



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**“Influencia de las propiedades texturales y petrofísicas de las
rocas carbonatadas en el deterioro de los mosaicos de la
arquitectura Puuc; el Codz Pop de Kabah y el Gran Palacio de
Sayil, Yucatán”**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias en Geología Aplicada

Presenta:

Ing. Osmara Arleth Coronado Coronado

Becaria CONAHCYT: CVU 1240845

Asesor:

Dr. Rubén Alfonso López Doncel

Co-asesora:

M.A. Natalia Hernández Tangarife

San Luis Potosí, S. L. P.

Mayo de 2025



19 de septiembre de 2024

ING. OSMARA ARLETH CORONADO CORONADO
P R E S E N T E.

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Rubén Alfonso López Doncel** y la **M.A. Natalia Hernández Tangarife** Asesor y Coasesora de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Ciencias en Geología Aplicada**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de septiembre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Influencia de las propiedades texturales y petrofísicas de las rocas carbonatadas en el deterioro de los mosaicos de la arquitectura Puuc; el Codz Pop de Kabah y el Gran Palacio de Sayil, Yucatán"

Introducción

1. Panorama preliminar y estado del arte
2. La naturaleza de las rocas de construcción y su deterioro
3. Contexto histórico y geológico de la Región Puuc
4. Técnicas y análisis realizados a las rocas que constituyen los mosaicos de la arquitectura Puuc
5. Caracterización geológica, petrográfica, petrofísica y geoquímica de las rocas carbonatadas
6. Discusión: el impacto del deterioro en las rocas de los templos de la Región Puuc

Conclusiones

Referencias

Anexos

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E



DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Copia. Archivo
*etn.

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al 39
fax (444) 826 2336

"UASLP, con profesionistas abiertos al mundo"



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
**INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

D E C L A R A C I Ó N

El presente trabajo que lleva por título:

“Influencia de las propiedades texturales y petrofísicas de las rocas carbonatadas en el deterioro de los mosaicos de la arquitectura Puuc; el Codz Pop de Kabah y el Gran Palacio de Sayil, Yucatán”

se realizó en el periodo septiembre de 2022 a mayo de 2025 bajo la dirección del Dr. Rubén Alfonso López Doncel y de la M.A. Natalia Hernández Tangarife

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Osmara Arleth Coronado Coronado

Agradecimientos

A mi familia y amigos por el amor, el apoyo, la paciencia y el acompañamiento a lo largo de la redacción de este documento. Muchas gracias.

A Diana y Mayela, mis amigas de esta etapa, por su amistad y el apoyo que sólo nosotras nos podíamos brindar. Su confianza, soporte y cariño han sido valiosos en este proceso.

Al Dr. Rubén Alfonso López Doncel por la dirección de este trabajo y la oportunidad de poder colaborar con el Proyecto Conservación Ruta Puuc.

A la M.A. Natalia Hernández Tangarife por permitirme ser parte del Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023), por su guía, apoyo, ayuda y por compartir su conocimiento. Además de su hospitalidad y asesoramiento. Muchas gracias.

A todo el personal que conforma el Proyecto Conservación Ruta Puuc, restauradores, arquitectos, arqueólogos, fotógrafos, albañiles y personal de análisis científicos, por su hospitalidad, interés y apoyo a lo largo de las salidas de campo realizadas en este trabajo.

Al señor Wilbert Castillo y Cante por su amabilidad y disposición para compartir su conocimiento sobre la piedra Puuc.

Al comité de sinodales, así como al personal académico y administrativo del Instituto de Geología.

A la Lic. Maura Andrea Zavala Zavala de la biblioteca por su apoyo y disposición en la búsqueda de información bibliográfica.

Al Ing. Erasmo Mata Martínez por la ayuda en la elaboración de láminas delgadas, así como en el corte de las muestras para los análisis petrofísicos.

Al L.Q. Miguel Ángel Cortina Rangel y L.Q. Juan José Félix Carrillo del Laboratorio de Geoquímica por la realización de los análisis por ICP-OES, así como a la Dr. María Elena García Arreola y al Dr. Alfredo Aguillón Robles. A Alondra Mejía Molina por su ayuda en la digestión de las muestras.

A la Mtra. Emma Luz de Velázquez Farfán y E.A.O. Mauricio López Mejía del Área Civil por la prueba de compresión uniaxial.

A la Dr. Claudia Hernández Galván y M.M.I.M. Rosa Lina Tovar Tovar del Instituto de Metalurgia por los análisis de Difracción de Rayos X.

Al Dr. Roberto Briones Gallardo y Marcos Benjamín Cruz Jiménez del Laboratorio de Remediación por la realización de los análisis de Fluorescencia de Rayos X.

Al ilustrador Steve Radzi por permitirme utilizar su trabajo en esta tesis.

A Mosy por su hospitalidad en Mérida.

Al CONAHCYT por el apoyo brindado en mis estudios (CVU: 1240845).

ÍNDICE

Resumen	viii
Abstract	viii
Introducción	1
1. Panorama preliminar y estado del arte	2
1.1 Hipótesis.....	2
1.2 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos particulares.....	2
1.3 Justificación.....	2
1.3.1 Impacto social.....	3
1.4 Estado del arte.....	3
1.5 Localización del área de estudio.....	6
1.6 Clima en Yucatán.....	6
2. La naturaleza de las rocas de construcción y su deterioro	8
2.1 Formación de rocas carbonatadas.....	8
2.2 El deterioro en las rocas de construcción.....	14
2.2.1 Deterioro de los mosaicos del Codz Pop (E2C6) y del Gran Palacio de Sayil (E2B1)....	16
3. Contexto histórico y geológico de la Región Puuc	23
3.1 Geología de Yucatán.....	23
3.1.1 La Plataforma de Yucatán.....	23
3.1.2 Tectónica de la Plataforma de Yucatán.....	25
3.2 Contextualización histórica de la Región Puuc.....	29
3.2.1 Antecedentes de las exploraciones e intervenciones arqueológicas en los palacios mayas de la Región Puuc.....	31
3.2.2 El Codz Pop de Kabah.....	36
3.2.3 El Gran Palacio de Sayil.....	41
4. Técnicas y análisis realizados a las rocas que constituyen los mosaicos de la arquitectura Puuc	44
4.1 Trabajos de gabinete.....	44
4.2 Trabajos de campo.....	44
4.2.1 Mapeo litológico.....	45
4.2.2 Columna litológica.....	45
4.2.3 Toma de muestras.....	46
4.3 Trabajo de laboratorio.....	48
4.3.1 Elaboración y análisis de láminas delgadas.....	48

4.3.2 Análisis petrofísicos	48
4.3.3 Análisis geoquímicos	53
5. Caracterización geológica, petrográfica, petrofísica y geoquímica de las rocas carbonatadas	56
5.1 Litología	56
5.1.1 Descripción general del tipo de roca	56
5.1.2 Mapeos litológicos	58
5.1.3 Columna litológica	61
5.2 Petrografía de carbonatos	63
5.3 Análisis petrofísicos	67
5.3.1 Porosidad-densidad	67
5.3.2 Absorción por capilaridad experimental	69
5.3.3 Expansión hídrica	70
5.3.4 Expansión térmica	70
5.3.5 Resistencia a la cristalización de sales	72
5.3.6 Resistencia a la compresión uniaxial	74
5.4 Análisis geoquímicos	75
6. Discusión: el impacto del deterioro en las rocas de los templos de la Región Puuc	77
6.1 Caracterización geológica de las rocas carbonatadas	77
6.2 Litología y su deterioro	78
6.3 Propiedades petrofísicas de las rocas carbonatadas	80
6.4 La influencia de las condiciones ambientales en el deterioro	89
6.5 El papel de la geoquímica en el deterioro de los mosaicos	91
Conclusiones	94
Referencias	96
Anexos	106
Anexo 1. Microfacies (RMF) comunes en rampas Paleozoicas y Mesozoicas (Ahr, 1973).	106
Anexo 2. Muestras colectadas en esta investigación	107
Anexo 3. Mapeos litológicos y de deterioros de las fachadas de los palacios	108
Anexo 4. Descripción petrográfica de las rocas carbonatadas.	129
Anexo 5. Resultados de los análisis geoquímicos	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de las zonas arqueológicas de estudio. Icono maya de ©PNGWING.....	7
Figura 2. Climograma (1991-2020) de la estación Santa Elena, Yucatán. Datos obtenidos de CONAGUA (2024).	7
Figura 3. Ejemplos de granos esqueléticos y no esqueléticos en las calizas. Tomado de Flügel (2004). Elaboró Osmara Coronado.	9
Figura 4. Tabla para estimar la abundancia de constituyentes en secciones delgadas. Tomado de Scholle & Ulmer-Scholle (2003).....	10
Figura 5. Clasificación de Folk (1962). Tomado de Flügel (2010). Elaboró Osmara Coronado.	12
Figura 6. Clasificación de carbonatos según Dunham (1962) modificado por Embry y Klovan (1972). Traducción de López Doncel (2004). Elaboró Osmara Coronado.....	12
Figura 7. Cinturón de facies de una rampa carbonatada. Tomado de Flügel (2010). Elaboró Osmara Coronado.	13
Figura 8. Modelo de facies y microfacies en una rampa carbonatada. Tomado de Flügel (2010). Elaboró Osmara Coronado.	14
Figura 9. Mapa geológico de la Plataforma de Yucatán. Icono maya de ©PNGWING.....	23
Figura 10. Reconstrucción tectónica del Golfo de México. Tomado y modificado de Filina & Beutel (2022). Elaboró Osmara Coronado.	26
Figura 11. A) Mascarón escalón en la entrada a un cuarto del Codz Pop (E2C6) de Kabah y b) Friso del segundo nivel del Gran Palacio de Sayil (E2B1). Ilustraciones de ©STEVE RADZI.....	30
Figura 12. A) Litografía del Codz Pop de Frederick Catherwood, 1841. Tomada de Hernández Tangarife et al. (2022). B) Litografía de Catherwood del Gran Palacio de Sayil, Stephens (1993). Tomada de Toscano et al. (2007).....	32
Figura 13. A) Reconstrucción hipotética del Codz Pop y b) del Gran Palacio de Sayil realizadas por Tatiana Proskouriakoff. Tomada de las colecciones del Museo Peabody.....	32
Figura 14. Codz Pop durante la década de 1930, Pollock (1980).	33
Figura 15. Ala Oeste del Gran Palacio de Sayil en 1930, al inicio de la expedición de Frans Blom. Tomada de Toscano (2007).	33
Figura 16. Vista del Codz Pop en la zona arqueológica de Kabah, Yucatán. Pérez-Siliceo 1950-1990.	34
Figura 17. Ángulo sureste del Palacio en Sayil en 1960. Tomada de la Mediateca Nacional del INAH.....	35
Figura 18. Fachada Oeste del Codz Pop. Fotogrametría realizada por Arqlgo. Benjamín Esqueda. Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023).	36
Figura 19. Ala Oeste, fachada Sur del Gran Palacio de Sayil. Fotogrametría realizada por Arqlgo. Benjamín Esqueda. Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023).	36
Figura 20. Croquis de Kabah. En el rectángulo azul se observa la ubicación del Codz Pop. Tomado de la Mediateca del INAH.....	37
Figura 21. Elementos arquitectónicos de la Fachada Oeste del Codz Pop. Registro fotogramétrico por Arqlgo. Benjamín Esqueda. Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023). Tomado y modificado de Colín Gámez & Hernández Tangarife (2024).....	38
Figura 22. Réticula alfanumérica de la fachada Oeste Fachada Oeste de la Estructura 2C6. Réticula en la imagen de ortomosaico, realizado por Arqlgo. Benjamín Esqueda. Cuadrícula realizada por los arquitectos Vidaura Cardos Ramírez y Jesús Muñoz Cinta. Proyecto Conservación Ruta Puuc 2022-2023.....	39

Figura 23. A) Mascarón escalón de Witz, fachada norte, Codz Pop, foto por Gabriel Severiano y b) modelo ejecutado por Arqlgo. Benjamín Esqueda. Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023).	40
Figura 24. Secciones compositivas de los mosaicos de piedra del medio mascarón del dios Witz. Realizado por Gabriel Severiano y modelo digital realizado por Arqlgo. Benjamín Esqueda. Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023).	40
Figura 25. Croquis de Sayil. En el rectángulo azul se observa la ubicación del Gran Palacio de Sayil. Tomada de la Mediateca del INAH.	42
Figura 26. Nivel 2 del Gran Palacio de Sayil. Tomado de Reed (2001).	42
Figura 27. Elementos principales que conforman el segundo nivel del Gran Palacio de Sayil. Dibujo realizado por Luz Fabiola González (Proyecto Conservación Ruta Puuc, 2022-2023).	43
Figura 28. Afloramiento de donde se realizó la columna litológica, ubicado en el poblado de Santa Elena.	46
Figura 29. Prueba de porosidad-densidad, a) muestras en el desecador para crear vacío y b) método para obtener el peso sumergido de las muestras.	50
Figura 30. Prueba de absorción por capilaridad en laboratorio, a) brecha de Kabah y b) brecha de Sayil.	50
Figura 31. Prueba de expansión hídrica, a) toma de medidas de las muestras, b) brecha de Kabah y c) brecha de Sayil.	51
Figura 32. Expansión térmica en a) brechas de Kabah y b) brechas de Sayil.	51
Figura 33. Muestras en la solución de $Na_2SO_4 \times 2H_2O$.	52
Figura 34. Prueba de resistencia a la compresión uniaxial, a) brecha de Kabah y b) brecha de Sayil.	53
Figura 35. Proceso de digestión de las muestras en el Laboratorio de Geoquímica, a) peso de las muestras, b) muestras en la parrilla listas para la evaporación de ácidos, c) adición de ácidos con micropipeta y d) aforo de las muestras.	54
Figura 36. A) suelo kancab y b) sascab.	58
Figura 37. Mapeo litológico del Muro 2 de la fachada oeste del Codz Pop (E2C6) de Kabah.	59
Figura 38. Mapeo litológico del Friso 3 de la fachada sur del Gran Palacio de Sayil (E2B1).	60
Figura 39. Ubicación del afloramiento de Santa Elena respecto a las zonas arqueológicas. ©PNGWING.	61
Figura 40. Columna litológica de Santa Elena.	62
Figura 41. A) Caliza masiva, b) brecha calcárea y c) intercalación de caliza y brecha calcárea.	63
Figura 42. Ambientes de depósito de las rocas de las fachadas del Codz Pop (E2C6), del Gran Palacio de Sayil (E2B1) y del afloramiento de Santa Elena.	67
Figura 43. Comportamiento de las brechas calcáreas y las calizas ante la absorción capilar experimental.	69
Figura 44. Absorción capilar experimental de las muestras colectadas. La línea roja indica la absorción registrada en 60 minutos.	70
Figura 45. Prueba de expansión hídrica en las muestras.	70
Figura 46. Comportamiento de las muestras ante la expansión térmica.	71
Figura 47. Comportamiento y evolución del deterioro en la brecha de Kabah frente a la cristalización de sales.	72
Figura 48. Comportamiento y evolución del deterioro en la caliza de Sayil debido a la cristalización de sales. En los círculos rojos se observa la delaminación.	73
Figura 49. Comportamiento y evolución del deterioro en la brecha de Sayil frente a la cristalización de sales.	73

Figura 50. Comportamiento y evolución del deterioro en la caliza de Sayil debido a la cristalización de sales.	74
Figura 51. Evolución de la destrucción de la brecha (rudstone) de Kabah (M21) debido a una fuerza compresiva.	75
Figura 52. Evolución de la destrucción de la brecha (floatstone) de Sayil (M50) debido a una fuerza compresiva.	75
Figura 53. Evolución de la destrucción de la caliza (wackestone) de Sayil (M54) debido a una fuerza compresiva.	75
Figura 54. Gráfica que relaciona el coeficiente de absorción capilar contra la porosidad.	83
Figura 55. Pérdida y aumento de peso de las calizas y brechas debido a la interacción con soluciones salinas.	83
Figura 56. Gráficas que muestran la relación entre el número de ciclos salinos contra la porosidad y el porcentaje de matriz de las muestras analizadas.	84
Figura 57. Pérdida diferencial por detritos y helicoidal en a) junquillos y b) jamba del Friso 4. C) Deterioros observados en la Caliza Globigerina en la fachada sur de la Iglesia de Santa Marija Ta' Cwerra, Malta. Tomada de Rothert et al. (2007).	86
Figura 58. Representación del desarrollo del relieve, modelo propuesto por Vannucci et al. (1994) y Fitzner et al. (1996), digitalizado de Rothert et al. (2007).	86
Figura 59. Relación de los valores de compresión uniaxial contra la porosidad y el coeficiente de absorción capilar.	87
Figura 60. Relación de los valores de compresión uniaxial el porcentaje de matriz y componentes de las rocas.	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores promedio de humedad (%) en Yucatán de 1991-2021, y valores promedio de horas de sol y días lluvioso de 1999-2019 (Climate Data, 2024).	7
Tabla 2. Tipos de granos no esqueléticos (Tucker & Wright, 1990).	8
Tabla 3. Esquemas de clasificación para las rocas carbonatadas.	11
Tabla 4. Indicadores de deterioros registrados en el Codz Pop (E2C6) y el Gran Palacio de Sayil (E2B1). Definiciones y fotografías tomadas del glosario SCyR-C-INAH Yucatán y Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023).	19
Tabla 5. Módulos que componen al medio mascarón de Witz. El medio mascarón se compone de 18 módulos en su totalidad. Los números marcados por un asterisco (*) están a su vez compuestos por más piezas.	41
Tabla 6. Relación de las muestras colectadas y su respectivo análisis realizado.	47
Tabla 7. Clasificación de von Moos & de Quervain (1948) para determinar la porosidad de una roca.	49
Tabla 8. Clasificación de la Unconfined Compression Strength (UCS) para la resistencia de las rocas.	52
Tabla 9. Colores de las rocas, suelo y sascab según la escala de Munsell (1915).	56
Tabla 10. Litologías observadas en el Codz Pop de Kabah (E2C6) y el Gran Palacio de Sayil (E2B1).	57
Tabla 11. Descripción general y clasificación de las muestras de láminas delgadas, de acuerdo con Dunham, 1962; Folk, 1962 y Embry y Klován, 1972.	64
Tabla 12. Resultados de la prueba de densidad-porosidad.	68
Tabla 13. Resultados de la prueba de absorción por capilaridad. Ordenados de mayor a menor porcentaje de absorción.	69
Tabla 14. Expansión mínima y máxima de cada muestra.	71
Tabla 15. Comportamiento de las rocas ante los efectos de la cristalización de sales.	72
Tabla 16. Valores obtenidos de la prueba de compresión uniaxial en las muestras.	74
Tabla 17. Valores promedio de los óxidos mayores analizados por ICP-OES.	76
Tabla 18. Minerales presentes en las muestras detectados por DRX.	76
Tabla 19. Porcentaje de litologías y deterioros presentes en los muros y frisos del Codz Pop (E2C6) y del Gran Palacio de Sayil (E2B1).	79
Tabla 20. Relación del CAC y la porosidad de las calizas y brechas de las fachadas.	82
Tabla 21. Efectos de las sales con respecto a la porosidad y al porcentaje de matriz.	85
Tabla 22. Promedio de elementos mayores obtenidos por ICP-OES y FRX.	92
Tabla 23. Relación litología-deterioro y factores que los condicionan.	95

Resumen

Los mosaicos de roca que recubren la fachada oeste del Codz Pop (E2C6) y la fachada sur del Gran Palacio de Sayil (E2B1) localizados en la Región Puuc en el estado de Yucatán, están conformados por calizas y brechas calcáreas que presentan deterioros agrupados en cuatro principales categorías: por pérdida de material, fracturas, desprendimientos y los debidos a la presencia de sales.

