiones Máximas Teóricas para los grupos de Poros

| Presiones Máximas Teóricas | P (MPa) |
|----------------------------|---------|
| I | 0.0668 |
| II | 0.0222 |

Fuente: El Autor, 2011.

Los resultados de las presiones por grupo distribuido, el cálculo de la relación C y la presión total recibida en los poros de la roca analizados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 18. Presiones parciales para los grupos de Poros y las presiones totales para cada muestra analizada

| | I | | II | | Presion Total (MPa) |
|----------------|--------|---------|--------|---------|---------------------|
| | C | P (Mpa) | C | P (MPa) | |
| T58-I08 | 1.6923 | 0.1130 | 1.8462 | 0.0410 | 0.1540 |
| T59-I09 | 4.7143 | 0.3149 | 3.7143 | 0.0825 | 0.3974 |
| T58-I13 | 0.5833 | 0.0390 | 1.5000 | 0.0333 | 0.0723 |

Fuente: El Autor, 2011.

Puesto la Presión de Cristalización Total ejercida por el cloruro de sodio (NaCl) están muy por debajo del valor máximo a la tensión de las rocas de la muralla determinado por el Dr. Álvaro Covo como 0.928Mpa, se considera que este tipo de sal no representa una amenaza para los mesoporos del material. Sin embargo, no se descarta la vulnerabilidad a otro tipo de sales.

4.3.6 Evaluación de la Presión de Hidratación

Según el CIOH, Los valores de humedad relativa presentada en la ciudad de Cartagena, los cuales se encuentran entre 79 y 82%, y la temperatura promedio de 30°C aproximadamente; se determinó por asociación con los valores de la Tabla 3 que el yeso, el cual fue detectado en la superficie dentro de las caracterizaciones el material en las pruebas realizadas por de la Universidad Externado, puede hidratarse a una humedad relativa de 80% y generar presiones de hasta 117 MPa, la cual supera por mucho la resistencia del material de piedra coralina la cual solo llega hasta el orden de los 0.928Mpa.

La presión de hidratación puede ocasionar, fisuras, fracturas, microfracturas y pérdidas de cohesión en el material.

4.3.7 Evaluación del la Precipitación de Sales

Con base a los rangos de valores de humedad relativa presentada en la ciudad de Cartagena, los cuales se encuentran entre 79 y 82%, y la temperatura promedio de 30°C aproximadamente; se determinó por asociación con los valores de la Tabla 4 que sales como el cloruro de sodio (NaCl) y la antracita ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) muy poco se precipitan, siendo esto debido a que la ciudad maneja en promedio humedades relativas muy por encima de su humedad de equilibrio.

Sin embargo, el material aun es susceptible a la precipitación de sales como Thenardita (Na_2SO_4) que se precipita en un rango de humedad relativa promedio muy cercana a la de los meses de octubre y noviembre.

4.4 DIAGNÓSTICO DE LAS PATOLOGÍAS

4.4.1 Reconocimiento de los Patrones de Deterioro Influenciados por la Humedad y Salinidad

Dentro de la inspección realizada el 13 de octubre al Baluarte de San Ignacio y el 3 de Noviembre a la cortina hacia el Baluarte San Juan Evangelista, se reconocieron los siguientes patrones de deterioro con relación a la humedad y salinidad:

☞ Fracturas:

Aunque la gran mayoría de estos patrones de deterioro detectados en el caso de estudio tenían orígenes antropogénicos o geológicos, también se pudo detectar un notable efecto de disolución calcárea por las condiciones de interperismo y problemas de humedad en el suelo (Véase Imagen 37). La aparición de este patrón es más propensa en la época de transición y humedad de la ciudad, y en las zonas de la escarpa que están más expuestas a la intemperie.

Imagen 37. Fracturas en el Material Pétreo



Fuente: Por el Autor, 2011

☞ Fisura y Microfisuras:

Este fenómeno se pudo asociar con el efecto de disolución química y física que provoca el agua precipitada y puede aparecer en zonas que tengan contacto directo con la precipitación ó por infiltración en el material. Este patrón de deterioro cobra más fuerza en la época húmeda cuando las precipitaciones son más frecuentes (Imagen 38). También puede aparecer debido las altas presiones de hidratación que sufre el material, en la época humedad.

Imagen 38. Fisuras y Microfisuras en el Material Pétreo



Fuente: Por el Autor, 2011

☞ Desmoronamiento y Desintegración Granular

Este proceso toma origen en la pérdida física o de resistencia del material aglutinante en la matriz de la roca, por efectos de la meteorización superficial física y/o química en ella. Este proceso puede ser acentuado por el paso de la escorrentía en la superficie de la escarpa e hidratación y cristalización de sales en la época de húmeda. (Véase Imagen 39).

Imagen 39. Desmoronamiento y Desintegración Granular en el Material Pétreo



Fuente: Por el Autor, 2011

☞ Disolución

La acción continua del agua sobre la superficie de una roca puede generar una disolución en la esparita y la micrita (que es más susceptible que la esparita). Este proceso se puede dar debido a la precipitación, deposición de humedad atmosférica ó que la superficie del sillar esté expuesta constantemente a humedades. Este fenómeno se pudo encontrar

mayormente en los sillares que componen el pie de muralla y en las esquinas de los canales donde se acumula el agua por problemas en el drenaje. Del mismo modo se pudo observar en los sillares del remate superior que hacen parte del sistema de drenaje (Imagen 40).

Imagen 40. Disolución en el Material Pétreo en un sillar del remate superior



Fuente: Por el Autor, 2011

☞ Erosión Diferencial

Este fenómeno se presenta en 2 modalidades que son: Pérdida de los componentes y pérdida de la matriz, y se pudo observar en todos los análisis de secciones delgadas realizados a las piedras de la estructura, durante las evaluaciones de la Universidad Externado de Colombia, partiendo ambos procesos de una disolución.

A nivel microscópico, de acuerdo al grado de empaquetamiento y el tipo de matriz en la que se encuentran los fragmentos aloquímicos de cada roca la erosión puede ser más fuerte. A nivel macroscópico se encontraron varias rocas del remate superior en donde la separación entre sus fragmentos aloquímicos era relativamente grande (no había contacto entre ellos) y se puede ver en las Imagen 41 y 42.

Imagen 41. Erosión Diferencial por pérdida de componentes en el Material Pétreo



Fuente: Por el Autor, 2011

Imagen 42. Erosión Diferencial por pérdida de la matriz en el Material Pétreo



Fuente: Por el Autor, 2011

Este patrón de deterioro encuentra su origen en la disolución química causada por la precipitación, la Hidratación/Cristalización de las sales solubles en los poros cercanos a los fragmentos aloquímicos, la erosión de la escorrentía superficial y la disolución causada por colonización biológica, entre otras.

∞ Redondeo

Este tipo de erosión es común entre los sillares que componen la escarpa y su presencia se intensifica en los que están cerca del sistema de drenaje de la muralla. La existencia de estos patrones sobre los sillares es atribuida a la escorrentía de los sistemas de drenaje y a la desintegración granular en las secciones angulares de los mismos (Ver Imagen 43).

Imagen 43. Redondeo en el Material Pétreo



Fuente: Por el Autor, 2011

☞ Costras Negras

Se asocia con la contaminación ambiental producto del parque automotor transita alrededor de la muralla y en algunos raros casos, por la acción de colonizaciones biológicas (Broto, 2005).