La presente investigación determinó la relación entre los deterioros y las características intrínsecas de las rocas, así como la influencia de las condiciones climáticas en las que se encuentran, por medio de análisis petrográficos, petrofísicos (porosidad-densidad, absorción capilar experimental, expansión hídrica y térmica, resistencia a la cristalización de sales y a la compresión uniaxial) y geoquímicos (DRX, FRX e ICP-OES), además se realizaron mapeos litológicos y de deterioros, éstos últimos elaborados por restauradores del Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán (2022-2023).

Los diversos análisis en laboratorio y el trabajo de campo dieron como resultado que los principales factores intrínsecos que causan el deterioro en las rocas carbonatadas son la elevada porosidad, las diversas texturas que éstas presentan (mudstone, wackestone, packstone, floatstone y rudstone), las matrices heterogéneas y la mineralogía. Por otro lado, en cuanto a las condiciones microclimáticas, se encuentran como principal agente de deterioro los cambios drásticos de temperatura a lo largo del día y la elevada humedad de la región.

Asimismo, se observó que determinada litología presenta inclinación a ciertos deterioros, por un lado, las calizas (texturas mudstone, wackestone y packstone) presentan deterioros como delaminación, grietas, fracturas y pérdida diferencial (helicoidal); mientras que, las brechas calcáreas (floatstone y rudstone) se caracterizan por la pérdida diferencial en forma de nódulos (huecos), nódulos de hierro, vetas y detritos.

Lo anterior, amplía el conocimiento y ofrece nuevas herramientas a considerar al momento de intervenir un bien patrimonial.

Abstract

The west façade of the Codz Pop (E2C6) and the south façade of the Great Palace of Sayil (E2B1) are in the Puuc Region of Yucatan, Mexico. They are covered by rock mosaics made up of limestone and calcareous breccia that exhibit deterioration grouped into four main categories: due to material loss, cracks, detachment, and those caused by the presence of salts.

This research determined the relationship between deterioration and the intrinsic characteristics of rocks, as well as the influence of the climatic conditions in which they are, by petrographic, petrophysical and geochemical analyses as density, porosity, thermal and hydric expansion, salt bursting, compressive strength, XRD, XRF and ICP-OES. In addition, lithological and deterioration mappings of the façades were carried out. The deterioration mappings were performed by restorers of the Conservation Puuc Project (2022-2023).

The laboratory analyses and field work showed that the main intrinsic factors that cause deterioration in carbonate rocks are the high porosity, textures they present (mudstone, wackestone, packstone, floatstone and rudstone), heterogeneous matrices and mineralogy. Although, as to the microclimatic conditions, the main agents of deterioration are the drastic temperature changes throughout the day and the high humidity of the region.

It was observed that each lithology exposed certain deterioration patterns, on the one hand, limestones (mudstone, wackestone and packstone textures) show deteriorations such as delamination, cracks, fractures and differential loss, however calcareous breccias (floatstone and rudstone) are characterized by loss of components and matrix.

These results provide us with knowledge and new tools which might be helpful in future conservation processes.

Introducción

Los edificios históricos y culturales han sido construidos, generalmente, con los materiales pétreos disponibles en la región. Al ser la materia prima, las rocas naturales y al estar expuestas a factores climáticos y antropogénicos, éstas presentan diversos procesos de deterioro, lo que ha llevado a crear grupos multidisciplinarios para comprender cómo afectan los procesos físicos, químicos y biológicos a las rocas dimensionales con el fin de brindar herramientas y lineamientos al momento de intervenir un bien inmueble.

Las rocas por naturaleza presentan alteración derivada de su composición mineralógica y química, así como de sus características intrínsecas (textura, matriz, acomodo de los minerales y/o granos, porosidad); sin embargo, la mayoría de los edificios se encuentran en ambientes urbanos e industrializados, donde los factores extrínsecos se incrementan y por ende, el deterioro; tales como los contaminantes atmosféricos, que al combinarse con el agua y el viento crean modificaciones considerables en las rocas.

Los edificios arqueológicos y culturales de la región maya han sido declarados patrimonio mundial, por lo que los esfuerzos por conservar estos inmuebles han aumentado y es cada vez más común que diversas ciencias aporten conocimientos para mejorar su estado actual y que se preserven por mayor tiempo.

En la Región Puuc, especialmente en el Codz Pop en Kabah (E2C6) y en el Gran Palacio de Sayil (E2B1) se ha observado que los principales deterioros son: biocolonización por plantas y organismos, agrietamientos, fisuras, disgregación, desprendimientos, cristalización de sales; así mismo, se ha reportado que una de las principales causas es la falta de impermeabilización y la canalización de las caídas de agua, lo que ocasiona escurrimiento de agua sobre los mascarones (Hernández-Tangarife et al., 2022).

Dichas zonas arqueológicas se encuentran en la provincia geológica denominada plataforma de Yucatán, por lo que los mosaicos que recubren estas fachadas son de origen calcáreo. Este trabajo de investigación pretende comprender la estrecha relación entre las características texturales de las rocas carbonatadas, su relación con el deterioro y los factores ambientales a las que están expuestas, por medio de análisis petrográficos, petrofísicos y geoquímicos; ya que poco se conoce cómo la naturaleza de estas rocas afecta a los deterioros que presentan los palacios de Kabah (E2C6) y Sayil (E2B1).

Desde el punto de vista físico, las rocas presentan diversas propiedades, que se expresan normalmente por medio de parámetros que cuantifican ciertos aspectos o comportamientos. Por ello, se realizan ensayos de durabilidad, los cuales tratan de reproducir de forma acelerada la alteración que sufriría un material colocado en obra y expuesto a condiciones ambientales extremas. Dichos procedimientos se encuentran normalizados, ya sea por la Internacional Society for Rock Mechanics (ISRM) u otras normas más específicas como las ASTM (americanas), EN (europeas), DIN (alemanas), BS (británicas) y UNE (españolas). (Esbert et al., 1997; Benavente et al., 2004).

1. Panorama preliminar y estado del arte

1.1 Hipótesis

El deterioro intrínseco que presentan los mosaicos de roca labrada que recubren la fachada oeste del Codz Pop de Kabah y la fachada sur del Gran Palacio de Sayil (estructuras E2C6 y E2B1), está sujeto a los cambios en las características petrofísicas y sedimentológicas (texturales) de las rocas carbonatadas, junto con los factores ambientales donde se ubican.

1.2 Objetivo general

Determinar la relación existente entre la litología y el tipo de deterioro que presentan las rocas carbonatadas que conforman las fachadas de los palacios de Kabah y Sayil, con base en las características texturales y las propiedades petrofísicas y químicas de las rocas.

1.2.2 Objetivos particulares

- Elaborar mapas litológicos con base en las texturas de las rocas carbonatadas que constituyen los mosaicos de los palacios de Kabah (E2C6) y Sayil (E2B1).
- Levantar una columna litológica de un afloramiento cercano al área de estudio para tratar de correlacionar la secuencia con los edificios estudiados.
- Describir las características texturales de las rocas que conforman las fachadas de los palacios de Kabah (E2C6) y Sayil (E2B1) por medio de un análisis petrográfico.
- Efectuar pruebas petrofísicas (porosidad-densidad, absorción capilar, expansión hídrica y térmica, resistencia a la cristalización de sales y resistencia a la compresión uniaxial) a las rocas que constituyen los palacios en el laboratorio para la caracterización de los materiales pétreos.
- Realizar análisis químicos, tales como, espectrometría de emisión óptica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES), difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX) a las rocas de las fachadas y del suelo del área de estudio.

1.3 Justificación

La generación de estudios más detallados que comprueben la relación entre el tipo de roca y sus texturas con el deterioro de las fachadas de los palacios de Kabah (E2C6) y Sayil (E2B1), permitirá expandir el conocimiento, brindando nuevas herramientas a considerar al momento de intervenir un bien patrimonial. De esta manera, los estudios geológicos en conjunto con las características ambientales ayudarán a definir las razones del deterioro intrínseco evidente en los mosaicos.

Cabe señalar que, actualmente no existen trabajos en la zona de estudio acerca de esta estrecha relación, por lo que el presente estudio amplifica la perspectiva sobre cómo el ambiente geológico de formación influye en las propiedades de la roca y por ende en su comportamiento ante el intemperismo.

Las ciudades prehispánicas de la Ruta Puuc: Uxmal, Kabah, Sayil y Labná fueron declaradas Patrimonio Mundial de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura (UNESCO por sus siglas en inglés) en 1996, por lo que se han aumentado los esfuerzos para su conservación, así como la necesidad de comprender los factores que

ocasionan el deterioro para mitigarlos, pues son fuente de inspiración para el arte y la arquitectura, lo que aumenta su riqueza cultural a escala global.

1.3.1 Impacto social

El profundizar en la correlación de las propiedades de la roca y su deterioro, contribuirá a la identificación de la naturaleza de los bienes patrimoniales, y su comportamiento a futuro en las condiciones de exhibición, que ayuden a definir criterios y lineamientos para su conservación a largo plazo y para que generaciones futuras continúen disfrutando de este paisaje cultural que, refleja el legado ancestral de la cultura maya del Clásico Tardío y sus alcances arquitectónicos a través de la especialización de la talla de la piedra.

1.4 Estado del arte

Desde tiempos remotos, las rocas han sido la principal materia prima para la construcción. Las rocas carbonatadas han sido las rocas dimensionales más difundidas en el medio edificado de muchas regiones del mundo debido a su amplia disponibilidad y facilidad con la que se pueden trabajar en comparación con las rocas silicatadas (Siegesmund y Snethlage, 2011). En muchas ocasiones, se considera a la roca como un material resistente a la intemperie, sin embargo, casi nunca se encuentran en equilibrio con la superficie, pues las rocas se forman a condiciones muy diferentes a las que se encuentran en el ambiente, lo anterior, provoca modificaciones en sus características iniciales que hace que se produzca un progresivo deterioro (Esbert et al., 1991).

Es sabido que, desde la antigüedad existe un importante interés por parte de la sociedad en conservar los objetos que forman parte de su memoria cultural e identidad; sin embargo, desde la segunda década del siglo XX, la geología comenzó a sumarse en la preservación y protección de los monumentos históricos, pues existen tesis y artículos donde se caracterizaron a calizas de diversas formaciones geológicas, su calidad como material de construcción y la identificación de costras negras como principal deterioro ocasionado por efectos del clima y los contaminantes atmosféricos en países como Estados Unidos e Inglaterra (Barrow, 1922; Edmunds y Schaffer, 1932).

Entre 1960 y 1970, se realizaron trabajos que emplearon varias técnicas y análisis para caracterizar el deterioro y desarrollar estrategias adecuadas de conservación, entre los que se encuentran métodos no destructivos como ondas ultrasónicas, análisis petrofísicos (absorción capilar, ciclos de hielo-deshielo, expansión) y geotécnicos (pruebas de resistencia a la compresión no confinada); observaciones in situ (mapeos de los monumentos y pruebas de absorción de humedad), así como el análisis de láminas delgadas para concluir que el deterioro en las calizas, en el concreto e inclusive en algunos metales proviene principalmente del agua combinada con contaminantes atmosféricos como CO₂, SO₂ y Cl⁻ (Attewell, 1971; Braun & Wilson, 1970; Jones, 1965; Winkler, 1966, 1968, 1970; Záruba & Mencl, 1976).

En las últimas dos décadas del siglo XX, se registraron grandes aportes a esta cuestión, pues es en este periodo de tiempo que la geología toma gran importancia en ofrecer la posibilidad de conocer a detalle la naturaleza, origen, composición y deterioro de los materiales

históricos que constituyen el patrimonio. Existen trabajos, principalmente en Europa, donde por medio de petrofísica, geoquímica, geotecnia y petrografía se logró determinar que el deterioro es un proceso complejo que involucra componentes químicos relacionados a variables meteorológicas, e incluso acción biológica (Camuffo, 1986, 1995; Winkler, 1987).

Asimismo, se realizaron simposios donde se abordó la aplicación de diversas técnicas geocientíficas, como geofísica, microscopía, petrofísica y geoquímica, para comprender las propiedades intrínsecas, las causas y las vías de alteración de los materiales del patrimonio cultural (Reddy, 1989).

Adicionalmente, se generaron ensayos de durabilidad (someter a los materiales objeto de estudio a unas determinadas condiciones como temperatura, humedad relativa, contacto con soluciones salinas; atmósfera con gases: SO₂, etcétera) para evaluar el comportamiento de diferentes tipos de calizas empleadas en la construcción de edificios en Roma y España. De los datos obtenidos, los distintos tipos de calizas estudiadas presentaron una variabilidad en sus propiedades físicas; inclusive dentro de una misma variedad rocosa. De lo anterior, se determinó que, la alteración de estas rocas está relacionada con sus características intrínsecas, como la porosidad y fisuras, así como al ambiente en la que se ubica el edificio del que forma parte. Los principales agentes exógenos que condicionan su comportamiento son los contaminantes atmosféricos, viento, insolación; así como los ocasionados por los cambios de fase: sólida, líquida, vapor y el transporte de contaminantes y sales, que puede experimentar el agua (Álvarez Pérez & Plana Llevat, 1990; Camuffo, 1995; Esbert et al., 1988, 1997; Sevilla et al., 1995; Valdeon et al., 1985).

En cambio, la porosidad, el tamaño de grano y el contenido en cuarzo son tres de los factores petrográficos que más influyen en el comportamiento mecánico y deformacional de estos materiales (Esbet et al., 1988).

De igual manera, se ha utilizado a la geoquímica como herramienta para caracterizar el material pétreo usado en construcción, la finalidad de estos análisis, aparte de mostrar la concentración de elementos mayores y trazas, ayuda a entender la presencia de diversas fases cristalinas relacionadas con el ambiente de formación. Esto además de indicar distintas procedencias del material, explica su comportamiento y vulnerabilidad a factores extrínsecos, lo cual se manifiesta en los mecanismos de alteración diferenciados observables (Mora Navarro, 2015). Entre los métodos utilizados se encuentran la difracción de rayos X, la espectrometría de absorción atómica, espectroscopia raman, la fluorescencia de rayos X y la microscopía electrónica de barrido.

En el siglo XXI, los estudios se han expandido por todo el mundo, incluyendo Cuba, Alemania, Egipto y Emiratos Árabes Unidos, por mencionar algunos, en donde las metodologías incluyen análisis petrofísicos, petrográficos y geoquímicos. Se ha mencionado que, la mampostería a base de caliza es muy sensible a muchos de los factores ambientales, como la contaminación, la oxidación, la temperatura y la humedad relativa, especialmente en entornos urbanos. También, se han enfocado en los cambios drásticos de temperatura, donde se producen ciclos de expansión-contracción térmica que ocasionan daños irreversibles, ya que se producen reordenamientos en la estructura cristalina de las rocas haciéndolas menos

resistentes. Asimismo, las variaciones en la temperatura tienen como consecuencia inmediata cambios en la saturación de vapor de agua denominados ciclos de humedad y secado dentro de los poros de la roca, lo que incrementa la concentración de las sales disueltas en ella llegando incluso a la precipitación cuando la solución se vuelve sobresaturada. Cuando los efectos de temperatura y humedad se combinan, el mecanismo de deterioro que presentan los materiales pétreos se hace más complejo (Arman et al., 2021; David et al., 2013; El-Gohary, 2010; López-Doncel et al., 2016; Přikryl & Török, 2010; Valdés et al., 2007).

Igualmente, se ha determinado que otro factor importante y quizás el más destructivo del material calcáreo, es la acción de las sales, las cuales producen ciclos de disolución, migración, cristalización, hidratación y recristalización que conllevan a un aumento en la concentración de estas en la superficie y dentro de la roca precipitándose. Lo anterior, va de la mano con la porosidad en las rocas carbonatadas que es un factor significativo para la arquitectura y la construcción, ya que la porosidad efectiva (poros interconectados) de los carbonatos son más importantes que su origen genético, pues éstos controlan las propiedades mecánicas y la durabilidad de la mayoría de los carbonatos (David et al., 2013; Siegesmund & Snethlage, 2011).