Este patrón de deterioro se pudo reconocer fácilmente en las imágenes de las secciones delgadas y por los análisis estratigráficos hechos a la roca por la Universidad Externado de Colombia (Véase Sección 4.3.2). El proceso de formación sobre los sillares en el ambiente húmedo se explicó con anterioridad y su consideración es de vital importancia por su relación con la acción de la lluvia, el viento húmedo y la salinidad. Las costras negras se presentaron con mayor incidencia sobre la cortina del Baluarte San Juan Bautista por su cercanía con la vía y pueden provocar a largo plazo alteraciones como: ampollas, disgregación, disolución y depósitos.

Imagen 44. Costras Negras sobre el Material Pétreo



Fuente: Por el Autor, 2011

☞ Costras Blancas ó Salinas

Esta alteración es producida principalmente por la acumulación de sales solubles como cloruros, nitritos, nitratos y sulfatos alcalinos contenidos en el suelo, arrastrados por el aire o por productos de limpieza que reaccionan con la superficie de los sillares. En algunos casos las irregularidades de las rocas causadas por fracturas, fisuras, alveolización, erosión y disolución se convierten en áreas sensibles para la formación de estas costras. Aunque macroscópicamente no se pudo reconocer su presencia, en los análisis SEM-EDX realizados sobre la muralla, se logró detectar cristales de cloruros alcalinos, cuya hidratación o cristalización puede traer otros problemas como fracturas, fisuras, eflorescencias, etc.

Cabe anotar que la deposición de sales propias del ambiente por si solas no implican formación de costras, es este procesos acompañado de ciclos de humectación y secado lo que le da la adherencia al sustrato y la formación textural, física y química a la costra (ICOMOS, 2010). Del reconocimiento meteorológico realizado a la ciudad de Cartagena se estimó que la época de transición y la húmeda (en reducida proporción) son los posibles periodos de formación de estas costras.

☞ Depósito

Se refiere a las secreciones de aves, hollín, sales y minerales, que por aspersión del viento y lluvia pueden quedar depositadas sobre las rocas de la escarpa. Este patrón también fue detectado por la acción indirecta de la acumulación de agua en el pie de muralla, la cual al salpicar por el desmoronamiento del material lleva consigo contaminantes y minerales, que al secarse quedan fijados sobre la superficie.

De la Estimación de depósitos atmosféricos realizada durante esta investigación y los análisis SEM-EDX realizados por la Universidad Externado de Colombia, 2009, se pudo confirmar la presencia de capas de sales (cloruros, sulfatos y nitratos) sobre la superficie de la roca con variaciones significativas que este estudio atribuyo a las velocidades y direcciones de viento registradas.

Por su correlación proporcional con la velocidad de viento, se considera que la deposición debe aumentar en la época seca y disminuir en la época húmeda, pese a los lavados provocados por la escorrentía superficial (Grossp & Esbert, 1994).

☞ Decoloración

Este patrón de deterioro se pudo reconocer en sus subtipos: Blanqueamiento, Área Húmeda y Tinción. La aparición del primero se puede apreciar en los remates superiores de los merlones y es atribuida a la meteorización química y física de la estructura; también puede ser encontrada en los sillares cercanos a los canalillos producido por el efecto disolvente del agua como se muestra en la Imagen 45.

De igual forma el Área Húmeda está relacionada con la acumulación e infiltración del agua cerca de los sillares que componen el sistema de drenaje. Se puede encontrar en el remate superior como una gran franja a la altura de los canalillos, en los sillares que llegan a tener contacto con la caída o película de agua producida por la escorrentía superficial, en los sillares de las equinas de los pies de muralla, donde se retiene el agua por problemas de drenaje y cerca de los sillares entre los que se filtra el agua de la estructura. Este patrón es más evidente en la época húmeda del año y lugares poco expuestos a la acción del sol o el viento.

Imagen 45. Decoloración en la superficie del Material Pétreo



Fuente: Por el Autor, 2011

☞ Eflorescencia

De los análisis EDX realizados se reconocieron (TE-59-2008 I-01) cristales de sal como cloruros alcalinos, nitritos, nitratos y sulfatos. Se ha supuesto su origen a la acumulación de sales detectadas en el ambiente que rodea la estructura. Sin embargo la fuente principal de los nitratos y nitritos es la materia orgánica que se encuentra en el suelo, como producto del metabolismo de agentes biológicos o por desechos humanos.

Los sulfatos por su parte, generalmente suelen formarse de ambientes contaminados y por ascensión de sales del suelo de los contaminantes ambientales. Otra de las fuentes identificadas para la aparición de los sulfatos pudo ser el cemento Portland, que hace parte de los componentes de algunos de los morteros utilizados en intervenciones sobre la muralla. Este patrón de deterioro es más propenso a aparecer en ambientes húmedos como la época de transición y la época húmeda de la ciudad sobre irregularidades en el material, como las causadas por los procesos de alveolización, fracturas y fisuras, las cuales no tienen contacto

directo con el agua precipitada, así mismo en áreas húmedas cerca de los sistemas de drenaje o puntos de infiltración de la estructura.

☞ Incrustación

Ésta, está causada principalmente por el sulfato de calcio y los carbonatos, que se depositan en la superficie de forma compacta, cuya relación con el sustrato pone en riesgo su remoción. Las incrustaciones más evidentes se localizan en la base de los flancos del Baluarte San Ignacio, los cuales lastimosamente están siendo utilizados como “baños públicos” por los indigentes y vendedores ambulantes. Dada la exposición de forma continua a la orina, son propensas a la proliferación de bacterias nitrificantes, las cuales con el tiempo transforman dicha orina en nitritos y nitratos que pueden generar una pulverización del material. En la Imagen 46 se observa el flanco derecho del Baluarte San Ignacio, en el que se puede observar claramente el patrón antes descrito.

La identificación de los carbonatos del calcio en la roca está basada en los análisis de sección delgada realizados (Véase Sección 4.3.2).

Imagen 46. Incrustaciones sobre la escarpa del Baluarte San Ignacio



Fuente: Por el Autor, 2011

☞ Colonización Biológica

Debido a los alcances económicos y académicos de este estudio, no se discrimino detalladamente los subtipos de colonización biológica. Sin embargo a nivel general, se pudo encontrar grandes recubrimientos de capas biológicas enraizadas sobre las irregularidades de los sillares. Sin duda debido a su cercanía con el entorno silvestre del Parque de la Marina fue la cara SE del Baluarte San Ignacio, el sector con mayor presencia de este patrón. Se pudo reconocer macroscópicamente la presencia de hongos, telarañas, nidos, plantas, musgos y algas en muchos de los sillares del caso de estudio. Se encontró como factor común la aparición de plantas mayores enraizadas en los sillares de los canalillos, así como también en algunos sectores donde había ausencia de sillares, en las esquinas de los pies de muralla, en la franja húmeda de la escarpa, donde se perdió la argamasa y había infiltraciones en la estructura.

La colonización biológica tiene como efectos secundarios daños mecánicos sobre los sillares, debido a las presiones ocasionadas por las raíces y la fijación de minerales que pueden causar manchas o impregnaciones.