Siegesmund y Snethlage (2011) expresaron que las calizas más porosas son las formadas en ambientes marinos, donde pueden alcanzar hasta el 50% de porosidad, sin embargo, normalmente oscilan entre rangos de 10-30%. Igualmente mencionaron que, las rocas que se formaron durante el Paleógeno hasta la actualidad son más susceptibles al intemperismo y al deterioro.

Del mismo modo, la República Mexicana ha sido objeto de estudio para caracterizar a las rocas y su deterioro, pues existe la necesidad de encontrar las causas, agentes y procesos de deterioro que degradan a las rocas para poder proporcionar información que mejore la toma de decisiones al momento de intervenir un bien (García-Solís y Valencia-Pulido, 1997 en Straulino Mainou, 2012), especialmente en estados que poseen centros históricos y zonas arqueológicas catalogadas como patrimonio mundial por la UNESCO, tal es el caso de la Ciudad de México, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro y Oaxaca, por mencionar algunos. Los estudios realizados comprenden análisis petrográficos, petrofísicos y geoquímicos principalmente a ignimbritas, calizas, conglomerados, tobas y basaltos (Alfonso López-Doncel, 2015; Lerma Pérez, 2021; López-Doncel et al., 2013, 2016; Molina Maldonado, 2016; Montante Hernández, 2019; Mora Navarro, 2015; Rocha Reina, 2020, 2022).

En la Península de Yucatán, los trabajos que se han enfocado en el análisis de las propiedades de las rocas de construcción y su relación con el deterioro son:

Straulino-Mainou (2010, 2012) realizó trabajos en el sitio arqueológico Río Bec (sureste de Campeche), donde reportó que la principal causa de intemperismo de las calizas es la disolución del carbonato de calcio. La autora realizó estudios petrográficos, microscopía electrónica de barrido con microsonda y difracción de rayos X para conocer la composición mineralógica y química de las rocas; así como análisis petrofísicos (densidad real, densidad aparente, porosidad, retención de humedad, colorimetría y dureza Shore D). Los resultados

obtenidos indican que la matriz micrítica de la roca provoca que por su tamaño y estructura particular tenga una amplia superficie para que los agentes de deterioro actúen; así mismo, las impurezas que presentan un comportamiento diferencial también favorecen su deterioro. Por otro lado, las rocas que presentan menos deterioro exhiben una estructura más cristalina que las hace más resistentes al intemperismo.

Mientras que, García-Solís et al. (2023), realizaron análisis microfaciales a las rocas carbonatadas de Calakmul, localizado al sureste de Campeche, que además de brindar información sobre el ambiente de depósito de las rocas del edificio y determinar la proveniencia de estos materiales pétreos, dichos análisis les permitieron mostrar la calidad de los diferentes procesos de construcción y su durabilidad contra el deterioro, dando como resultado que la alta porosidad que presentan las calizas conformantes del edificio, hizo que esta roca fuera suave para tallarla y/o labrarla, sin embargo, esta misma propiedad no la hace resistente a los factores climáticos y al intemperismo. Las condiciones intrínsecas como la porosidad y las matrices heterogéneas hacen que estos materiales sean más susceptibles al deterioro.

Los ensayos petrofísicos son de necesaria realización para evaluar la alterabilidad de las rocas (Becerra & Pulido González, 2019). Estos ensayos están regidos por normas específicas, entre las que se encuentran: American Society for Non destructive Texting (ASNT), International Society for Rock Texting Materials (ISRM), American Society for Testing Materials (ASTM), German Institute for Standardization (DIN, utilizadas en el presente trabajo).

1.5 Localización del área de estudio

Las zonas arqueológicas de Kabah y Sayil se encuentra en la Reserva Estatal Biocultural del Puuc o Ruta Puuc localizada en el estado de Yucatán, a aproximadamente 105 kilómetros al suroeste de Mérida. Kabah se ubica en el municipio de Santa Elena en las coordenadas geográficas 20°14'52"N de latitud y 89°38'51" W de longitud; mientras que Sayil, se localiza entre el límite de los municipios de Santa Elena y Oxkutzcab con coordenadas geográficas 20°10'41"N de latitud y 89°39'7" W de longitud (Figura 1).

1.6 Clima en Yucatán

El estado de Yucatán presenta dos tipos de climas: cálido subhúmedo (con el 85.5% de la superficie del estado) y clima seco y semiseco (con 14.5%), el cual se localiza al norte del estado. La temperatura media anual es de 26°C, la temperatura máxima promedio es alrededor de 36°C que se presenta en el mes de mayo, mientras que, en el mes de enero se presenta la temperatura mínima promedio de 16°C. La precipitación promedio anual es de 1000 mm, las lluvias se presentan en verano en los meses de junio a octubre. La humedad más alta registrada se da en los meses de agosto a octubre con alrededor de 75%, y los meses con la menor humedad registrada se dan de marzo a mayo con alrededor de 55% (Tabla 1) (INEGI, 2017).

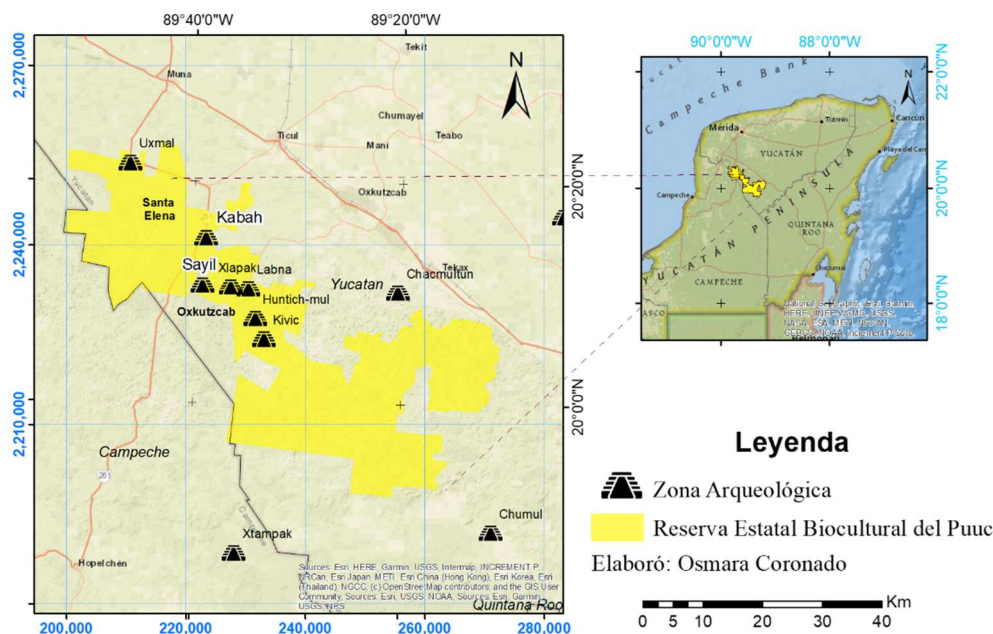


Figura 1. Localización de las zonas arqueológicas de estudio. Icono maya de ©PNGWING.

Tabla 1. Valores promedio de humedad (%) en Yucatán de 1991-2021, y valores promedio de horas de sol y días lluvioso de 1999-2019 (Climate Data, 2024).

Mes	En	Fe	Ma	Ab	Ma	Ju	Jul	Ag	Se	Oc	No	De
Humedad (%)	67	62	57	55	58	70	70	72	77	75	70	69
Horas de sol	7	8	9.1	9.7	10.2	9.7	10.1	9.7	8.8	7.9	7.3	6.9
Días de lluvia	3	2	3	4	6	13	12	13	14	10	4	3

En la Figura 2 se observa un climograma de 1991 a 2020 de la estación 31027 en Santa Elena, Yucatán localizada en las coordenadas 20.3275° de latitud norte y -89.6394° de longitud oeste a una altitud de 43 msnm. Los datos se obtuvieron de la CONAGUA (2024).

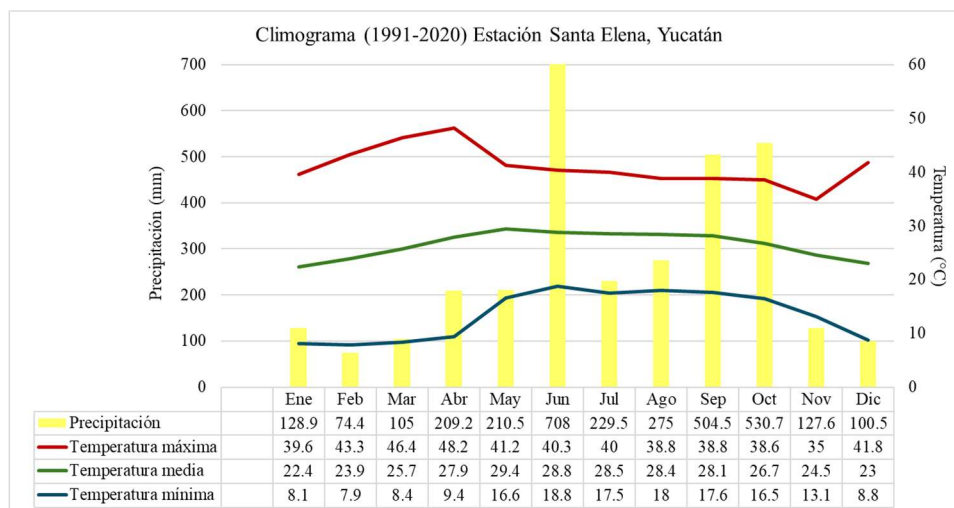


Figura 2. Climograma (1991-2020) de la estación Santa Elena, Yucatán. Datos obtenidos de CONAGUA (2024).

2. La naturaleza de las rocas de construcción y su deterioro

2.1 Formación de rocas carbonatadas

Las rocas carbonatadas constituyen entre el 20% al 25% de todas las rocas sedimentarias en el registro geológico, aproximadamente, por lo que este tipo de material pétreo se encuentra en edificios y monumentos de todo el mundo (Siegesmund & Snethlage, 2011).

Este tipo de rocas son formadas química y bioquímicamente:

- 1) por la precipitación química directa de partículas iónicas o coloidales disueltas en soluciones acuosas salinas concentradas (aloquímicas o alóctonas), o
- 2) debido a la acumulación y litificación del material sólido que han generado algunos tipos de organismos vivos (ortoquímicas o autóctonas).

2.1.1 Componentes de las rocas carbonatadas

Las calizas a pesar de ser mineralógicamente simples tienen una composición variada, dentro de la cual los principales componentes son: granos, matriz y cemento. Los tipos de granos son subdivididos en granos esqueléticos y no esqueléticos (Tabla 2) (Tucker & Wright, 1990).

Matriz. El término matriz denota el material intersticial entre los granos más grandes. La matriz de la mayoría de las calizas consiste en cristales de calcita de tamaño fino, denominado micrita. El tamaño de los cristales es menor a 4 micras (Tucker & Wright, 1990).

Granos esqueléticos. Los granos de origen esquelético son restos de los diversos organismos, principalmente invertebrados con conchas producidas por secreción calcárea que se encuentran flotando dentro de la matriz. Hay una gran variedad de granos esqueléticos, entre ellos se encuentran las algas calcáreas, foraminíferos, esponjas, corales, briozoarios, braquiópodos, moluscos, artrópodos y equinodermos; los cuales son identificados en base a su tamaño, forma, microestructura y mineralogía original (Figura 3).

Tabla 2. Tipos de granos no esqueléticos (Tucker & Wright, 1990).

Tipos de granos no esqueléticos	
Granos recubiertos	Ooides, pisoides y oncooides. Hay varios tipos de granos recubiertos calcáreos, todos comparten una forma esférica o subesférica, con diámetro menor a 2 mm a menudo de 0.2 y 0.5 mm.
Peloides	Granos de arena o clastos microcristalinos de carbonatos de tamaño fino (0.1 a 0.5 mm) que carecen de estructura interna. La mayoría son esféricos, subesféricos, elipsoidales o irregulares. Muchos de estos pellets son producto de materia fecal de peces y crustáceos (Tucker y Wright, 1990).
Granos agregados	Se forman cuando partículas de carbonatos como ooides y peloides, se adhieren a otras. La mayoría de grano medio a fino (0.5 a 3 mm). Los poros intersticiales son rellenos por micrita.
Clastos de calizas	Fragmentos de calizas preexistentes derivados de fuentes externas. Pueden ser: -Intraclastos: fragmentos débilmente consolidados retrabajados dentro del área de sedimentación. -Extraclastos o litoclastos: consisten en litologías que no son representativas del área de depósito.

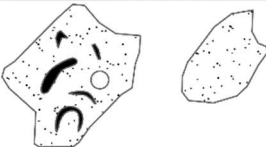
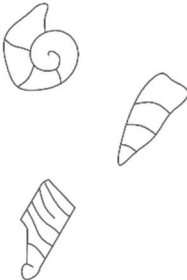
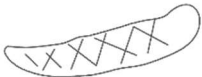
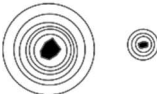
Granos no esqueletales				Granos esqueletales
Peloides	Granos agregados		Clastos	
				
Granos recubiertos				
				
Cortoides	Oncoides	Ooides	Pisoides	

Figura 3. Ejemplos de granos esqueletales y no esqueletales en las calizas. Tomado de Flügel (2004). Elaboró Osmara Coronado.

2.1.2 Esquemas de clasificación

Hay diferentes enfoques para clasificar a una caliza, con base en la textura, en la composición y en aspectos como la biota y la diagénesis.

Antes de clasificarlas es necesario determinar los constituyentes: granos esqueletales y no esqueletales, la matriz y cemento, así como la relación entre los granos, es decir, si éstos son lodo o grano soportado y sus relaciones porcentuales.

Los porcentajes semicuantitativos de la masa básica como de los componentes se pueden calcular mediante tablas como se muestra en la Figura 4.

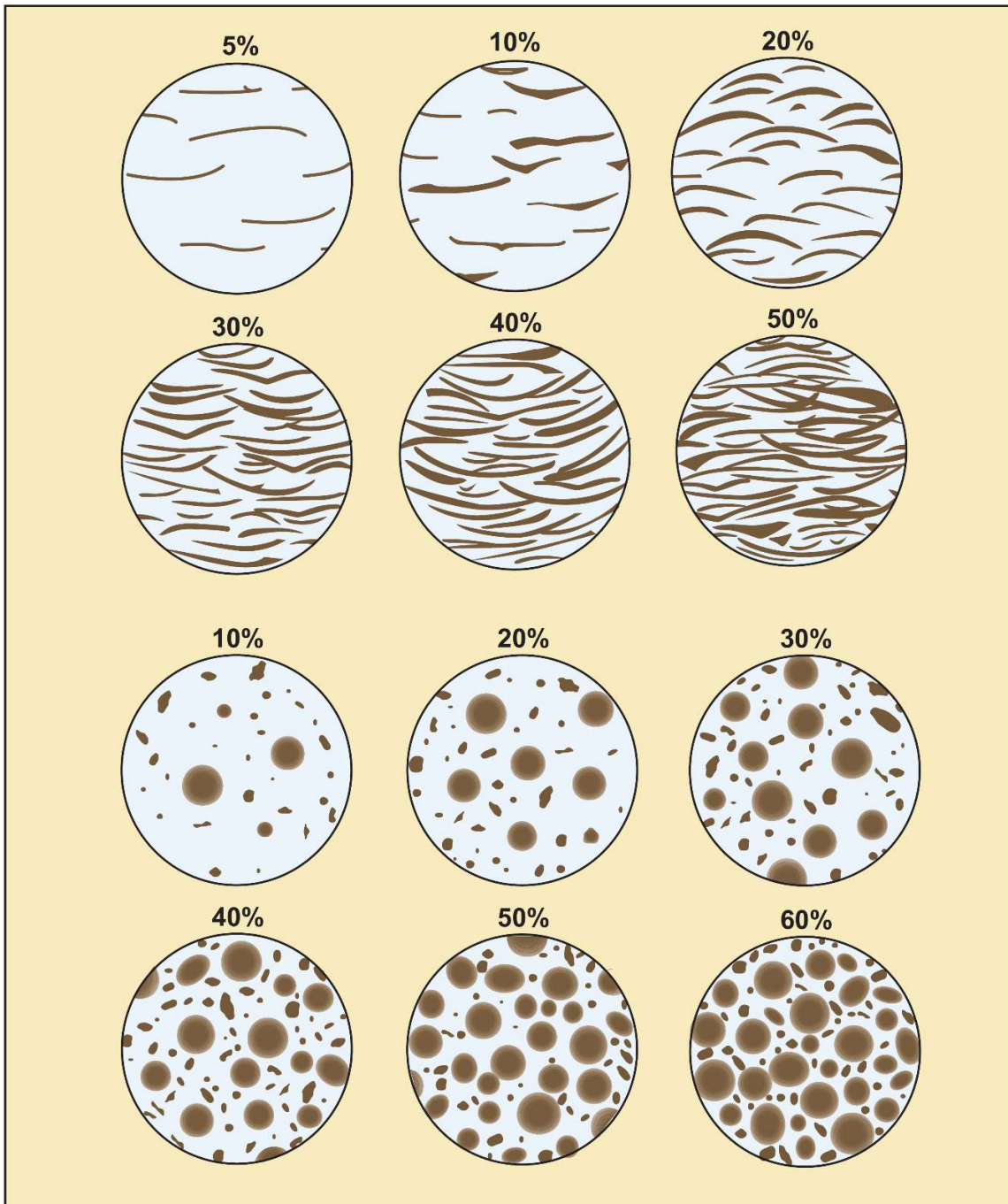


Figura 4. Tabla para estimar la abundancia de constituyentes en secciones delgada. Tomado de *Scholle & Ulmer-Scholle (2003)*.

Se usan actualmente tres sistemas de clasificación para los carbonatos, cada uno con un énfasis diferente: Dunham (1962), Embry & Klovan (1972) y Folk (1962), como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Esquemas de clasificación para las rocas carbonatadas.