Es pertinente aclarar que algunos deterioros estudiados anteriormente, no se presentan de manera homogénea sobre la roca de la escarpa de la muralla, esto debido a que no todas han estado expuestas con la misma intensidad a los factores agresores de la muralla. De manera muy general se pudo observar una mejor condición física en las piedras del remate superior del Baluarte de San Ignacio que en el resto de las áreas del tramo evaluado, atribuyéndose esto a que muchas de ellas habían sido restituidas recientemente.

Imagen 47. Colonización Biológica la escarpa del Baluarte San Ignacio



Fuente: Por el Autor, 2011

4.4.2 Otros patrones de relevancia indirecta

Dentro de este estudio también se pudo identificar patrones de deterioro, que si bien no tienen origen en la humedad o salinidad, éstas pueden magnificar la aparición de los patrones de deterioro.

☞ Pérdida de Sillares o Argamasa

La ausencia de sillares dentro de la estructura aumenta el área expuesta al ambiente salino y permite la acumulación de sales y afloramientos, que pueden tener repercusiones sobre los sillares adyacentes.

Imagen 48. Perdida de Sillares y Argamasa en el Baluarte San Ignacio



Fuente: Por el Autor, 2011

☞ Alveolización

Este fenómeno se encontró en casi todas las rocas de la escarpa y es principalmente producido por la acción del viento de la época seca de Cartagena. Sin embargo, la cristalización de las sales solubles en el interior de los poros puede intensificar el tamaño de las cavidades (Fitzner, B. & Heinrichs, K. 2004). Las cavidades formadas durante el desarrollo de este patrón contribuyen a la formación de depósitos, eflorescencias y colonización biológica (Ver Imagen 49). Dicho patrón de deterioro se acentúa más en las caras del Baluarte San Ignacio, entendiendo que éste coincide por su emplazamiento geográfico con la trayectoria de los vientos de la época seca y menormente con los de la época de transición y la época húmeda.

Imagen 49. Alveolización sobre la escarpa del Baluarte San Ignacio



Fuente: Por el Autor, 2011

☞ Arañazos

Estos se consideraron de origen antropogénico, pero pueden representar zonas adicionales para la deposición de sales y contaminantes.

Imagen 50. Arañazos sobre la escarpa del Baluarte San Ignacio



Fuente: Por el Autor, 2011, 2011

Como adición a este estudio se realizó una matriz donde se relaciona conceptualmente las patologías de origen Salino y húmedo con el resto de patologías, esta matriz se encuentra en el Anexo 3.

4.5 COMPARACIÓN DEL ESTADO DEL MATERIAL CON RESPECTO A ESTUDIOS ANTERIORES

4.5.1 Estudio de Patologías 2003 Vs. Estudio Actual

Comparando las patologías y las descripciones hechas sobre su origen y forma sobre la estructura, se puede reconocer que muchas de estas coinciden con las encontradas en sobre el tramo en la actualidad. Aunque el estudio precedente no clasificó sus patrones de deterioro sobre un marco referencia como el glosario ICOMOS o cualquier otro sistema de referencia, su descripción detallada permitió el asociar algunas de las alteraciones con definiciones y la presencia de estas en la actualidad, hubo coincidencias en la presencia de:

- ☞ Grietas
- ☞ Costras Negras
- ☞ Erosión por el acción del viento
- ☞ Erosión Diferencial
- ☞ Disolución por Escorrentía
- ☞ Pérdida de elementos
- ☞ Zonas húmedas en el pie de muralla.

Asimismo, tuvo aciertos en el identificación del efecto erosivo del viento y el agua sobre los sillares de la escarpa, la ausencia de sillares y argamasa, el taponamiento y acumulación de agua en los sistemas de drenaje generando un capilaridades sobre la base de la escarpa, queriendo con esto que la problemática se remontan a mas de 8 años.

Comparando las fotografías registradas de algunos de los patrones de deterioro y las condiciones de al escarpa en el 2003, se pudo establecer que a la fecha no ha habido cambios drásticos entre las condiciones físicas, pero si es perceptible un aumento notable

en la deposición de hollín y formación de costras negras sobre la estructura. La Imagen 51 es un ejemplo de la deposición, formación de costras negras y muestra de una intervención realizada a la escarpa de la estructura (la inclusión de tuberías permanece todavía, encontrándose tapada parcialmente por el mortero).

Imagen 51. Comparación estado de la escapara del Baluarte San Ignacio 2008 y 2011

A la derecha, imagen tomada el 08/09/2011
y a la izquierda tomada en el 2003.



Fuente: Informe Patología Estructural: Baluarte San Ignacio, 2003 y El autor, 2011

4.5.2 Comparaciones con el Diagnostico del sistema de Drenaje y de los Factores Ambientales y Climáticos en la Restauración de los Lienzos de Muralla en la ciudad de Cartagena en 2008

En este estudio relacionó algunas de las condiciones ambientales que podrían causar patrones de deterioro implementando entre sus pruebas la estimación de las tasa de deposición de sales, caracterizaciones fisicoquímica del aguas precipitada.

☞ Tasa de deposición de Cloruros y Salinidad

La estimación de la tasa de deposición de sales en el estudio del 2008, no tuvo registro la velocidad de vientos tenida en la fecha del muestreo, por ello lo para hacer la comparación se indago cual era la velocidad promedio del intervalo de tiempo en que los testigos estuvieron expuestos. Los datos obtenidos por el estudio 2008 y los actuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 19. Comparación de Tasas de deposición 2008 y 2011

| Muestra | Fecha | Tasa de deposición de salinidad (g/ m ² . Año) | Tasa de deposición de cloruros (g/ m ² . Año) | Velocidad de viento (km/h) |
|---------|--------------------------------|---|--|----------------------------|
| 1 | 25/03/2008 hasta el 01/03/2008 | 3.3416 | 2.08 | 27.55 |
| 2 | 25/03/2008 hasta el 15/03/2008 | 4.2187 | 2.45 | 23.37 |
| 3 | 25/03/2008 hasta el 25/03/2008 | 3.9765 | 2,321 | 23.73 |
| 1 | 09/10/2011 hasta 10/10/2011 | 0.11 | 1.07138 | 18 |
| 2.a | 13/10/2011 hasta 14/10/2011 | 0.15 | 1.1145 | 10.4 |
| 2.b | 13/10/2011 hasta 14/10/2011 | 0.15 | 1.1605 | 10.4 |

Fuente: Diagnostico del sistema de Drenaje y de los Factores Ambientales y Climáticos en la Restauración de los Lienzos de Muralla en la ciudad de Cartagena y El autor, 2011.

De lo anterior se puede observar que los datos 2008 fueron tomados en la Época de Transición del año, donde los vientos son medianamente fuertes y la humedad es mucho más alta mostrándose entonces con valores más altos que los que fueron tomados en la época humedad. Esta acumulación constante como se menciona anteriormente colabora a la formación de costras, depósitos e incrustación y el poder reconocer tal aumento nos permite confirmar que en estos meses del año el material es más vulnerable.

☞ Calidad de Agua de Lluvia

Como parte del análisis de ambiental realizado por ambos estudios se estableció las características fisicoquímicas del agua precipitada, determinando el pH, Sulfatos y la acidez. Se compararon los valores obtenidos, pudiendo observar con esto que: Un gran incremento en la acidez del agua, no hubo diferencias significativas en el pH y un pequeño incremento la cantidad de sulfatos, relacionándose tales fenómenos con el incremento de la contaminación atmosférica debido al incremento del parque automotor en la diferencia de años. Las diferencias mencionadas se pueden encontrar en la siguiente tabla:

Tabla 20. Comparación de muestras de agua precipitada 2008 y 2011

| Fecha de Muestreo | Acidez, (g/l como CaCO_3) | pH, unidades | Sulfatos, mg/l |
|-------------------|-------------------------------------|--------------|----------------|
| 24/11/2008 | 4 | 6.52 | 0.31 |
| 25/11/2008 | 2.5 | 6.5 | 0.39 |
| 02/10/2011 | - | 6.43 | 0.57 |
| 10/10/2011 | 25 | 6.38 | 0.22 |
| 13/10/2011 | 29.49 | 6.41 | - |

Fuente: Diagnostico del sistema de Drenaje y de los Factores Ambientales y Climáticos en la Restauración de los Lienzos de Muralla en la ciudad de Cartagena y El autor.

Si dicho aumento es continuo con respecto tiempo, la acumulación de sulfatos por infiltración del agua de lluvia y la acidez podrían traer fuertes efectos de formación de costras, disolución y erosión diferencial, que podrían llevar a comprometer la escarpa y el resto de la estructura del material pétreo.

4.6 RECOMENDACIÓN DE PRESERVACIÓN Y RESTAURACIÓN

Partiendo de las condiciones ambientales, de la caracterización del material y sus daños, se plantean las siguientes medidas:

- ☞ **Limpieza:** Dadas las condiciones de acumulación de sales, contaminantes y otros depósitos sobre la superficie del sillar, es necesario previo a cualquier otro tipo de

tratamiento la limpieza de la superficie. Debido a la importancia del patrimonio cultural y a la edad de estas rocas, se recomienda: Para el Balarte de San Ignacio, el cual posee en gran parte de su estructura irregularidades en la superficies de sus sillares, la implementación de los métodos manuales de remoción como lijas, piedras pómez ó espátulas; mientras, que para la cortina que posee una superficie mucho más lisa y uniforme, se puede implementar el método de chorro de agua o manuales de remoción como el caso anterior, recomendando particularmente este último por su delicadeza.

- ☞ **Restitución de sillares y argamasa:** Durante la investigación se pudo observar la ausencia de estos elementos, convirtiendo estos sectores en áreas vulnerables al afloramiento biológico, acumulación de sales y contaminantes. Por ello se recomienda la restitución de los elementos faltantes, implementando materiales cuya caracterización sea similar a la de la estructura, preservando con esto la estética de la edificación y la homogeneidad de los materiales constructivos
- ☞ **Mantenimiento de los sistemas de drenaje:** En vista de la gran acumulación de sedimentos observada en los pie de muralla y los taponamientos en los canalillos que limitan la capacidad hidráulica de estos y que propician los afloramientos biológicos y el nivel de capilaridad, se recomienda una limpieza y una adecuación de los mismo evaluando los rangos de funcionamiento.

Asimismo se recomienda que se planteen otros medios de drenaje para la plataforma como forma de minimizar el caudal de la escorrentía superficial sobre la escarpa.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Durante el presente trabajo, se confirmó que la muralla se encuentra expuesta a un entorno húmedo y salino altamente agresivo que compromete la integridad de su material pétreo. Con base los diagnósticos realizados se determinó que las causas del deterioro de la escarpa no solo se debe a la humedad climática natural, sino que factores antropicos como: el mal funcionamiento de los sistemas de drenaje (de baja capacidad hidráulica debido las basuras y sedimentos albergados en ello) y la contaminación atmosférica por quema cercana de combustible fósil y usos inadecuados ('Baño Publico'); acentúan los efecto degradadores.

Se determinó que la sección más vulnerable de la sección evaluada es el Baluarte San Ignacio debido que los patrones de deterioro que se presentan en él, se relacionan entre sí ocasionando un daño más grande sobre la estructura. Se estableció que el factor más agresivo fue la aspersión marina, pues introduce salinidad y humedad a la estructura fortaleciendo los procesos de cristalización, hidratación de sales y formación de costras e incrustaciones salinas. Asimismo se reconoció un notable efecto de la erosión eólica y de la colonización vegetal.

En cuanto a la formación de costras negras previamente mencionada, es necesario enfatizar que aunque el ambiente no presenta una contaminación excesiva como para que estas sean un peligro y una amenaza inmediata, la exposición a pequeñas concentraciones de sulfatos dispersadas en el aire si representan una amenaza a largo plazo. Es necesario aclarar que en las estimaciones de depósitos atmosféricos y las evaluaciones de calidad no se comprobó una presencia de sulfatos u óxidos de azufre, pero la inspección macroscópica, los análisis de secciones delgadas y los cortes estratigráficos si confirmaron la formación de costras negras.

El principal agravante de la cortina entre el Baluarte San Ignacio y el Baluarte San Juan Bautista es la contaminación atmosférica producida por la combustión fósil del parque automotor que rodea la estructura, la cual junto con las precipitaciones ha generado disoluciones y costras negras.

Producto de las comparaciones con estados anteriores se comprobó un aumento en las degradaciones del material debido principalmente a la acción indirecta de factores antropicos en el entorno y un aumento en las tasa de deposiciones de sulfatos, cloruros y nitratos.

De acuerdo a las condiciones observadas se estableció que el método más efectivo para el tratamiento de estas patologías son la reposición de sillares y la limpieza.

5.2 RECOMENDACIONES

Debido al bajo presupuesto de este estudio y el limitado tiempo de estudio, no se pudo cuantificar muchos de los daños encontrados en la estructura y tampoco determinar con precisión el grado de deterioro con relación al tiempo de exposición que provocan los patrones estudiados durante este proyecto. Por ello se recomienda que por medio de modelaciones matemáticas y por ensayos de reproducción de atmósferas se ahonde concretamente los efectos unitarios e combinados de los factores agresores.

Además se recomienda ampliar el alcance de este tipo de diagnósticos al resto de partes del elemento constructivo considerado (Garita, rampa, contraescaparpa, cimientos, etc.)

Asimismo se recomienda hacer un seguimiento multianual de las tasas de deposición de sales y las características fisicoquímicas del agua precipitada sobre la estructura, en busca de estimar las variaciones de la acidez en cada una de las épocas del año.

Es necesario indagar el efecto independiente de cada una de las variables examinadas por este trabajo, lo cual puede ser mediante cámaras aisladas que exponga al material a ambientes ácidos, salinos y húmedos para estudiar el efecto puntal de cada uno de estos factores, así como su acción en conjunto.

Es necesario realizar una investigación más profunda desde el punto de vista histórico, no solo limitándose a la evolución de la construcción si no relacionando este proceso a la evolución del entorno.

Este estudio también recomienda que la realización de un estudio de restauración y tratamiento del material pétreo y argamasa desacuerdo la vulnerabilidad a su entorno.

6 BIBLIOGRAFÍA

Alcaldía de Cartagena. (20 de 11 de 2001). DECRETO No. 0977 de 2001. DECRETO No. 0977 de 2001 . Cartagena.