Clasificación	Descripción
Clasificación de Folk, 1962 (composicional)	Distingue: a) los componentes (aloquímicos), b) la matriz y, c) el cemento (esparita) (Figura 5). El nombre de la caliza se da la combinación del tipo de material intersticial (micrita o esparita), un prefijo de acuerdo con el aloquímico predominante, y se le agrega la palabra “rudita” si el tamaño de los aloquímicos es mayor a 2 mm. Por ejemplo: a una caliza con abundantes bioclastos mayores a 2 mm y con matriz micrítica se le denomina biomicrudita. Otras categorías de Folk son: dismicrita, la cual es micrita bioturbada o recrystalizada con cavidades (normalmente rellenas de esparita) y con abundantes birdeyes; y las biolititas, que son rocas calcáreas biogénicas formadas por secreciones de una concha calcárea (rocas arrecifales).
Clasificación de Dunham, 1962 (textural)	Enfatiza la textura de las calizas especialmente el empaquetamiento de los granos (aloquímicos) y la relación de los granos con la matriz. Los tipos de aloquímicos son ignorados. Se diferencian las fábricas: soportado por lodo (mud-supported) significa un lodo calcáreo con componentes que flotan en él y entre los cuales no existe contacto, mientras que soportado por granos (grain-supported) se da cuando estos componentes se tocan o apoyan entre ellos (Figura 6). Diferencia 2 grupos de calizas: 1) Calizas alóctonas: aquellas cuyos componentes primarios (equivalente a los aloquímicos de Folk) no se originaron en el lugar de la depositación (mudstone, wackestone, packestone y grainstone). 2) Calizas autóctonas: aquellas cuyos componentes primarios son formados in situ, principalmente las calizas arrecifales (boundstones).
Clasificación de Embry y Klován, 1972	Embry y Klován modifican la clasificación de Dunham, indicando dos categorías para aquellas que contengan componentes mayores a 2 mm: floatstone, cuando son lodo soportado y rudstone cuando son grano soportado. Además, dividen a los boundstone en framestone, bindstone y bafflestone (Figura 6).

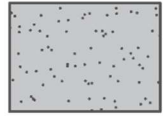
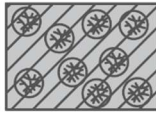
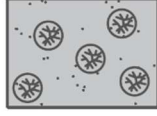
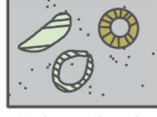
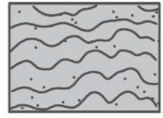
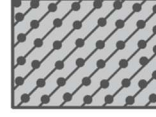
		ROCAS ALOQUÍMICAS		ROCAS ORTOQUÍMICAS
Tipos de aloquímicos	Intraclastos	Cemento esparítico 	Matriz micrítica 	Matriz micrítica Ausencia de aloquímicos 
		Intraesparita	Intramicroita	Micrita
	Ooides			
		Ooesparita	Oomicroita	Dismicroita
	Biogenos			ROCAS AUTÓCTONAS AL ARRECIFE 
		Bioesparita	Biomicroita	
Peloides				
		Pelesparita	Pelmicroita	Biolitita

Figura 5. Clasificación de Folk (1962). Tomado de Flügel (2010). Elaboró Osmara Coronado.

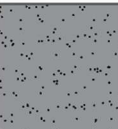
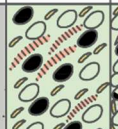
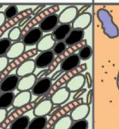
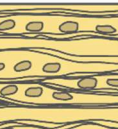
CALIZAS ALÓCTONAS						CALIZAS AUTÓCTONAS		
Componentes primarios sin relación organogénica durante la sedimentación						Componentes primarios con relación organogénica durante la sedimentación		
Menos del 10% de componentes >2mm				Más del 10% de componentes <2mm		Relacionados con organismos		
Con micrita(<0.03 mm)		Sin micrita		Mud-supported	Grain-supported	Acumulador de sedimentos (corales)	Aglutinador de sedimentos (algas)	Formador de construcciones (corales)
Mud-supported		Grain-supported						
Menos del 10% de componentes (>0.03 mm <2 mm)	Más del 10% de componentes							
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Floatstone	Rudstone	Bafflestone	Bindstone	Framestone
								

Figura 6. Clasificación de carbonatos según Dunham (1962) modificado por Embry y Klovan (1972). Traducción de López Doncel (2004). Elaboró Osmara Coronado.

2.1.3 Ambientes de depósito y cinturones de facie

Los sedimentos carbonatados se originan en tres escenarios principales: a) en los continentes, b) en la zona de transición entre la tierra y el mar, y c) en el mar somero y profundo (Flügel, 2010). La textura y composición de las calizas revela mucho sobre el ambiente de depósito, especialmente para diferenciar los ambientes someros de los profundos en las rampas y plataformas carbonatadas (Flügel, 2010).

El término rampa carbonatada se refiere a una superficie deposicional suavemente inclinada que pasa gradualmente de un entorno somero y de alta energía a un entorno profundo y de baja energía, se compone de rampa interna, rampa media y rampa profunda (Figura 7) (Flügel, 2010a; Wright & Burchette, 1998).

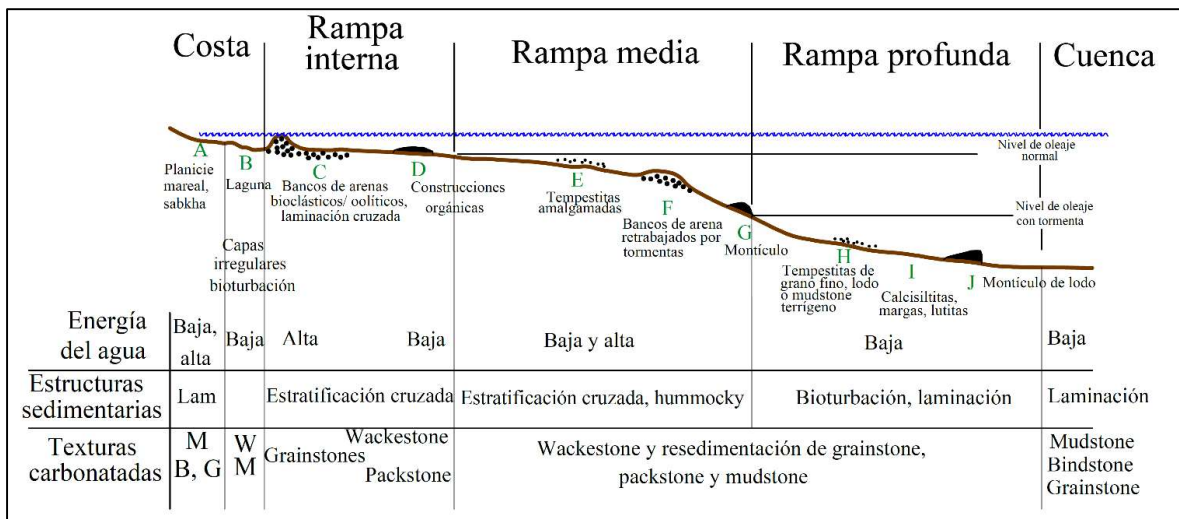


Figura 7. Cinturón de facies de una rampa carbonatada. Tomado de Flügel (2010). Elaboró Osmara Coronado.

Las zonas de facies (ZF) son cinturones diferenciados en función de los cambios de los criterios sedimentológicos y biológicos a través de los ambientes rampa interna-rampa media-rampa profunda-cuenca en las rampas carbonatadas, que a su vez se dividen en microfacies: conjunto de todos los datos sedimentológicos y paleontológicos que pueden describirse y clasificarse en láminas delgadas (Flügel, 2010).

Ahr (1973), propuso el modelo de rampa carbonatada, aplicados a carbonatos de plataforma Paleozoicos y Mesozoicos, el cual resume la distribución de facies en una superficie suavemente inclinada desde la costa hasta aguas más profundas (RMF) (Figura 8, Anexo 1).

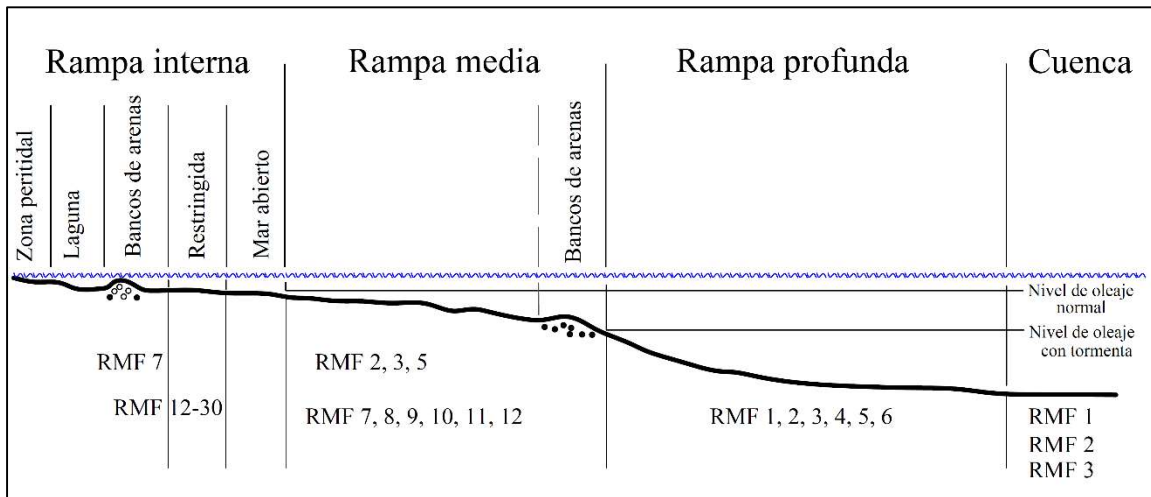


Figura 8. Modelo de facies y microfacies en una rampa carbonatada. Tomado de Flügel (2010). Elaboró Osmara Coronado.

2.2 El deterioro en las rocas de construcción

El deterioro se define como la modificación o cambio del material pétreo que implica un empeoramiento o declinación de sus características físico-mecánicas, lo que conduce a una disminución o depreciación de la calidad y/o valor (Esbert et al., 1988; García de Miguel, 2011).

Los diferentes tipos de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas) poseen diversas propiedades, principalmente debido a su génesis, lo que las hacen aptas o no para su empleo como material de construcción, asimismo estas propiedades determinan su respuesta ante los agentes que ocasionan el deterioro (Siegesmund & Snethlage, 2011).

La susceptibilidad en mayor o menor medida al deterioro de una roca de edificación depende no sólo de las características intrínsecas de material, como la mineralogía, textura, porosidad, etcétera; sino también de los agentes y factores extrínsecos que existen en la ubicación del edificio, como la acción biológica de organismos vivos, las condiciones climáticas y las acciones antropogénicas (Esbert et al., 1991; Villar Rubio et al., 2014).

El intemperismo se define como el conjunto de procesos químicos, físicos y biológicos que hacen que los materiales rocosos expuestos a los efectos de la intemperie se desintegren y descompongan (Esbert et al., 1988).

Intemperismo físico: es causado por procesos mecánicos como congelación y descongelación, la acción de las sales, así como los ciclos hídricos, térmicos y húmedos-secos. Como resultado de estos procesos, la piedra sufre una fragmentación progresiva a lo largo de las superficies anisotrópicas preferidas. El intemperismo físico en las calizas provoca grietas, fracturas, fisuras, disgregación, alveolización y desprendimientos (Siegesmund & Snethlage, 2011; Straulino Mainou, 2012).

Intemperismo químico: es el resultado de las reacciones que los factores climáticos inducen en los componentes minerales de la roca, como el agua, el dióxido de carbono y el oxígeno del aire. Estas reacciones químicas tienen lugar en gran medida a nivel submicroscópico: en los poros, las fracturas y en los contactos de los granos. La principal causa de intemperismo

químico en las calizas es la disolución del carbonato de calcio (Siegesmund et al., 2002; Straulino Mainou, 2012).

El factor ambiental más importante es la presencia de humedad sobre y dentro de la roca. El agua no sólo puede inducir algunas reacciones químicas, sino que, en conjunto con ciclos térmicos, puede causar daños físicos por congelación-descongelación, ciclos hídricos y controlar la cristalización de la sal cuando hay sales solubles presentes (Siegesmund et al., 2002).

Otro factor importante, son los contaminantes atmosféricos que se presentan esencialmente en las áreas urbanas e industriales, los cuales proceden de los procesos de combustión (centrales térmicas, automóviles, industria), que generan gases entre los que destacan el dióxido de azufre (SO_2), los compuestos de nitrógeno (NO_x , NH_4), los óxidos de carbono (CO , CO_2), los cloruros (HCl) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) que alteran a las rocas de los edificios. Por su parte, las zonas costeras presentan otro tipo de contaminantes naturales: los aerosoles salinos. La presencia en la atmósfera de estos contaminantes, junto a elevados contenidos en vapor de agua, genera contaminantes secundarios, como la lluvia ácida (Alonso et al., 2006).

La mampostería a base de caliza es muy sensible a muchos de los factores ambientales, como la contaminación, la oxidación, la temperatura y la humedad relativa, especialmente en entornos urbanos (El-Gohary, 2010).

Intemperismo biológico: es la acción de organismos o bacterias que generan ácidos y agentes quelantes que pueden corroer y atacar los minerales presentes en la roca (Siegesmund et al., 2002).

En la zona maya de Yucatán se pueden encontrar depósitos verdes y negros en rocas calizas, estos son provocados principalmente por bacterias, hongos y algas, los cuales llevan a cabo procesos de biosolubilización, es decir, producción de metabolitos ácidos que dañan al sustrato potencializando los efectos agresivos de la corrosión atmosférica (Videla et al., 2003).

Las rocas de los edificios –como en la naturaleza–, inmersas en un determinado ambiente durante cierto tiempo, tienden a alterarse, es decir, sufren cambios en su naturaleza, que pueden manifestarse en su aspecto externo (color, estado de agregación) o en su comportamiento (dureza, resistencia) (Alonso et al., 2006; García de Miguel, 2011),

Según Martínez Piñeiro et al. (2021) el deterioro de las rocas es el resultado de los fenómenos naturales atmosféricos, junto con el intemperismo químico y/o físico de las rocas que conllevan a la disminución de su condición, calidad y funcionalidad.

En el Proyecto de conservación y restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc (2022-2023), agruparon los indicadores de deterioro en nueve categorías descritas continuación:

1. **Presencia biológica.** Colonización biológica: presencia de algas, musgos, hongos o líquenes. Presencia de organismos vivos, cuya actividad y los productos derivados de su hábitat afectan de manera directa o indirecta.

2. **Fuentes de humedad.** Afectación de los muebles a causa de la humedad relativa y/o contenida en el inmueble que los contiene. La presencia de humedad en la mayoría de los casos favorece la formación de sales y otros efectos causados por los ciclos de secado y humectación.
3. **Fracturas en piedras y aplanados.** Rompimiento del soporte mural como los sillares o bloques de piedra. Este tipo de fracturas afectan seriamente la estabilidad estructural, además sus efectos se reflejan en los aplanados.
4. **Desprendimientos.** Pérdida de anclaje o unión entre fases, por ejemplo, entre el soporte-aplanado o soporte-relieve. A pesar de la separación los elementos aún permanecen en su lugar o hay fragmentos aislados. En caso de prolongarse puede originar pérdida definitiva del material.
5. **Pérdida de material.** Pérdida o caída de materiales constitutivos, ya sea del soporte, el aplanado o el acabado superficial. Provoca pérdida de materiales constitutivos que se consideran como faltantes o lagunas.
6. **Presencia de sales.** Producto de la combinación entre humedad y minerales del material constitutivo o del contexto directo. Las sales se manifiestan en la superficie o al interior, son variables en color, dureza, composición química, grosor y solubilidad.
7. **Alteración cromática.** Distorsión de los colores originales de la paleta cromática de la capa pictórica, lo cual generalmente es causado por reacciones fotoquímicas.
8. **Intervenciones anteriores**
9. **Daños antropogénicos**

Además de las características del material y del ambiente, existen factores constructivos o propios del edificio que afectan a la alteración de la roca, derivados en parte de su manipulación previa y de su puesta en obra, así como de la posición que ocupa en la fábrica y su relación con morteros, e inclusive de procesos físicos que sufren los materiales cuando forman parte de estructuras constructivas, las cargas que tienen que soportar o por problemas de subsidencia. Lo anterior puede ocasionar fracturas, exfoliaciones y descamaciones; por su parte, la naturaleza de los morteros y la de otros materiales de construcción como los metales con los que está en contacto, pueden aportar productos nocivos (sales solubles, óxidos de hierro) en los elementos singulares, como las zonas labradas, cornisas y dinteles, se aumenta la superficie expuesta y modifican la circulación y retención del agua (Alonso et al., 2006).

De igual manera, la acción del hombre también tiene su impacto en los edificios monumentales, debido a veces al creciente uso (desgastes, golpes), a conflictos bélicos (impactos, incendios), a intervenciones incorrectas (tratamientos desacertados) y a la falta de mantenimiento (Alonso et al., 2006).

2.2.1 Deterioro de los mosaicos del Codz Pop (E2C6) y del Gran Palacio de Sayil (E2B1)

El material de construcción por excelencia en la arquitectura Puuc es la caliza disponible en la zona, una variedad de gran dureza que permitió a sus constructores desarrollar exquisitas decoraciones de fachada, formadas por mosaicos de piedra labrada. Toda la arquitectura se

revestía con una capa de estuco que servía para impermeabilizar y regularizar las superficies, tanto exteriores como interiores, y era soporte de pinturas murales (Montuori & Gilabert Sansalvador, 2018).

Gracias a la calidad de los morteros y a la técnica de mampostería de recubrimiento, los edificios del Puuc soportan de manera increíble el paso del tiempo. Los morteros de cal, junto con las rocas calizas ya sea labradas o burdas, forman núcleos, lo que propicia caídas en grandes bloques, que se disgregan lentamente. Los principales agentes de deterioro se presentan por la falta de mantenimiento y los agentes naturales que afectan a los edificios, como el crecimiento de vegetación, la absorción de agua ya sea por filtración o capilaridad y la erosión. Estos producen en principio la degradación de las cubiertas y por ende un proceso de absorción de agua que en época de lluvias incrementa el peso del núcleo, ocasionando fallas en los dinteles y esquinas y en periodos de sequía, al evaporarse la humedad, empieza el deterioro de los morteros, acabando por disgregarse. Con el tiempo, el techo es invadido por la vegetación de la región que ocasiona derrumbes parciales (Huchim Herrera & Toscano, 2018; Straulino Mainou, 2010).

En cuanto a los mosaicos de piedra que recubren las fachadas del Codz Pop (E2C6) y del Gran Palacio de Sayil (E2B1), las calizas labradas dependen del continente que las soporta (el inmueble o edificio) y sufren alteraciones al estar asociadas a este conjunto monumental (Hernández Tangarife, 2024).

Hernández-Tangarife et al. (2022) mencionaron que, los deterioros y problemáticas que se observan en estos palacios se deben a cuatro causas: 1) la exposición a la intemperie de los vestigios, 2) intervenciones arqueológicas y arquitectónicas inconclusas, 3) las intervenciones de restauración inadecuadas, y 4) al aumento del turismo en los sitios, esta se incluyó a manera de prevención por el impacto que traerá consigo el Tren Maya.

La problemática asociada a los mosaicos de las fachadas se deriva principalmente de la exposición a la intemperie, la falta de mantenimiento, las liberaciones y consolidaciones arqueológicas inconclusas. Lo anterior, conlleva a que los acabados arquitectónicos de las fachadas como mosaicos y demás elementos iconográficos estén incompletos o faltantes. No contar con los elementos constitutivos que direccionen y protejan de la caída de agua, filtraciones y escurrimientos directamente sobre los mosaicos, entre las bóvedas y muros, suscita a la invasión y colonización biológica entre juntas y sobre la superficie pétreas, que ocasiona disgregación de morteros y enlucidos, así como el desprendimiento y pérdida de sillares (Hernández Tangarife et al., 2022).

Asimismo, las propias rocas sufren otros deterioros por causas intrínsecas, principalmente asociadas a la saturación de agua y presencia de sales, que causan pérdidas importantes de su matriz pétreas, lo que amerita la talla o labrado de la roca, perdiendo detalles que sus creadores originales plasmaron en ellos. Debido a lo anterior, el deterioro de los mosaicos se identifica de manera individual por pieza o módulo de mosaico (Hernández Tangarife et al., 2022).

Es importante mencionar que, existe la acumulación de elementos arquitectónicos en las terrazas, patios aledaños y dentro de los cuartos de los palacios, los cuales presentan mayor daño en comparación a las piezas ubicadas en los muros debido al tiempo. Estos elementos exhiben una serie de problemáticas de conservación relacionadas con tres factores de alteración que son: 1) la erosión por intemperie mismo que afecta tanto material como estéticamente al ocasionar la pérdida de relieves labrados; 2) la colonización biológica por exposición directa, como el crecimiento de pastos, plantas menores, encharcamientos e incidencia de fauna nociva; y 3) la fragmentación de las piezas de cornisa, producidas por caídas o golpe de las piezas, así como por la presencia de minerales de distinta composición, que causan disolución y eventualmente la separación de los fragmentos por pérdida de material (Hernández Tangarife et al., 2022)

A continuación, en la Tabla 4 se muestra una relación de la definición y los indicadores de deterioro registrados por los restauradores del Proyecto de Conservación de la Ruta Puuc entre el 2022 y el 2023 en las fachadas oeste del Codz Pop (E2C6) y sur del Gran Palacio de Sayil (E2B1).

Se hace hincapié en los deterioros asociados preferentemente a las causas intrínsecas y su relación con el medio ambiente, objeto de la presente investigación, como son la por pérdida de material, fracturas, desprendimientos y la presencia de sales.

Tabla 4. Indicadores de deterioros registrados en el Codz Pop (E2C6) y el Gran Palacio de Sayil (E2B1). Definiciones y fotografías tomadas del glosario SCyR-C-INAH Yucatán y Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023).

Indicador de deterioro		Definición	Codz Pop (E2C6)	Gran Palacio de Sayil (E2B1)
Rasgos inducidos por pérdida de material	Delaminación	Pérdida por estratos que sigue la estructura de la laminación natural de la roca. Se manifiesta en escamas y hojuelas.		
	Erosión	Daños en el desgaste de la superficie por efecto de la fricción continua o violenta de agentes externos y naturales, como el agua o el viento. Los daños producidos por estos agentes son más profundos que la abrasión, existiendo una gran pérdida de material. En algunas ocasiones se identifica porque la superficie ha perdido su acabado superficial o pulimento además de modificar su textura, porosidad y permeabilidad.		
	Pérdida diferencial: nódulos (huecos)	Pérdida de material puntual de las calizas por impurezas de otros minerales. La pérdida de material se da de manera diferente, por la diferencia de dureza de los minerales de estas zonas. (usualmente más suaves).		

	Pérdida diferencial: nódulos de hierro	Erosión puntual que afecta a las calizas que presentan vetas de impurezas con alto contenido de hierro. Se pueden perder las partes de calcita o los nódulos de hierro. La pérdida puntual de estas zonas de por la diferencia de dureza que existe entre estos estratos (usualmente más suaves).		
	Pérdida diferencial por vetas	Pérdidas de la roca que se relacionan con las vetas que la constituyen por sedimentación. La pérdida se observa en franjas marcadas que corresponden a materiales más suaves dentro de la composición de la matriz calcárea.		
	Pérdida diferencial helicoidal	Pérdida de material de forma helicoidal, circular o alveolos.		
	Pérdida diferencial por detritos	Pérdida diferencial del soporte pétreo por composición de su matriz calcárea que se encuentra dispuesta en clastos (brecha calcárea). Es decir, el soporte pétreo está formado por un conjunto de piedras más gruesas y duras que se desprenden. Se observan como pérdidas de formas redondeadas y homogéneas, de distintos tamaños y profundidades, quedando la materia calcárea pulverulenta.		

Fracturas en piedra	Disgregación	Pérdida de cohesión superficial y ligera falta de cohesión del material constitutivo en gránulos finos. Un método de identificación de la disgregación es por la pérdida en grano a diferencia de la pulverulencia que es en polvo		
	Pulverulencia	Pérdida de cohesión superficial y ligera falta de cohesión del material constitutivo en polvo. Pueden permanecer en su posición original, pero por la acción ejecutante de algún agente externo, estas partículas colapsan. Un método de identificación es un ligero manchado de los dedos cuando éstos se deslizan sobre la superficie.		
Desprendimientos	Fracturas	Efecto producido en un Bien Cultural (activo o inactivo - estable), en el que se han separado por completo partes que conforman un objeto, atravesando todos sus estratos. Rompimiento del soporte mural, sillares, muro o elementos escultóricos que compromete seriamente la permanencia de este. Los elementos pueden estar fracturados sin desplazarse.		

	Grietas	Hendidura alargada y profunda con una abertura mayor a 2mm, que se forma por efecto de movimientos o asentamientos de los elementos estructurales del soporte, sea de manera superficial o interna o ambas. Atraviesa transversalmente de pared a pared.		
	Fisuras	Ligera hendidura, poco profunda con una abertura menor a 1mm. Se produce por efecto de movimientos ligeros de elementos estructurales del soporte, o por efecto de la contracción mecánica del secado de las diferentes capas de enlucido. No atraviesa transversalmente de pared a pared, es menos profunda que la grieta; da origen a una grieta		
Presencia de sales	Velos	Película uniforme y blanca conformada por sales cristalizadas sobre cualquier superficie.		

3. Contexto histórico y geológico de la Región Puuc

3.1 Geología de Yucatán

3.1.1 La Plataforma de Yucatán

La Región Puuc se encuentra en la provincia geológica denominada Plataforma de Yucatán, que comprende los estados de Yucatán, Campeche, Quintana Roo, Tabasco y Chiapas, la cual está limitada al noreste por el escarpe de Campeche en el Golfo de México (Aranda García et al., 2010; Patiño Ruiz et al., 2013).

La extensa plataforma, está formada por rocas marinas del Cenozoico de tipo carbonatado-evaporítico, representada por secuencias sedimentarias progradantes sobre una corteza transicional con tendencia a adelgazarse hacia aguas profundas, con contenido escaso de material terrígeno, y con un espesor que varía de 1300 metros a más de 3000 metros, descansando sobre un basamento paleozoico (Figura 9) (López Ramos, 1973; Patiño Ruiz et al., 2013).

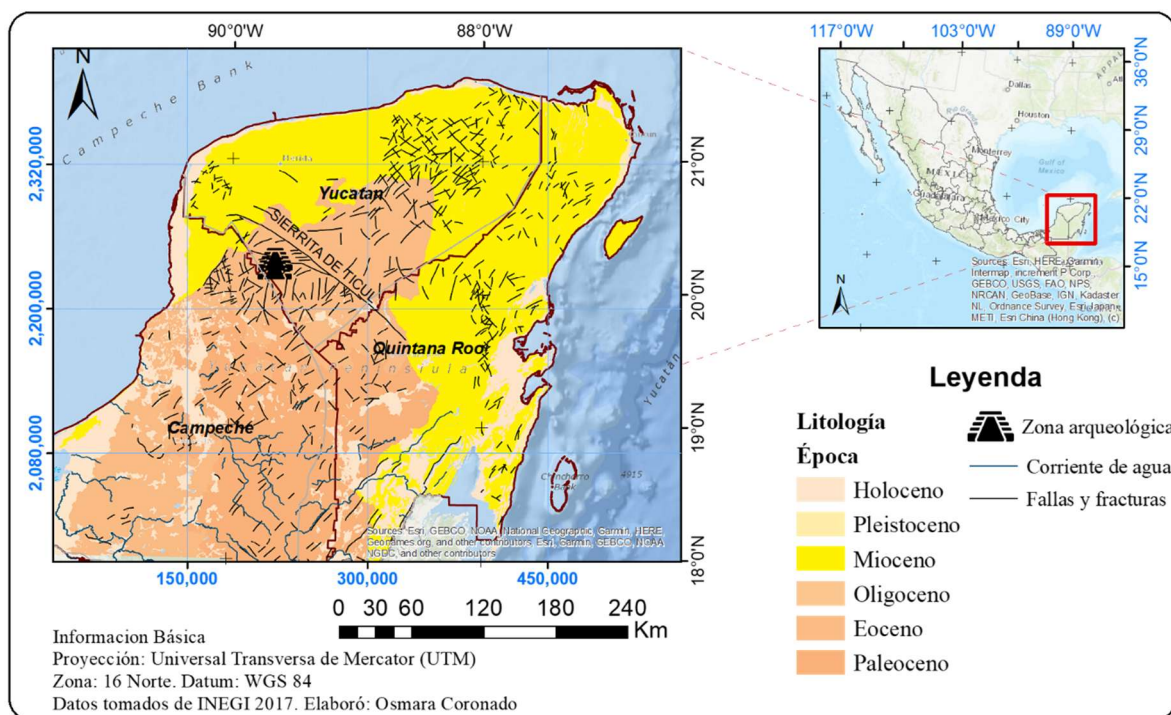


Figura 9. Mapa geológico de la Plataforma de Yucatán. Icono maya de ©PNGWING.

Los estratos que conforman a la plataforma de Yucatán son casi horizontales o con poca inclinación, los cuales han estado bajo subsidencia lenta, pero continua. Estratigráficamente, las rocas más antiguas afloran hacia la porción sur y las más jóvenes, en dirección al mar (Bautista, 2021; Sapper, 1986).

Las rocas del basamento, de acuerdo con perforaciones realizadas por PEMEX (Petróleos Mexicanos), están conformadas por esquistos, granitos, cuarcitas y rocas volcánicas del Silúrico-Misisípico (López Ramos, 1973, 1975).

Sobre el basamento, se acumuló una gruesa capa de sedimentos marinos en el Paleozoico tardío, seguido por sedimentación Jurásica continental (Paredes et al., 2019). Sin embargo, (López Ramos, 1975), documentó que, en ciertas perforaciones realizadas, existen capas rojas entre el basamento y las rocas cretácicas, de edad Triásico-Jurásico. Dichas capas están formadas por limolitas y areniscas de color blanco, blanco amarillento, blanco verdoso y marrón rojizo, e inclusive se encontraron intercalaciones de bentonita.

Durante el Cretácico temprano, la península de Yucatán estuvo cubierta por mares someros sobre los que se acumularon importantes espesores de carbonatos y evaporitas, que a su vez dieron origen a calizas, dolomitas y yesos (Bautista et al., 2005). Sobre estas se encuentran carbonatos (dolomía/caliza) depositados en ambiente de plataforma durante el Cretácico tardío (Paredes et al., 2019).

Las rocas del Paleoceno pertenecen a la Formación Icaiché, constituida por una secuencia de calizas cristalinas blancas, café claro y gris oscuro, finas a gruesas y yesos, con horizontes de arcilla que comúnmente contienen concreciones de sílice (INEGI, 2016; López Ramos, 1973).

Por su parte, las rocas del Eoceno están conformadas por calizas blancas y gris claras, de grano fino, compactas, con calcita en parte cristalizadas intercaladas con margas, pertenecientes a la Formación Chichén Itzá. Diversos autores, la describieron como unidad constituida por un paquete carbonatado conformado por mudstone wackestone, packstone en partes dolomitizado con intercalaciones de grainstone oolítico y textura sacaroide, brecha calcárea y horizontes de margas, con presencia de foraminíferos bentónicos y restos de algas del orden Dasycladales (Cardoso-Vázquez et al., 2004; PEMEX, 1988). Sin embargo, en la parte SW de la península observaron calizas blancas a grises, pero más comúnmente amarillas, impuras, con pedernal, de espesor delgado a mediano, a veces macizas y cristalinas, con o sin intercalaciones arcillosas sin mencionar un nombre formacional. Estas rocas, constituyen más de la mitad de la superficie de la península (Butterlin & Bonet, 1960).

Asimismo, el Oligoceno se caracteriza por margas blancas, gris- gris crema con intercalaciones de arcillas del mismo color, así como calizas grises y cremas compactas (Bautista et al., 2005).

En el Mioceno-Plioceno se encuentra la Formación Carrillo Puerto, que sobreyace a la Formación Chichén Itzá de manera discordante; está conformada por calizas blancas con ligero contenido de arcilla amarillento, en su base aparecen margas grises claro a café, con intercalaciones de arcillas. Las texturas identificadas en esta formación litológica son wackestone, packstone, grainstone y boundstone, que en ocasiones presenta alteraciones de coloración, generalmente de rojizas a crema, y contiene lamelibranquiados, gasterópodos, foraminíferos bentónicos, cnidarios, moluscos y ostrácodos (INEGI, 2016; Monier et al., 2011).

Posteriormente, en el Plioceno-Pleistoceno, existen calizas crema a blanco cremoso, suaves, porosas en partes oolíticas y otras con grandes cavidades, originadas por disolución

conteniendo fragmentos de conchas de macrofósiles de la Formación Bacalar (Paredes et al., 2019).

Finalmente, el Holoceno se caracteriza por el depósito de sedimentos carbonatados en las áreas costeras actuales (Bautista et al., 2005).

Como se mencionó anteriormente, las rocas superficiales que conforman la península de Yucatán están compuestas primordialmente por calizas y dolomitas de cientos de metros de espesor. Cuando estas rocas están en constante contacto con el agua, se produce una reacción química en la que los elementos de la caliza se disuelven y luego se elimina en solución (Sweitz, 2012).

Durante la temporada de lluvias, la lluvia ácida se filtra a través de las rocas carbonatadas, creando una solución compuesta por aragonito altamente soluble con alto contenido en magnesio y calcita menos soluble con bajo contenido en magnesio. Los minerales altamente solubles se eliminan en la solución, dejando atrás la calcita con bajo contenido en magnesio y menos soluble. En la estación seca, el movimiento capilar ascendente del agua durante la evaporación provoca la reprecipitación de la calcita hacia la superficie. A medida que se produce la recristalización del carbonato de calcio cerca de la superficie, se forma una capa de caliza con bajo contenido en magnesio. Debido a la erosión, la capa de roca queda expuesta de forma irregular en algunos lugares por debajo del suelo. Debajo de esta capa de roca hay una capa de marga, denominada sascab (tierra blanca en maya), que representa la disolución activa. Este sascab está compuesto por los minerales dolomita, talco y clorita que permanecen cuando la calcita y el aragonito se eliminan en solución (García Gil & Graniel Castro, 2010; Sweitz, 2012).

3.1.2 Tectónica de la Plataforma de Yucatán

En esta sección se consideraron principalmente los trabajos realizados por Filina (2019); Filina et al. (2020); Filina & Beutel (2022); Filina & Hartford (2021), para explicar la evolución tectónica de la PY, la cual está asociada a la formación del Golfo de México (GM).

La posición actual de la península de Yucatán está asociada a la apertura del Golfo de México.

Triásico tardío (230-205 Ma)

La formación del Golfo de México inició con la disgregación del supercontinente Pangea alrededor de 230 Ma, con el South Georgia Rift (SGR) en el sureste de América del Norte e incluyendo los bloques de Florida y Yucatán (Figura 10A).

Triásico tardío- Jurásico temprano (205-195 Ma)

Las intrusiones ígneas masivas de la Provincia Magmática del Atlántico Central (PMAC) marcaron el final del Triásico con la presencia de diques, sills y flujos basálticos desde el norte de Sudamérica y África hasta Iberia. El SGR está cubierto por los complejos magmáticos de este evento.

Los diques de la PMAC en el sureste de Norteamérica se inyectaron inicialmente con una dirección NW-SE, paralelos a los SDR (seaward-dipping reflectors). Sin embargo, alrededor de los 200 Ma se registró un cambio en la dirección de extensión a NNE-SSW en los diques y en los SDRs internos debido a un cambio importante en el movimiento de la placa.