ALCALDE, M., & MARTÍN, A. (1990). Morfología macroscópica de alteración acelerada de algunos materiales pétreos de monumentos de Andalucía - España. *Materiales de Construcción* , 1-27.

AMOROSO, G., & FASSINA, V. (1983). Stone decay and conservation. Atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection. *Material Science Monographs* , 453.

ARNOLD, A. (1976). Behaviour of some soluble salts in stone monuments. *2nd Intemational Symposium on the Deterioration of Building Stones*, (págs. 27-36). Atenas.

ARNOLD, A., & ZEHNDER, K. (1985). Crystallization and habits of salt efflorescences on walls 11. *Vth Intemational Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, (págs. 269-277). Lausanne .

ARNOLD, A., & ZEHNDER, K. (1988). Decay of stony materials by salts on humid atmospheres. *Congieess on Deterioration and Conservation of Stone.*, (págs. 138-148). Torun.

AUGER, F. (1989). World limestone decay under marine spray conditions. *The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin* , 65-69.

Barbosa, A., Buendía, C., & Cortes, L. (2007). Estudio Físicoquímico Del Deterioro Del Material Pétreo Estructural Antiguo De Las Murallas De Cartagena – Colombia (Baluarte De Santiago). *Ciencias E Ingeniería Al Día, revista de la Facultad De Ingeniería* , 3.

Blocken, B., & Carmeliet, J. (2004). A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* , 1079-1130.

BROTO, C. (2005). *ENCICLOPEDIA BROTO DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN*. Barcelona: Structure Barcelona.

Bustamante Patron, G. (1994). Conservacion de Cartagena e Impacto del Turismo. En *Seminario Taller: Rehabilitacion integral en areas y sitios historicos de Latinoamericanos* (págs. 177-183). Quito: Instituto Italo-Latinoamericano. Roma.

Cabelllos Barriero, E. (1991). *Cartagena de Indias, Mágica Acrópolis de América*. Madrid: Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos.

Cabellos, E. (2003). *CARTAGENA D YNDIAS, MAGICA ACROPOLIS DE AMERICA*. CARTAGENA: NORMA.

Cunin, E., & Rianudo, C. (2007). Las Murallas de Cartagena, entre patrimonio , turistico y desarrollo urbano. *Uninorte* , 1-16.

de Mayer, B., Mogollón, H., & Segovia Salas, R. (1987). *Las fortificaciones de Cartagena de Indias: estrategia e historia* . Cartagena: Carlos Valencia Editores.

DELGADO RODRIGUES, J. (1991). Causes, mechanisms and measurement of damage in stone monuments . *Science Technology and European Cultural Heritage* , 124-147.

Diccionario Enciclopedico Dominicano de Medio Ambiente. (01 de 01 de 2011). Recuperado el 12 de Agosto de 2011, de <http://www.dominicanaonline.org/DiccionarioMedioAmbiente/es/definicionVer.asp?id=144>

EVANS, I. (1970). Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue de Géomorphologie dynamique, XIX Année* , 153-177.

GOUDI, A., COOKE, R., & EVANS, I. (1970). Experimental investigation of rock weathering by salts. 42-48.

Grossp, C., & Esbert, R. (1994). Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. Revisión bibliográfica. *Materiales de Construcción* , 1-16.

GROSSP, C., & ESBERT, R. (1994). Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. Revisión bibliográfica. *Materiales de Construcción* , 1-16.

GUTIERRES, R., & ESTERAS, C. (1991). *Territorio y Fortificación*. Tuero.

Herrera Diaz, A. (2009). *Estudios y diseños técnicos para la restauración del lienzo de murallas entre el Monumento de la India Catalina y el Museo de la Marina, en Cartagena de Indias, D.T.* Cartagena de Indias D. T y C.: Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo (FONADE) y Ministerio de Cultura, documento inédito.

Herrera Diaz, A. (2008). *INVESTIGACIÓN CONSTRUCTIVA Y TIPOLÓGICA DE LA MURALLA*. Cartagena: Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo (FONADE) y Ministerio de Cultura, documento inédito.

ICOMOS. (2010). *ICOMOS-ISCS: Illustrated glossary on stone deterioration patterns*. Champigny/Marne, France: V. Vergès-Belmin.

Lewis, S. (1989). The susceptibility of calcareous stones to salt decay. *The Conservation of Monuments in the MediteiTanen Basin* , 56/63.

Lorimer, J., Mason, T., & Pinherio, H. (2001). Effect of some operational parameters on textile dye biodegradation in a sequential batch reactor. *Biotechnol* , 89,163.

Martínez, R. E., Cabrera, A., & Martelo, R. *Técnicas antiguas de construcción*.

Ministerio de Desarrollo Económico. (Noviembre de 2000). *REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO*. Bogotá.

Parker, A. (2001). *Contaminación del Aire por la Industria*. España: Reversé S.A., 1993.

PÜHRINGER, J. (1983). Salt disintegration. Salt migration and degradation by salt - a hypothesis. *Swedish Council for Building Research* , 159.

Quiñones, E., & Martinez Batista, H. (2008). Diagnostico del Sistema de Drenaje y de los Factores Ambientales y Climáticos en la Restauración de los Lienzos de Muralla en la Ciudad de Cartagena. *Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo (FONADE) y Ministerio de Cultura, documento inédito* .

Rodríguez, L. M. (1990). Corrosividad Atmosférica: (Micat-México). En L. Mariaca Rodriguez, J. Geneséa Llonguera, J. Uruchurtu Chavarin, & L. Salvador Hernandez, *Corrosividad Atmosférica: (Micat-México)* (pág. 192). Ciudad de Mexico: Plaza y Valdés S.A. de C.V.

Sica, Y. C., Kenny, E. D., Portella, K. F., & Campos Filho, D. F. (2007). Atmospheric corrosion performance of carbon steel, galvanized steel, aluminum and copper in the North Brazilian coast. *Journal of the Brazilian Chemical Society* , 1-7.

Sociedad de Mejoras Publicas. (26 de 02 de 2009). Actividades de Conservacion en los Ultimos 10 Años. Cartagena.

Sociedad de Mejoras Publicas. (2009). *Fortificaciones de Cartagena*. Recuperado el 15 de 09 de 2011, de http://www.fortificacionesdecartagena.com/es/fortificaciones/baluarte_san_ignacio.htm

7 ANEXOS

Anexo 1. Glosario de Términos

- **Alteración:** Modificación del material, que no necesariamente implica un empeoramiento en sus características del punto de vista conservativo. Por ejemplo, una capa reversible de revestimiento aplicada a una piedra puede considerarse como una alteración.
- **Daño:** Percepción humana de la pérdida de valor debido al deterioro.
- **Deterioro:** Cualquier modificación intrínseca de las propiedades físicas o químicas que llevan a una pérdida de valor o una dificultad para el uso.
- **Degradación:** Disminución de la condición, cálida, o funcionalidad.
- **Deterioramiento:** Proceso de convertirse en algo peor, en calidad, valor, esencia, etc...; despreciamiento.
- **Erosión:** Cualquier proceso químico o mecánico por el cual las piedras son expuestas a que, con el clima y el tiempo, sufran cambios de carácter y se deterioren.