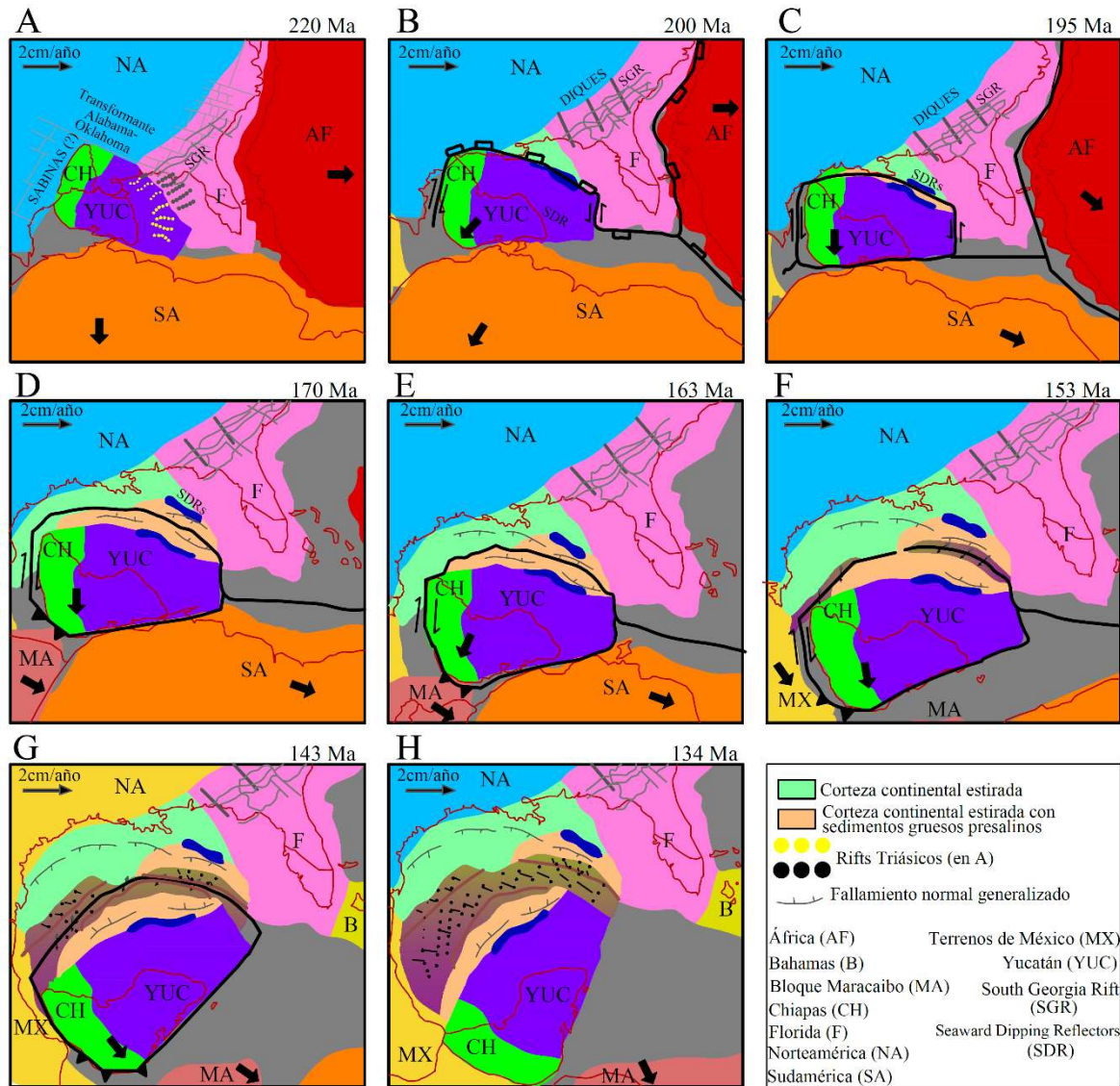


Figura 10. Reconstrucción tectónica del Golfo de México. Tomado y modificado de *Filina & Beutel (2022)*. Elaboró Osmara Coronado.

Debido a que el SGR dejó de extenderse, todo el movimiento hacia el sur de Florida cesó alrededor de 205 Ma, cuando Sudamérica y Yucatán quedaron separadas de Florida debido a la formación de corteza oceánica, lo que creó cuencas extensionales con tendencia NE-SW (Figura 10B).

Puesto que Sudamérica seguía unida a Yucatán, continuó influyendo en el movimiento de este bloque, lo que quizá dio lugar a la rotación de Yucatán, con ~30 grados en sentido contrario a las agujas del reloj.

Jurásico temprano- medio (195-165 Ma)

Entre 205 y 195 Ma, a medida que cesó la rotación de Yucatán, la tasa de movimiento aumentó hacia el sur de Yucatán en relación con Norteamérica. Lo anterior, debido al desarrollo de una corteza transicional adelgazada y al aumento de velocidad de América del Sur. El efecto de Norteamérica sobre Yucatán se vio obstaculizado por una corteza transicional que no transmitió bien las tensiones, pero ayudó a que Sudamérica influyera fuertemente en el movimiento de este bloque entre alrededor de 195-185 Ma (Figura 10C).

La formación de la corteza oceánica se dio entre los 200 y 195 Ma posiblemente entre los bloques de Florida/Suwanee y Sudamérica, así como en el borde entre África y Norteamérica. Estos movimientos relativos continuaron hasta ~165 Ma, donde, además la sal se depositó a lo largo de todo el GM. En el este, la acumulación ocurrió sobre secuencias masivas sedimentarias, mientras que, en el oeste, el depósito se produjo sobre la corteza transicional (Figuras 10D, E, F). En este lapso, África ya no influyó sobre Norteamérica.

Jurásico tardío (165-152 Ma) Fase oceánica 1

La propagación del fondo marino se inició en 165 Ma, específicamente entre la parte suroeste de Yucatán y el bloque Maracaibo (Figura 10E), que junto con otras zonas de subducción en esa área hicieron que el bloque de Yucatán comencará a rotar. La velocidad de rotación estuvo limitada por: a) la conexión entre Yucatán y la corteza continental norteamericana en el centro de la cuenca y por b) la propagación de la delgada corteza oceánica en el este y oeste.

La placa de Sudamérica sufrió un repentino aceleramiento durante este intervalo, por lo que tanto Yucatán como Sudamérica dejaron de afectarse mutuamente. En su lugar, el bloque de Yucatán estuvo condicionado por los terrenos mexicanos que más tarde formarían México y partes de Centroamérica.

Alrededor de 165 Ma, la corteza transicional a lo largo del margen NE y NW del bloque de Yucatán se adelgazó lo suficiente como para iniciar la expansión oceánica (Figura 10F). Sin embargo, el movimiento relativo respecto a Norteamérica fue probablemente ralentizado por la orientación oblicua de la propagación y la continua conexión continental entre Norteamérica y Yucatán. Esta rotación oblicua del bloque de Yucatán puede explicarse por la interacción de éste con los terrenos de México que se desplazaron hacia el sureste (Figuras 10E, F).

Jurásico tardío- Cretácico temprano (152-135 Ma) Fase oceánica 2

Entre 165 y 150 Ma se formó una zona de subducción a lo largo del margen suroeste de Yucatán, lo que causó que Yucatán rotara. Asimismo, se formó una corteza de propagación

ultralenta a lo largo de los márgenes noroeste y noreste de Yucatán, pero éste aún estaba conectado con Norteamérica en el centro de la cuenca (Figuras 10E-F).

Durante ~150 Ma, la subducción del suroeste continuó bajo lo que se convertiría en México. Adicionalmente, debido a un aumento de la velocidad de extensión y a un mayor aporte magmático la corteza transicional ya no unió a Norteamérica con Yucatán, lo que resultó en un aumento de la velocidad de rotación, una nueva dorsal y la formación de corteza oceánica de propagación lenta (Figuras 10F, G).

Entre 152 y 135 Ma, la reconstrucción del movimiento de Yucatán estuvo limitada principalmente por los centros de extensión oceánica y las fallas transformantes. La última conexión de corteza continental entre Norteamérica y Yucatán se rompió por el inicio de una dorsal de propagación lenta en el centro de la cuenca alrededor de 152 Ma. Un aparente aumento de la velocidad de rotación (Figura 10G) correspondió a un aumento de la velocidad de extensión de la corteza oceánica y un mayor aporte magmático. Hacia 135 Ma (Figura 10H), la zona de subducción entre Yucatán y México se cerró, y Yucatán se movió como parte de la placa de Norteamérica, eso hizo que la dorsal oceánica del GM dejara de extenderse y que el movimiento relativo entre Norteamérica y Sudamérica se reorientara hacia la dorsal del Caribe.

Alrededor de 135 Ma, Yucatán se acopló a México y cesó todo movimiento tectónico en el Golfo de México (Figura 10H).

Posterior a esta etapa, en el Cretácico tardío la PY experimentó una lenta subsidencia, lo que provocó un depósito de evaporitas y carbonatos, procedentes en su mayor parte de aguas someras. Esta sedimentación carbonatada atravesó el límite Cretácico/Paleógeno, sin embargo, en este límite la presencia de margas fue cada vez más notable. Por su espesor las evaporitas indican que tuvieron origen en dos cuencas, al sur de la península llegando hasta Guatemala con un espesor mayor a 2000 m, mientras que, en el centro de la península se reducen gradualmente hasta llegar a 1000 m y menos de 500 m al oriente (Butterlin & Bonet, 1960; López Ramos, 1973, 1975; Patiño Ruiz et al., 2013).

A lo largo del Mesozoico superior y el Cenozoico, la fracturación del bloque de Yucatán creó una serie de horsts y grabens a lo largo del margen oriental de esta plataforma. Los bloques más elevados se convirtieron en varios bancos aislados carbonatados, al menos durante el Cuaternario (Paredes et al., 2019).

En el Eoceno, un proceso orogénico en el sur de la península plegó los recién formados estratos de calizas y produjo un relieve ondulado, que determinaron la geomorfología actual. A finales del Oligoceno, este relieve fue sometido a una fuerte erosión en los materiales dolomíticos del Cretácico (Bautista, 2021; Bautista et al., 2005).

En el Mioceno y el Plioceno se originaron dos sistemas de fallas: uno con una orientación NE-SW, cuyas expresiones se observan a lo largo del cauce del Río Hondo y otro con orientación NW-SE a lo largo de la Sierrita de Ticul. La falla de Ticul se ha considerado de

tipo normal, constituida por calizas masivas cristalinas, dolomitizadas y silicificadas de color rojizo pálido del Eoceno (Árcega Cabrera et al., 2021; Bautista, 2021).

Al final del Plioceno y durante el Cuaternario la península adquirió la forma actual, no obstante, se siguen desarrollando grandes alineamientos de arrecifes de tipo biostromal al norte del banco de Campeche (López Ramos, 1973).

3.2 Contextualización histórica de la Región Puuc

El actual territorio del estado de Yucatán fue en época prehispánica, uno de los escenarios de la compleja evolución de la cultura maya. La región sureste de México fue testigo de ciudades poseedoras de una gran belleza arquitectónica y urbana (Hernández Rosado, 2000).

El término maya-yucateco Puuc ha adquirido varias connotaciones en la literatura antropológica, se le ha utilizado para designar a) un área geográfica, debido a que el vocablo significa cerro, monte o sierra baja, y se refiere a una zona de serranías de las Tierras Bajas Mayas, situada entre los actuales estados de Yucatán y Campeche; b) una región arqueológica comprendida en esta serranía; y c) un estilo arquitectónico, que exhibe la mayoría de las construcciones de las ciudades mayas concentradas en esta zona geográfica (Pollock, 1980).

Arquitectónicamente, el estilo Puuc, es una de las tres principales manifestaciones estilísticas que se produjeron dentro de los límites geográficos de la región, especialmente durante el Clásico Tardío (600-900 d. C.) (Gendrop, 1983).

Según Gendrop (1983), el Codz Pop (E2C6) y el segundo nivel de Gran Palacio de Sayil (E2B1), se ubican dentro del estilo Puuc Floreciente del Clásico Tardío (específicamente entre el 830 y el 879 d. C.).

En materia de arquitectura, en lo que se refiere a la disposición de edificios, ésta se torna más abierto, rompiendo con aquel compacto esquema de tipo acrópolis, y el templo-pirámide se hace menos frecuente en el área y se observa un descenso en el número de canchas destinadas al juego de pelota. La crestería, cuando existe, es siempre una estructura ligera, rítmicamente calada y que se apoya preferentemente hacia la parte media del techo (encima del muro que divide dos crujías paralelas) o en ocasiones se prolonga hacia arriba de la fachada principal. El volumen de los edificios adquiere un aspecto exterior más cúbico y geométrico, acentuado por la verticalidad del friso superior que delimitan las molduras. Finalmente, de acuerdo con las tendencias de cada región, se desarrollan variantes constructivas con mayor o menor frecuencia a ciertos elementos iconográficos y ornamentales, como los mascarones de Chac, las columnas o junquillos y las grecas simples o escalonadas. Pero es sin duda en la ornamentación de sus frisos (espacios comprendidos entre la moldura media y la cornisa), donde se distingue este estilo (Figura 11) (Gendrop, 1983).

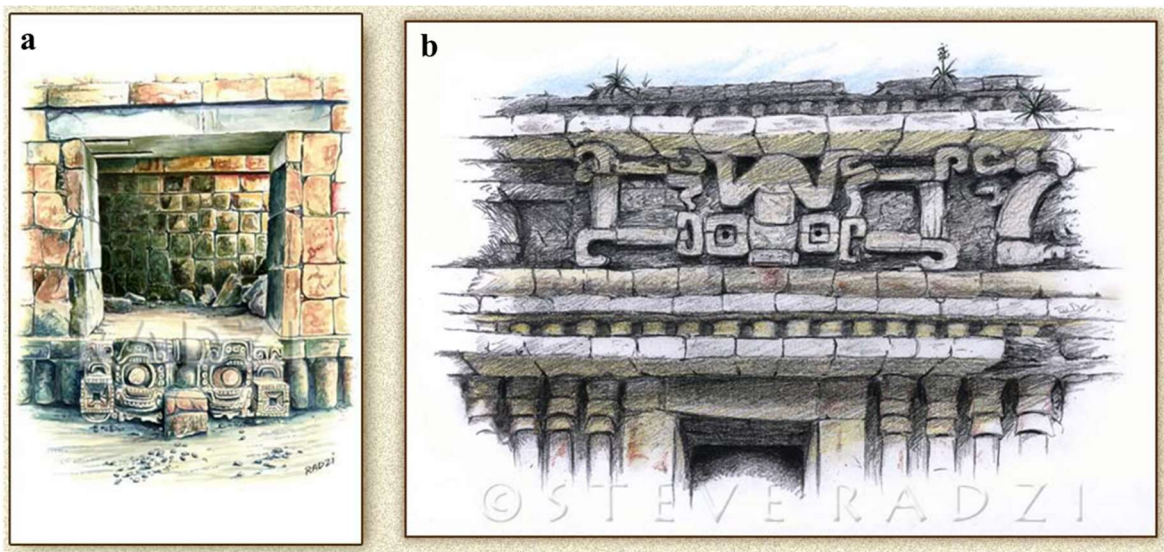


Figura 11. A) Mascarón escalón en la entrada a un cuarto del Codz Pop (E2C6) de Kabah y b) Friso del segundo nivel del Gran Palacio de Sayil (E2B1). Ilustraciones de ©STEVE RADZI.

El mayor empleo de junquillos lisos o con ataduras coincide con el periodo de máxima expansión en el estilo Puuc floreciente pasando el primer tercio del siglo VIII y se desarrolla con especial vigor en torno a Sayil, que se convierte en entonces una de las más grandes ciudades de la región. El junquillo contribuye notablemente a dar a la arquitectura Puuc floreciente sus cartas de nobleza (Gendrop, 1983).

En el segundo nivel de los tres pisos del palacio Sayil (E2B1), se observan junquillos lisos que se combinan en friso con mascarones, serpientes, grecas escalonadas u otros motivos geométricos.

La fachada del segundo nivel del Palacio de Sayil (E2B1), un edificio que en su parte suroeste refleja tres épocas bien diferenciadas en la secuencia evolutiva del estilo Puuc, desde Puuc temprano, observado en las puertas simples con anchas entradas porticadas hasta avanzada la época floreciente, notable en la alternancia de los frisos con la ornamentación escultórica y con los vanos de las puertas, además de hileras de esbeltos junquillos lisos que contribuyen poderosamente a hacer resaltar los demás elementos ornamentales (Gendrop, 1983).

Los primeros decenios del siglo IX parecen haber contemplado la aparición de varios de los elementos que habría de ser inseparables del máximo florecimiento del estilo Puuc. Los edificios se distinguen por sus mayores dimensiones, sus altas bóvedas, sus vanos grandes y anchos que en su época poseían dinteles de madera. Presentan una marcada tendencia horizontal subrayada por la clara partición de las fachadas en dos anchas y alargadas bandas principales, el friso superior y los paramentos de fachada, que delimitan diversas molduras: una cornisa o moldura superior compuesta de dos pronunciados biseles que semejanzas de las mencionadas ataduras parecen ser pensados por una delgada franja intermedia o listel; una moldura media que se compone esencialmente de faja y bisel, si bien puede constar de otros elementos más complejos, y un zócalo o rodapié cuyas bandas superiores e inferior

definen una entrecalle realzada mediante hileras continúa o discontinuas, de esbeltos tamborcillos, motivos geométricos tales como grecas escalonadas se celosía u otros y de manera excepcional mascarones. La silueta general del edificio destaca a todas luces cuadrangular, sobre todo cuando el friso y los paramentos de fachada se hayan virtualmente alineados en un mismo paño. Es bastante común sin embargo que toda la parte superior de la fachada, el friso delimitado por sus respectivas molduras acuse un voladizo más o menos acentuado con respecto a los paramentos de fachada, y conforme se avanza en la época floreciente es frecuente encontrar en estas fachadas un desplome intencional hacia afuera (Gendrop, 1983).