Anexo 2. Caracterización del Material

| Muestra | Composición | Textura | Ambiente de Sedimentación | Porosidad |
|------------------|---|--|--|--|
| TE-58-2008. I-08 | <p>La muestra está fundamentalmente constituida por fragmentos aloquímicos calcáreos (63.5%) embebidos en micrita (o lodo calcáreo) (35%). Los aloquímicos están esencialmente representados por fósiles (o bioclastos) de: gasterópodos, algas rojas, bivalvos de concha gruesa, equinodermos (placas y espinas), foraminíferos y corales. Ellos se encuentran recristalizados y han perdido en general sus rasgos texturales originales. También en muchos casos están corroídos y disueltos. El lodo calcáreo, en algunos sectores se observa notoriamente lixiviado, mientras que en otros, recristalizado y transformado en microesparita.</p> | <p>La selección de los bioclastos oscila entre moderada y pobre. Ellos yacen flotantes o con contactos puntuales en medio de la matriz calcárea y en la mayoría de los casos han perdido sus rasgos texturales originales debido a recristalización.</p> | <p>Sector restringido, cercano a un crecimiento arrecifal (lagoon o zona submareal).</p> | <p>La porosidad fue estimada en 20% y fue creada en su mayor parte por disolución.</p> |

| | | | | |
|---|---|---|--|---|
| <p style="text-align: center;">TE-58-2008. I-09</p> | <p>La muestra está fundamentalmente constituida por fragmentos aloquímicos en su mayor parte cementados con calcita cristalina del tipo esparita (5.1%). En algunos sectores aislados, estos fragmentos aparecen aglutinados por lodo calcáreo (micrita: 3.3%). Los aloquímicos están únicamente representados por fósiles (90.4%). Es importante notar que muchos de ellos se encuentran disueltos y corroídos. Otros, debido a recristalización, han perdido sus características internas y sólo unos pocos han conservado sus rasgos estructurales originales. Haciendo parte de este conjunto se reconocieron: algas fosilizadas, foraminíferos, bivalvos (de concha gruesa), gasterópodos, equinodermos (placas y espinas) y corales</p> | <p>Los bioclastos están homogéneamente distribuidos en la roca, se encuentran bien seleccionados y en general se muestran recristalizados. Por esta razón, la textura interna original ha sido enmascarada. Los contactos entre ellos son predominantemente puntuales y en menor proporción, flotantes.</p> | | <p>La porosidad fue estimada en 14.5 % y es secundaria debido a que fue creada por disolución</p> |
|---|---|---|--|---|

| | | | | |
|-------------------------|---|--|--|---|
| <p>TE-58-2008. I-10</p> | <p>La muestra está predominantemente compuesta por fragmentos fósiles (33%) y cantidades irrelevantes de elementos terrígenos (1.5%), aglutinados por lodo calcáreo (micrita) (65.5%). La micrita, en muchos sectores está recristalizada (transformada en microesparita) o disuelta y corroída. También en algunas partes se encuentra reemplazada por óxido de hierro (hematita y limonita).. Por esta razón, la roca exhibe coloración amarilla superficial irregular. La fracción fósil está representada por: algas rojas, foraminíferos, equinodermos (placas y espinas), bivalvos, corales y briozoos. Muchos de ellos están completamente reemplazados por calcita cristalina. Sólo unos pocos conservan su textura interna original. La porción terrígena está constituida por: cuarzo (monocristalino y policristalino), feldespato tipo ortoclasa, minerales micáceos (moscovita) y minerales pesados (turmalina y horblenda).</p> | <p>La selección de los bioclastos oscila entre moderada y pobre. La mayoría ha perdido su textura interna debido a recristalización. Los contactos entre ellos son principalmente puntuales.</p> | <p>Sector restringido, cercano a un crecimiento arrecifal (lagoon o zona submareal).</p> | <p>La porosidad fue calculada en 15% y fue generada por disolución.</p> |
|-------------------------|---|--|--|---|

| | | | | |
|------------------|--|---|--|--|
| TE-58-2008. I-11 | La roca está esencialmente constituida por fragmentos aloquímicos representados por fósiles (80%) embebidos en lodo calcáreo (o micrita) (18%). La micrita se encuentra en su mayor parte, intensamente corroída y disuelta. En forma esporádica se observa parcialmente recristalizada (transformada en microsparita). Los bioclastos en general también están corroídos y disueltos y reemplazados por calcita cristalina. Se identificaron: algas rojas, briozoos, equinodermos (placas y espinas, corales y bivalvos de concha gruesa. | La selección de la fracción fósil es muy pobre. Los diversos bioclastos han perdido sus rasgos internos característicos debido a meteorización química. Ellos yacen flotantes o con contactos puntuales en medio del lodo calcáreo. | Sector restringido (lagoon o zona submareal) cercano a un crecimiento arrecifal. | La porosidad del ejemplar fue estimada en 19% y está representada por huellas de disolución. |
|------------------|--|---|--|--|

| | | | | |
|-------------------------|---|--|---|---|
| <p>TE-59-2008. I-01</p> | <p>La roca está esencialmente constituida por fragmentos fósiles (25%) diversos soldados por calcita cristalina (67%). Debido a que en algunos sectores, se observan concentraciones de lodo calcáreo (micrita) y “nubecillas” del mismo material en medio de la calcita cementante, se infiere que este mineral es el resultado de la recristalización de micrita. La mayoría de fósiles están corroídos y disueltos o recristalizados. Ellos están representados por: bivalvos de concha gruesa, corales, equinodermos (placas), algas fosilizadas y gasterópodos. Eventualmente se observan intraclastos (2%). Llama la atención que los poros internos de los fragmentos de coral, pueden estar libres, parcialmente rellenos con lodo calcáreo o esporádicamente ocupado con yeso (trazas). Este mineral se distribuye como fibras delicadas que se han desarrollado desde las paredes de los orificios.</p> | <p>La selección de los bioclastos es muy pobre. Ellos se encuentran caóticamente distribuidos en la muestra. Los contactos son principalmente puntuales y en menor proporción, flotantes. En general han perdido su textura interna debido a los diversos efectos diagenéticos que ha sufrido la roca.</p> | <p>Derrumbe submarino cuya fuente de sedimentos era un crecimiento arrecifal.</p> | <p>La porosidad fue estimada en 18%. Es secundaria y fue creada por disolución.</p> |
|-------------------------|---|--|---|---|

| | | | | |
|---|---|--|---|---|
| <p style="text-align: center;">TE-59-2008. I-03</p> | <p>El ejemplar está fundamentalmente constituido por fragmentos aloquímicos calcáreos embebidos en micrita (lodo) (56%). La micrita en su mayor parte se encuentra recristalizada (transformada en calcita cristalina o microesparita) y en algunos sectores intensamente corroída y disuelta. El conjunto aloquímico está representado por: fragmentos fósiles (40%) e intraclastos (1%). Ambos tipos de elementos están formados por calcita con diversos arreglos texturales. Haciendo parte del conjunto fósil se observaron: algas fosilizadas, equinodermos (placas y espinas), foraminíferos, gasterópodos, y bivalvos. La mayoría de ellos ha preservado la textura interna original. Unos pocos, como los corales, exhiben numerosos espacios intragranulares naturales. De la misma manera como sucede con el lodo aglutinante, en algunos casos los bioclastos están intensamente corroídos y disueltos.</p> | <p>Los fragmentos fósiles se encuentran pobremente seleccionados. En general los diversos efectos diagenéticos no han producidos cambios mayores en ellos. Los contactos son principalmente puntuales.</p> | <p>Sector restringido cercano a un crecimiento arrecifal (lagoon o zona submareal).</p> | <p>La porosidad fue calculada en 15% y fue generada por disolución.</p> |
|---|---|--|---|---|

Anexo 3. Matrices Comparativas entre Patrones

| | Fractura | Fisuras y MF. | Desmoronamiento | Desintegración Granular | Disolución | Erosión Diferencial | Redondeo |
|-------------------------------|----------|---------------|-----------------|-------------------------|------------|---------------------|----------|
| Fractura | X | X | X | X | X | | |
| Fisuras y MF. | X | X | X | X | | | |
| Desmoronamiento | | | X | X | | X | |
| Desintegración G. | | | X | X | | X | |
| Disolución | X | X | | | X | X | X |
| Erosión Diferencial | | | | | | X | |
| Redondeo | | | | | | | X |
| Costras Negras | | X | X | X | | | |
| Costras Blancas | | X | X | X | | | |
| Depósito | | | | | | | |
| Eflorescencia | | X | X | X | | | |
| Incrustación | | | | | | | |
| Colonización Biológica | X | X | X | X | X | | |
| Alveolización* | X | X | X | X | X | X | X |

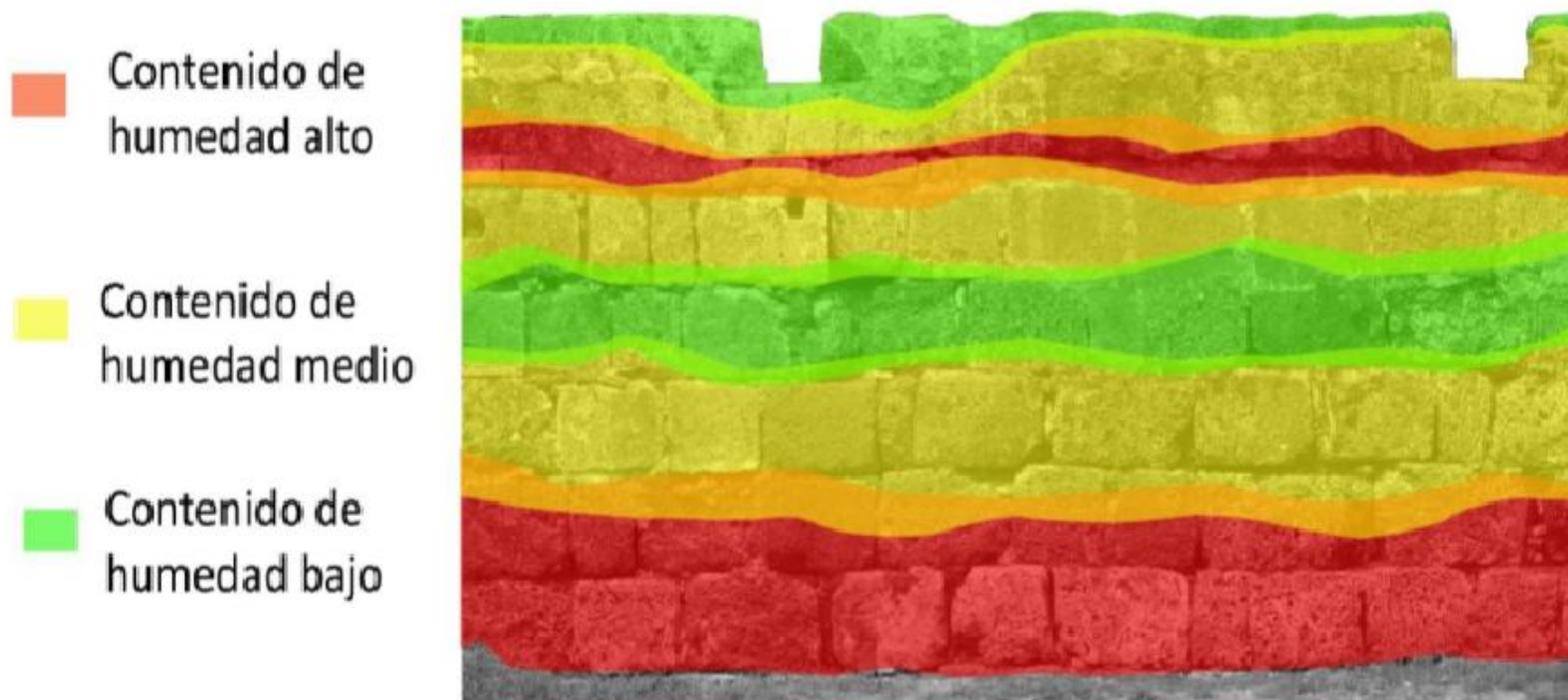
*: Esta no tiene origen directo en la Humedad ó Salinidad

| | Costras Negras | Costras Blancas | Depósito | Decoloración | Eflorescencia | Incrustación | Colonización Biológica |
|------------------------|----------------|-----------------|----------|--------------|---------------|--------------|------------------------|
| Fractura | | | | | X | X | X |
| Fisuras y MF. | | | | | X | X | X |
| Desmoronamiento | | | X | | X | X | X |
| Desintegración G. | | | X | | | | |
| Disolución | | | X | | | | X |
| Erosión Diferencial | | | X | | | | |
| Redondeo | | | X | X | | | |
| Costras Negras | X | | X | X | | | |
| Costras Blancas | | X | X | X | | | |
| Depósito | | | X | X | | | |
| Eflorescencia | | X | | | X | | |
| Incrustación | X | X | | | | | |
| Colonización Biológica | | | X | X | | | X |
| Alveolización* | | | | | | | |