A través de una buena parte de la época Puuc floreciente uno de los motivos más característicos y persistentes es la decoración de tipo mosaico de los frisos, este elemento se combina a menudo con grandes grecas simples o escalonadas y hacia la fase tardía se ve sustituido frecuentemente por otros motivos tales como aquellos paneles de celosía o petatillo, o bien de bordado o encaje en piedra (Gendrop, 1983).

Se hace hincapié en el hecho de que la incidencia de mascarones arquitectónicos en la región Puuc se produjo esencialmente en torno a aquellos sitios que, en alguna fase de su desarrollo, habían erigido portadas zoomorfas. Desarrollándose inicialmente en el área Río Bec en sus variantes de perfil, este mascarón pronto es sustituido por versiones frontales o de ángulo que, salvo raras excepciones como en la gran pirámide de Uxmal seguirán asociados con portadas zoomorfas hasta finales de los años 830 d. C. aproximadamente, fecha a partir de la cual estos elementos desaparecen en las regiones Río Bec y Chenes. Es a partir de esta época cuando en la región Puuc, se da un espectacular desarrollo del mascarón arquitectónico, los cuales aparecen como un tema desligado del culto a Itzamná para convertirse en el tema religioso único, mismo que suele relacionarse tradicionalmente con Chac (Gendrop, 1983).

El edificio más famoso de esta índole es el Codz Pop (E2C6) de Kabah, destacando además por su emplazamiento encima de una enorme plataforma elevada y por los delicados calados geométricos de su alargada crestería. Este edificio aparece cubierto en su totalidad por esculturas en fuerte relieve de una calidad de ejecución que le han valido al edificio el apodo de Codz Pop o estera enrollada, con que se le conoce. La ornamentación de la moldura media, costa de un motivo que Gendrop (1983) designó indiferentemente bajo los nombres de zigzag, bordado o encaje en piedra, un elemento frecuente y que parece originarse en el simbolismo de la serpiente.

Después de alrededor de dos siglos de una fructífera y polifacética evolución, la arquitectura Puuc ha sabido materializar en torno a ciertos principios, desechando algunos elementos para incorporar otros (Gendrop, 1983).

3.2.1 Antecedentes de las exploraciones e intervenciones arqueológicas en los palacios mayas de la Región Puuc

La arquitectura maya de la Región Puuc ha sido documentada desde el siglo XIX, por exploradores, fotógrafos, arquitectos y arqueólogos, así como por instituciones y

organizaciones de México y del mundo entero, a continuación, se muestra una sucesión cronológica resumida de la documentación existente de los palacios.

1840-1842. Primeras exploraciones

Las primeras exploraciones a la región Puuc se llevaron a cabo en 1840 encabezadas por John Lloyd Stephens y Frederick Catherwood, quienes reconocieron a ésta como una variante de la antigua civilización maya, de acuerdo con sus estilos arquitectónicos en su publicación en 1843 de *Incidents of travel in Yucatan* (Figura 12) (Ringle et al., 2021).

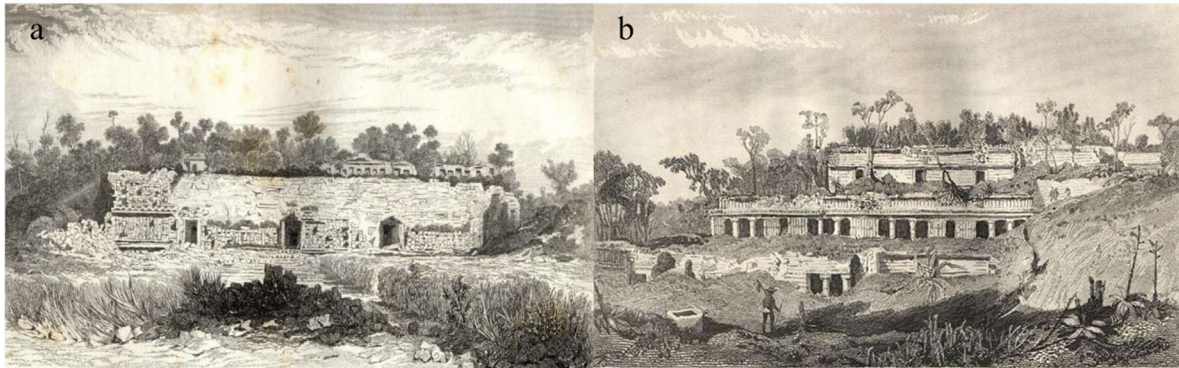


Figura 12. A) Litografía del Codz Pop de Frederick Catherwood, 1841. Tomada de Hernández Tangarife et al. (2022). B) Litografía de Catherwood del Gran Palacio de Sayil, Stephens (1993). Tomada de Toscano et al. (2007).

1882-1891. Registros fotográficos y excavaciones

En este periodo de tiempo, se realizaron los primeros registros fotográficos y planos de los asentamientos (Desiré Charnay en 1882); así como las primeras excavaciones, limpiezas y remociones de escombros en los palacios por Teoberto Maler en 1887. En 1888-1891, el Museo Peabody realizó una excursión dirigida por Edward Thompson (Figura 13).



Figura 13. A) Reconstrucción hipotética del Codz Pop y b) del Gran Palacio de Sayil realizadas por Tatiana Proskouriakoff. Tomada de las colecciones del Museo Peabody.

1914-1946. Expediciones de universidades y visitas de campo

Las acciones de investigación arqueológica se iniciaron con el siglo XX, pues se restauraron los edificios de manera aislada, pero sin tener un plan para ir recuperando paulatinamente las ciudades (Huchim Herrera & Toscano, 2018).

Entre 1914 y 1923, Juan Martínez Hernández y José Reygadas Vértiz realizaron informes sobre el estado general de los edificios y consolidaron algunos elementos; mientras que en el Gran Palacio de Sayil iniciaron los trabajos de reconstrucción-restauración. En 1924-1930, el Museo Peabody y la Universidad de Tulane, realizan visitas específicamente para la toma de fotografías. En 1934-1935, Edwin Shook levantó un plano del asentamiento de Sayil, así como un registro detallado de la arquitectura que aún se encontraba en pie; lo anterior fue publicado en 1980 por Harry Pollock en *The Puuc: An Architectural Survey of The Hill Country of Yucatan Northern Campeche*, quien realizó temporadas de campo donde hizo levantamientos de los planos de conjunto, grupos, estructuras y el levantamiento fotográfico. En 1944-1946, el arquitecto José Erosa Peniche, jefe de la Oficina de Monumentos Prehispánicos de Yucatán, informó sobre limpiezas en el Codz Pop (Figura 14 y 15).



Figura 14. Codz Pop durante la década de 1930, Pollock (1980).



Figura 15. Ala Oeste del Gran Palacio de Sayil en 1930, al inicio de la expedición de Frans Blom. Tomada de Toscano (2007).

1950-2006. INAH, trabajos de reconstrucción e investigación arqueológica

Para la década de 1950, comenzaron los primeros trabajos con metodologías encaminadas al recuperar información que permitiera conocer algo de los asentamientos prehispánicos (Figura 16 y 17) (Huchim Herrera & Toscano, 2018).

En este periodo de tiempo, iniciaron las campañas de excavación sistemática y reconstrucción-restauración por parte del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), dirigidos por Alberto Ruz Luehmann (1950), Raúl Pavón Abreu (1951), Ponciano Salazar Ortigón (1952-1953), César Sáenz (1953), Ramón Carrasco (1991-1993), José Huchim Herrera (1997) y actualmente a cargo de la arqueóloga Lourdes Toscano (2006-presente) (Hernández Tangarife, 2024).

Entre los trabajos realizados se encuentran labores de mantenimiento, limpiezas, excavación y reconstrucción de basamentos, escalinatas y cuartos, intervención en algunas fachadas, reconstrucción y consolidación de elementos y recintos, colocación de dinteles y clavos escultóricos de los ojos, impermeabilización parcial de techos, reintegración de sillares y la reubicación en su lugar original de los elementos, por mencionar algunos (Toscano, 2007).



Figura 16. Vista del Codz Pop en la zona arqueológica de Kabah, Yucatán. Pérez-Siliceo 1950-1990.



Figura 17. Ángulo sureste del Palacio en Sayil en 1960. Tomada de la Mediateca Nacional del INAH.

Dichos proyectos arqueológicos se enfocaron en la reconstrucción de los edificios y sus fachadas, sin embargo, es hasta el 2022 cuando se desarrolla un proyecto específico para la conservación de los mosaicos de piedra generado por el área de conservación-restauración, donde los restauradores del INAH establecen una metodología de estudio, diagnóstico e intervención directa de los mosaicos de roca labrada que recubren estas fachadas de manera específica.

2022-presente. Proyecto de conservación y restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc

Proyecto encabezado por la restauradora perito M.A. Natalia Hernández Tangarife, de la Sección de Conservación del Centro INAH Yucatán, se llevó a cabo por medio del Programa de Mejora de Zonas Arqueológicas (PROMEZA-INAH), debido al megaproyecto del Tren Maya, donde se realizó con un equipo interdisciplinario, un trabajo de diagnóstico específico para las fachadas, así como intervenciones y acciones de conservación directa de los mosaicos de piedra en Kabah y Sayil, encaminadas a la restauración y la investigación en materia de conservación, bajo la cual se desarrolla la presente tesis de investigación.

Estas acciones buscaron la conservación preventiva y a largo plazo de los mosaicos de piedra, por lo cual incluyó no solo procesos de conservación en la piedra constitutiva, sino consolidaciones arquitectónicas que buscaban reintegrar elementos arquitectónicos que cumplen la función de protección de la intemperie. Los procesos incluyeron limpieza de biopátinas, consolidación de módulos de los mosaicos con problemas de disgregación y pulverulencia, reintegración de elementos arquitectónicos desprendidos que fungen de protección para el agua pluvial, como el caso de las cornisas, unión de fragmentos de elementos fracturados, eliminación de intervenciones anteriores donde usaron materiales no compatibles como el cemento, el rejunteo de las juntas de los mosaicos con morteros de cal, resanes y recubrimientos de sacrificio, como parte de acciones para conservar y proteger de

la intemperie a los mosaicos de piedra labrada de los deterioros más avanzados de erosión y pérdida de material (Figura 18 y 19) (Hernández Tangarife et al., 2022).



Figura 18. Fachada Oeste del Codz Pop. Fotogrametría realizada por Arqlgo. Benjamín Esqueda. Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023).



Figura 19. Ala Oeste, fachada Sur del Gran Palacio de Sayil. Fotogrametría realizada por Arqlgo. Benjamín Esqueda. Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023).

Este trabajo de investigación pretende determinar la estrecha relación entre las características texturales de las rocas carbonatadas, su relación con el deterioro y los factores ambientales a las que están expuestas; ya que se observó el avanzado deterioro, especialmente en forma de pérdidas de hasta el 50% en la matriz pétreo, en algunos módulos labrados, tales como columnas, dinteles y junquillos en la fachada del Gran Palacio de Sayil (E2B1), piezas claves para la arquitectura por su función de soporte; así como en piezas de los mascarones del Codz Pop (E2C6) de Kabah, como orejeras, pómulos y mandíbulas.

3.2.2 El Codz Pop de Kabah

Kabah es una zona arqueológica que conserva su nombre prehispánico, que significa señor de la mano fuerte o poderosa. Comúnmente se asume que los sitios de la Región Puuc ocupan una temporalidad de 600 a 900 d. C., pero es innegable que sitios como Kabah se remontan por lo menos al Clásico Temprano. Kabah alcanza su máximo esplendor entre el 750 d.C. y 900 d.C., donde la ciudad se extiende hasta alcanzar un radio aproximado de 2 km (Huchim Herrera & Toscano, 2018).

Los edificios del grupo Este, dentro de los cuales se encuentra el Codz Pop (E2C6), eran un conjunto palaciego que además de ser la residencia del linaje gobernante, funcionaban como el centro de la actividad cívica y religiosa (Figura 20) (Huchim Herrera & Toscano, 2018).

Los edificios de Kabah están elaborados con mosaicos de piedra, entre los que destacan los mascarones, las celosías y, en los últimos períodos, esculturas antropomorfas (Huchim Herrera & Toscano, 2018).

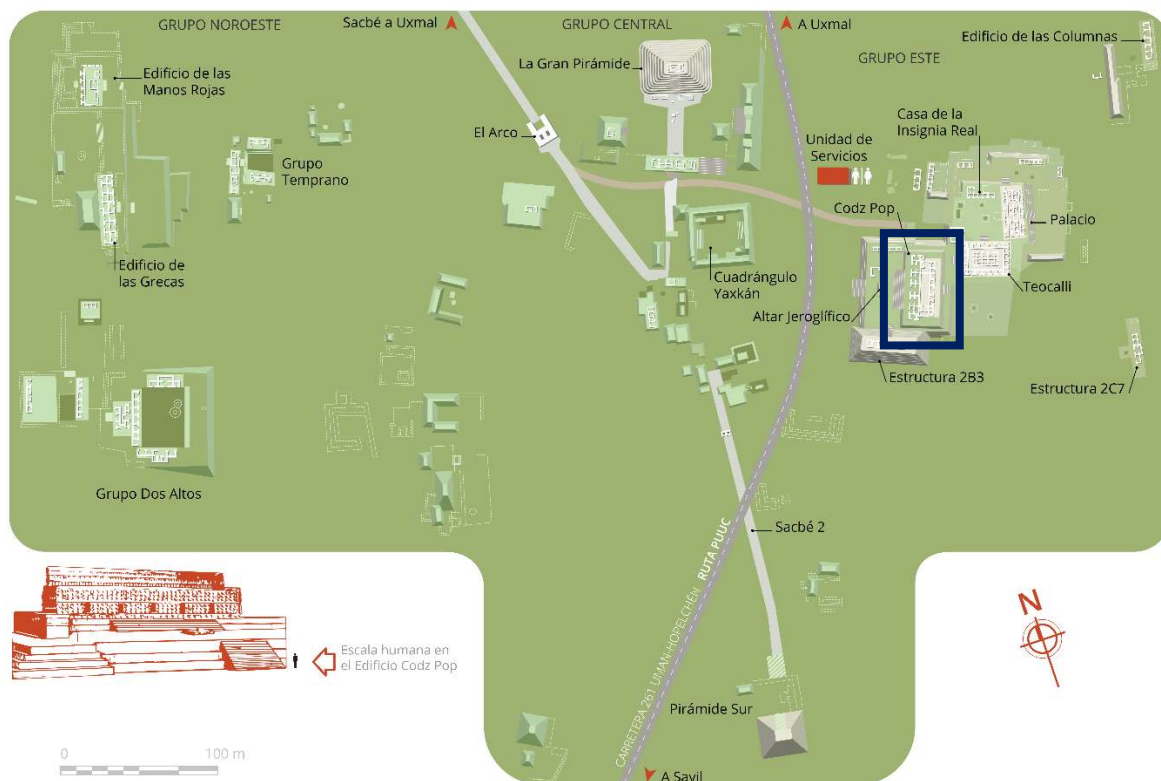


Figura 20. Croquis de Kabah. En el rectángulo azul se observa la ubicación del Codz Pop. Tomado de la Mediateca del INAH.

El Codz Pop, Palacio de los Mascarones o estructura E2C6, significa alfombra enrollada en maya (Foncerrada de Molina, 1961), se considera que el Codz Pop pertenece a la tradición constructiva del Puuc, la cual tuvo su desarrollo particular durante el Clásico Tardío (650-950 d.C.), y sin duda alguna se trata de uno de los ejemplos arquitectónicos de la civilización maya más complejos. Este palacio está compuesto de múltiples mascarones modulares formados por mosaicos de piedra, compartiendo espacio y siendo parte al mismo tiempo del sistema estructural general del edificio (Hernández Tangarife, 2024).

La fachada oeste del Codz Pop tiene 53.7 metros de largo, con muros de 3.54 metros de alto y un muro con el único friso con una altura total de 7.26 metros (Figura 21). Este palacio exhibe un mosaico de excepcional relevancia dentro de su estilo arquitectónico, ya que está conformado por más de 5000 piezas de piedra talladas individualmente para representar mascarones del dios de la montaña sagrada: Witz (Hernández Tangarife, 2024).

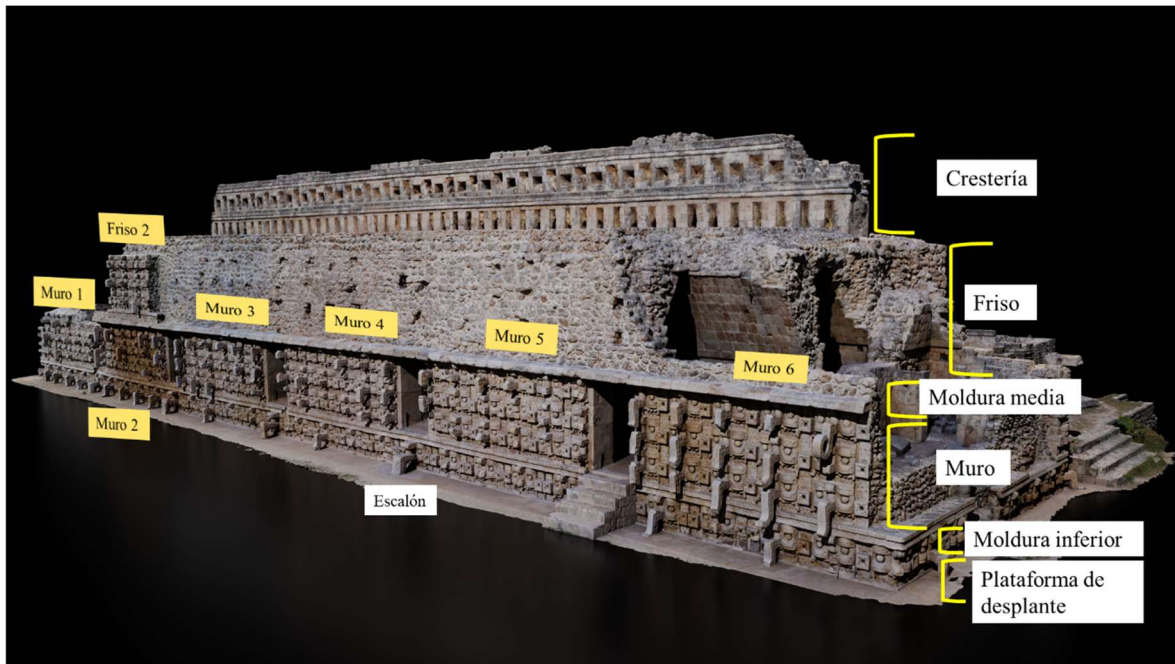


Figura 21. Elementos arquitectónicos de la Fachada Oeste del Codz Pop. Registro fotogramétrico por Arqlgo. Benjamín Esqueda. Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023). Tomado y modificado de *Colín Gámez & Hernández Tangarife (2024)*.