*: Esta no tiene origen directo en la Humedad ó Salinidad

Anexo 4. Cartografías de humedad

- TE-58-2008-A

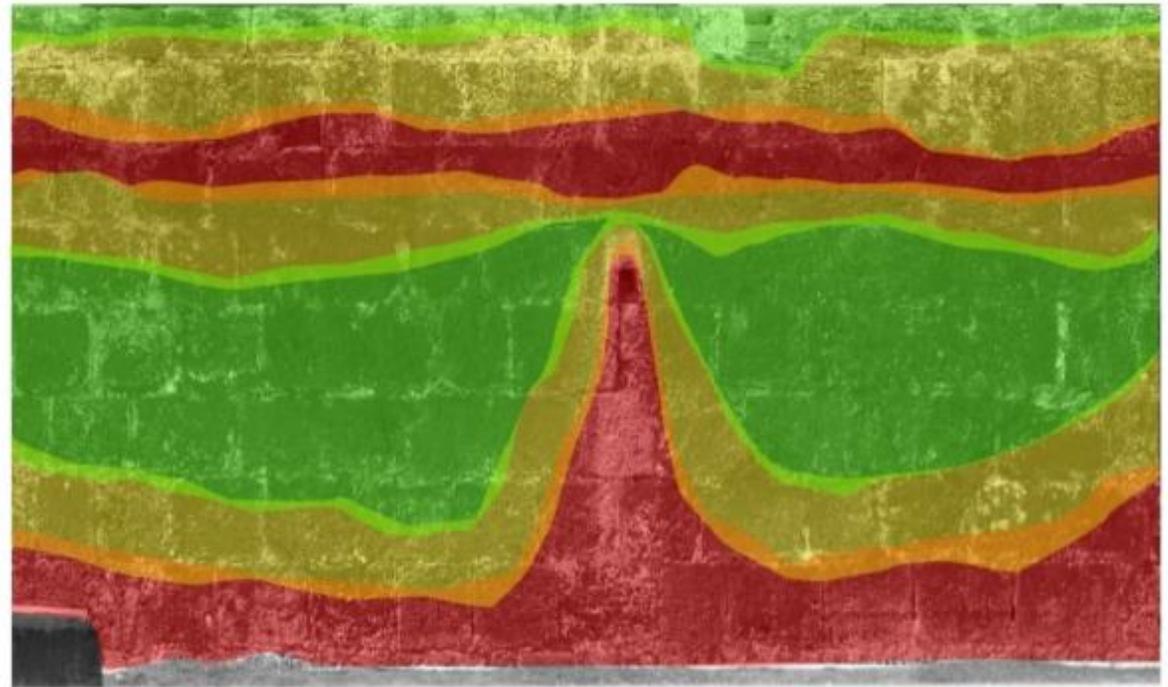


- **TE-58-2008-B y C**



- **TE-59-2008.**

- Contenido de humedad alto
- Contenido de humedad medio
- Contenido de humedad bajo



Anexo 5. Tabla de “n” de Manning para canales erosionables.

| Tipo de canal y descripción | Mínimo | Normal | Máximo | Tipo de canal y descripción | Mínimo | Normal | Máximo |
|--|--------|--------------|--------|---|--------|--------------|--------|
| B. Canales revestidos o desarmables | | | | C. Excavado o dragado | | | |
| B-1. Metal | | | | a. En tierra, recto y uniforme | | | |
| a. Superficie lisa de acero | | | | 1. Limpio, recientemente terminado | 0.016 | 0.018 | 0.020 |
| 1. Sin pintar | 0.011 | 0.012 | 0.014 | 2. Limpio, después de exposición a la intemperie | 0.018 | 0.022 | 0.025 |
| 2. Pintada | 0.012 | 0.013 | 0.017 | 3. Con gravas, sección uniforme, limpio | 0.022 | 0.025 | 0.030 |
| b. Corrugado | 0.021 | 0.025 | 0.030 | 4. Con pastos cortos, algunas malezas | 0.022 | 0.027 | 0.033 |
| B-2. No metal | | | | b. En tierra, serpenteante y lento | | | |
| a. Cemento | | | | 1. Sin vegetación | 0.023 | 0.025 | 0.030 |
| 1. Superficie pulida | 0.010 | 0.011 | 0.013 | 2. Pastos, algunas malezas | 0.025 | 0.030 | 0.033 |
| 2. Mortero | 0.011 | 0.013 | 0.015 | 3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos | 0.030 | 0.035 | 0.040 |
| b. Madera | | | | 4. Fondo en tierra con lados en piedra | 0.028 | 0.030 | 0.035 |
| 1. Cepillada, sin tratar | 0.010 | 0.012 | 0.014 | 5. Fondo pedregoso y bancas con malezas | 0.025 | 0.035 | 0.040 |
| 2. Cepillada, creosotada | 0.011 | 0.012 | 0.015 | 6. Fondo en cantos rodados y lados limpios | 0.030 | 0.040 | 0.050 |
| 3. Sin cepillar | 0.011 | 0.013 | 0.015 | c. Excavado con pala o dragado | | | |
| 4. Láminas con listones | 0.012 | 0.015 | 0.018 | 1. Sin vegetación | 0.025 | 0.028 | 0.033 |
| 5. Forrada con papel impermeabilizante | 0.010 | 0.014 | 0.017 | 2. Matorrales ligeros en las bancas | 0.035 | 0.050 | 0.060 |
| c. Concreto | | | | d. Cortes en roca | | | |
| 1. Terminado con llana metálica (palustre) | 0.011 | 0.013 | 0.015 | 1. Lisos y uniformes | 0.025 | 0.035 | 0.040 |
| 2. Terminado con llana de madera | 0.013 | 0.015 | 0.016 | 2. Afilados e irregulares | 0.035 | 0.040 | 0.050 |
| 3. Pulido, con gravas en el fondo | 0.015 | 0.017 | 0.020 | e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar | | | |
| 4. Sin pulir | 0.014 | 0.017 | 0.020 | 1. Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo | 0.050 | 0.080 | 0.120 |
| 5. Lanzado, sección buena | 0.016 | 0.019 | 0.023 | 2. Fondo limpio, matorrales en los lados | 0.040 | 0.050 | 0.080 |
| 6. Lanzado, sección ondulada | 0.018 | 0.022 | 0.025 | 3. Igual, nivel máximo de flujo | 0.045 | 0.070 | 0.110 |
| 7. Sobre roca bien excavada | 0.017 | 0.020 | | 4. Matorrales densos, nivel alto | 0.080 | 0.100 | 0.140 |
| 8. Sobre roca irregularmente excavada | 0.022 | 0.027 | | D. Corrientes naturales | | | |
| d. Fondo de concreto terminado con llana de madera y con lados de | | | | D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente < 100 pies) | | | |
| 1. Piedra labrada, en mortero | 0.015 | 0.017 | 0.020 | a. Corrientes en planicies | | | |
| 2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero | 0.017 | 0.020 | 0.024 | 1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos | 0.025 | 0.030 | 0.033 |
| 3. Mampostería de piedra cementada, recubierta | 0.016 | 0.020 | 0.024 | 2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas | 0.030 | 0.035 | 0.040 |
| 4. Mampostería de piedra cementada | 0.020 | 0.025 | 0.030 | 3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena | 0.033 | 0.040 | 0.045 |
| 5. Piedra suelta o <i>riprap</i> | 0.020 | 0.030 | 0.035 | 4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras | 0.035 | 0.045 | 0.050 |
| e. Fondo de gravas con lados de | | | | 5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes | 0.040 | 0.048 | 0.055 |
| 1. Concreto encofrado | 0.017 | 0.020 | 0.025 | 6. Igual al 4, pero con más piedras | 0.045 | 0.050 | 0.060 |
| 2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero | 0.020 | 0.023 | 0.026 | 7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos | 0.050 | 0.070 | 0.080 |
| 3. Piedra suelta o <i>riprap</i> | 0.023 | 0.033 | 0.036 | 8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos | 0.075 | 0.100 | 0.150 |
| f. Ladrillo | | | | | | | |
| 1. Barnizado o lacado | 0.011 | 0.013 | 0.015 | | | | |
| 2. En mortero de cemento | 0.012 | 0.015 | 0.018 | | | | |
| g. Mampostería | | | | | | | |
| 1. Piedra partida cementada | 0.017 | 0.025 | 0.030 | | | | |
| 2. Piedra suelta | 0.023 | 0.032 | 0.035 | | | | |
| h. Bloques de piedra labrados | 0.013 | 0.015 | 0.017 | | | | |
| i. Asfalto | | | | | | | |
| 1. Liso | 0.013 | 0.013 | | | | | |
| 2. Rugoso | 0.016 | 0.016 | | | | | |
| j. Revestimiento vegetal | 0.030 | | 0.500 | | | | |