La fachada oeste exhibe 125 mascarones completos distribuidos en los muros y un friso (Muro 1-6 y Friso 2), mientras que la fachada norte exhibe 26 mascarones, y la sur 10 estimando un total de cerca de 5,400 piezas cuidadosamente labradas incluyendo las que componen las molduras inferior, media y superior. Además de tener mascarones, debajo de los mismos hay una greca de serpientes entrelazadas y sobre los mascarones hay una decoración geométrica a base de triángulos (Hernández Tangarife, 2024).

En el proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023) para efectos del registro y el diagnóstico de conservación de los mosaicos de piedra, se generó una retícula en el alzado de la fachada con el fin de identificar alfanuméricamente a los mascarones de manera individual, como a los muros donde se insertan estos mascarones de mosaico. De ello resulta que los mosaicos de la fachada Oeste del Codz Pop, se identifiquen en seis muros y un friso que en esta investigación fungieron como referencia para la identificación del mapeo litológico y la obtención de muestras (Figura 22) (Hernández Tangarife, 2024).

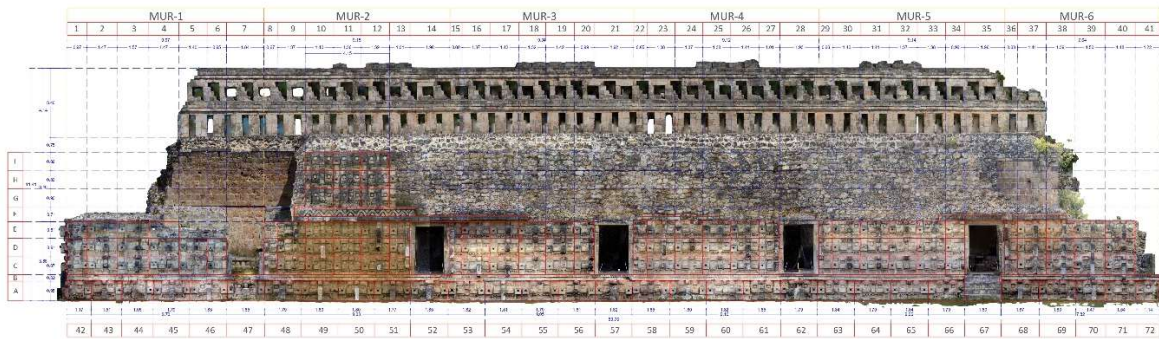


Figura 22. Retícula alfanumérica de la fachada Oeste Fachada Oeste de la Estructura 2C6. Retícula en la imagen de ortomosaico, realizado por Arqlgo. Benjamín Esqueda. Cuadrícula realizada por los arquitectos Vidaura Cardos Ramírez y Jesús Muñoz Cinta. Proyecto Conservación Ruta Puuc 2022-2023.

Existen cuatro variantes de mascarones en toda la fachada: 1) mascarón completo, se encuentra a lo largo de la plataforma de arranque compuesto por 34 piezas, 2) medio mascarón que comparten la orejera con el mascarón contiguo y las columnas junto a las jambas y está compuesto por 18 piezas, 3) mascarón escalón, el cual tiene la nariz-labio más ancho y liso y funciona como peldaño para acceder a los cuartos y 4) medio mascarón, que pertenece a la mitad de un rostro; juntos armar cerca de 160 mascarones en los muros, frisos y cuartos interiores del palacio (Colín Gámez & Hernández Tangarife, 2024; Hernández Tangarife, 2024).

La identificación iconográfica de los mascarones ha estado relacionada, de acuerdo con diferentes interpretaciones, con Itzamnaaj “dios celeste”, Chaak “dios de la lluvia” y más recientemente con Witz “el monte sagrado” (Hernández Tangarife, 2024).

Severiano (2022 en Hernández-Tangarife *et al.*, 2024) mencionó que, así como muchas de las deidades dentro del panteón maya, el Witz, monstruo de la Tierra, cerro o montaña, también parte de la representación de una serpiente, pues posee todos los elementos que representan a la serpiente maya (Figura 23). Lo distintivo en esta deidad son los atributos iconográficos que posee, siempre con marcas de “Tierra”, los cuales se encuentran en los glifos de:

Kab’ - Tierra

Tun - Piedra

Witz – Cerro/ montaña



Figura 23. A) Mascarón escalón de Witz, fachada norte, Codz Pop, foto por Gabriel Severiano y b) modelo ejecutado por Arqlgo. Benjamín Esqueda. Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023).

Los mosaicos de piedra labrada que recubren toda la fachada están compuestos por módulos individuales por lo cual el comportamiento frente a las condiciones intemperismo de cada pieza es particular e independiente del conjunto. Lo que complejiza la caracterización de la roca como una en particular y las propuestas de tratamiento para su conservación (Figura 24, Tabla 5).

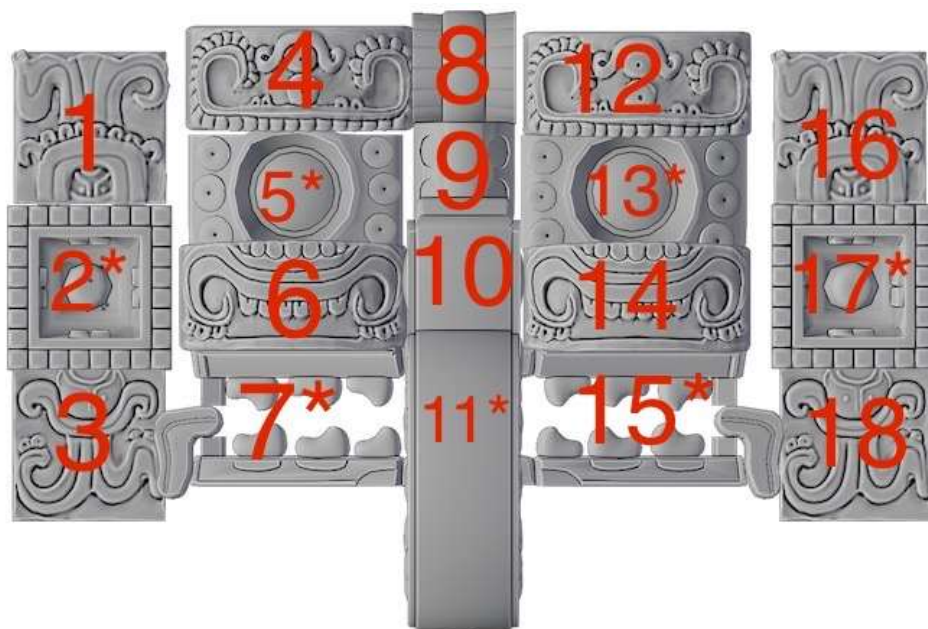


Figura 24. Secciones compositivas de los mosaicos de piedra del medio mascarón del dios Witz. Realizado por Gabriel Severiano y modelo digital realizado por Arqlgo. Benjamín Esqueda. Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023).

Tabla 5. Módulos que componen al medio mascarón de Witz. El medio mascarón se compone de 18 módulos en su totalidad. Los números marcados por un asterisco (*) están a su vez compuestos por más piezas.

Módulos	
1. Oreja	10. Apéndice bucal y Nariz (no son sinónimos)
2. Orejera	11. Incisivos
3. Pendiente	12. Cubrecejo / Ceja / Párpado superior
4. Cubrecejo / Ceja / Párpado superior	13. Cuenca ocular
5. Cuenca ocular	14. Pómulo / Párpado inferior
6. Pómulo / Párpado inferior	15. Fauce
7. Fauce	16. Oreja
8. Entrecejo / Seno - seño frontal	17. Orejera
9. Tabique nasal	18. Pendiente

3.2.3 El Gran Palacio de Sayil

La Zona arqueológica de Sayil es una de las ciudades más importantes de la Región Puuc que significa "lugar de las hormigas arrieras", fue construida en un valle angosto rodeado de lomeríos con tierras aptas para la agricultura. Pertenece al Clásico Tardío (800 a 1000 d. C.). Su extensión de 5 km², concentración y elaboración arquitectónica, similar al de Uxmal y Kabah, refleja que tuvo un alto índice de población de más de 10,000 habitantes y que el grado de organización social y los niveles de especialización artesanal fueron elevados (Huchim Herrera & Toscano, 2018).

La ciudad está formada por grupos importantes de estructuras de mampostería unidos por caminos de piedra, siguiendo un eje norte-sur de casi un kilómetro y medio; si bien, los arquitectos de Sayil tuvieron grandes logros en el diseño, las técnicas y materiales de construcción son de menor calidad que los de sitios vecinos como Kabah. Asimismo, se erigieron estelas representando a importantes señores, probablemente los dirigentes del sitio (Huchim Herrera & Toscano, 2018).

De acuerdo con Sabloff y Tourtellot (1991), Sayil se puede dividir en dos zonas concéntricas: a) la zona nuclear ubicada al norte, de 1.2 km a la largo de la calzada y donde se ubican las grandes construcciones como el Gran Palacio, El Mirador, El Palacio Sur y el juego de pelota, se considera que era un área residencial de élite; mientras que en el sur, b) la zona circundante se encuentran afloramientos de calizas, los chultunes y pilas, así como las estructuras donde se almacenaban los materiales perecederos, se cree que era un área cívico-ceremonial (Figura 25).

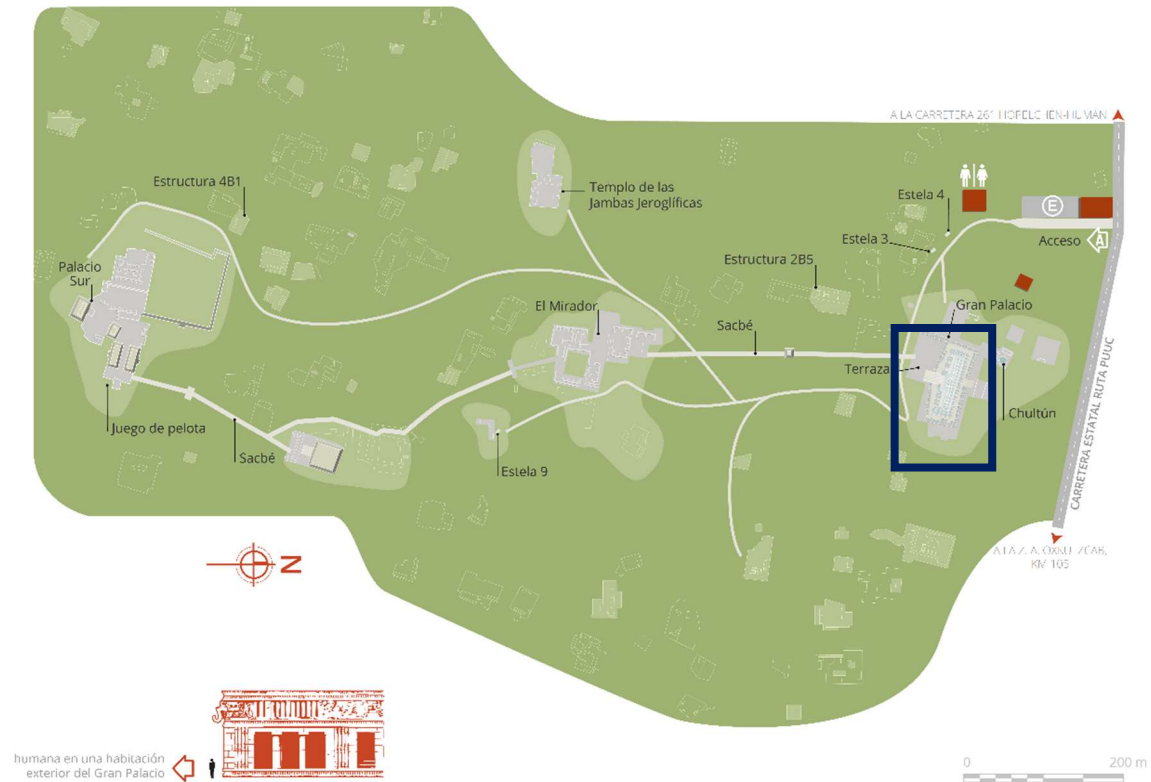


Figura 25. Croquis de Sayil. En el rectángulo azul se observa la ubicación del Gran Palacio de Sayil. Tomada de la Mediateca del INAH.

El Gran Palacio de Sayil, Palacio Norte o estructura E2B1, es el edificio más conocido de Sayil, tanto por sus dimensiones como por su decoración. Consta de tres niveles que albergan más de 90 aposentos, posee un largo de 85 metros y una altura de 40 metros de altura, además una larga escalinata localizada en el centro del palacio comunica los tres niveles. Fue construido a lo largo de varios periodos, y fue el centro de la actividad política, administrativa y religiosa, sin embargo, la aparición de una cocina en la esquina noroeste señala que también servía como morada a los gobernantes, lo mismo sucede en otras muchas edificaciones Puuc Clásicas que combinan la función residencial con la religiosa (Huchim Herrera & Toscano, 2018; Vidal & Cosme, 1997; INFOGRAFIA INAH).

El nivel 2 del Gran Palacio de Sayil mide 30.5 metros de largo. Esta planta está compuesta por columnas monolíticas, dinteles y jambas dispuestas en pares que sostienen un friso con divinidades (Figura 26).



Figura 26. Nivel 2 del Gran Palacio de Sayil. Tomado de Reed (2001).

En el segundo nivel, los elementos formales de la fachada conservan rasgos del estilo Puuc Temprano (670-770 d. C.) (Andrews 1986), pues se compone de columnas que son el elemento estelar de todo el edificio, ya que no solo están presentes en los pórticos, sino que se encuentran a lo largo de todo el palacio en forma de junquillos. Gracias a todos estos factores los constructores de Sayil lograron crear armonía entre las diferentes etapas constructivas (Figura 27) (Pollock, 1980).

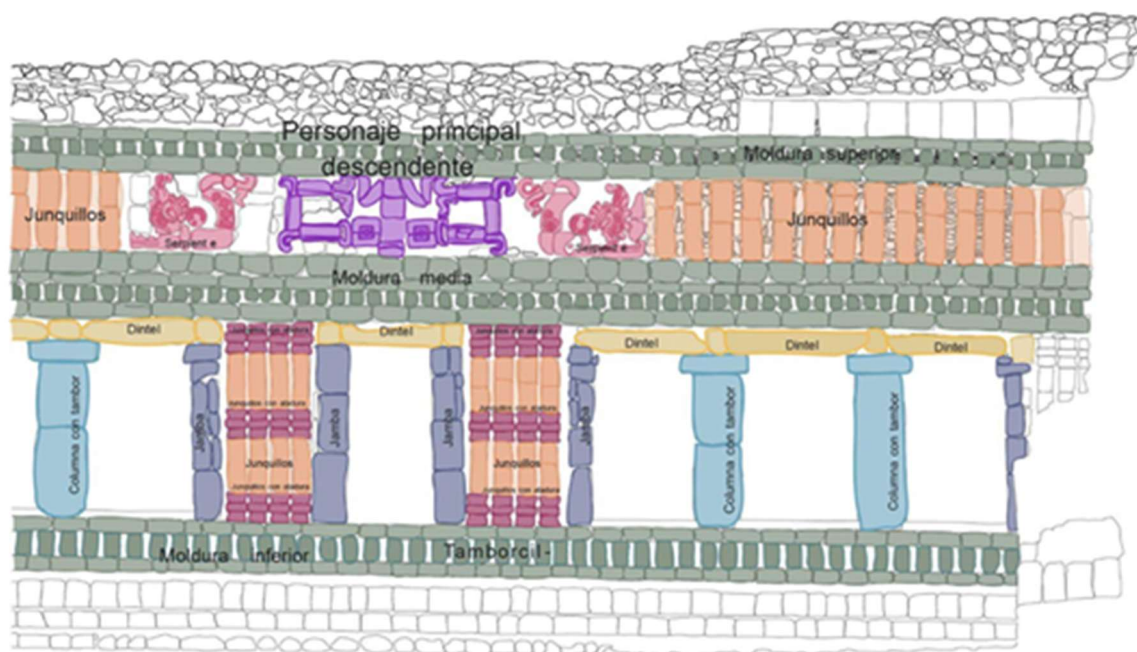


Figura 27. Elementos principales que conforman el segundo nivel del Gran Palacio de Sayil. Dibujo realizado por Luz Fabiola González (Proyecto Conservación Ruta Puuc, 2022-2023).

La ornamentación en el segundo nivel del Gran Palacio de Sayil está formada por tamborcillos, dinteles, jambas, un friso de columnillas alternando con elementos de una serpiente y un mascarón central (Pollock, 1980).

Es posible que el uso de columnas obedezca a la fuerte inclinación que tenían los arquitectos de Sayil por dar a sus edificios un equilibrio formal, y en este caso utilizaron, en el segundo nivel, la simetría reflejante para integrar las partes ya existentes y dar coherencia arquitectónica al conjunto (Toscano et al., 2007).

La piedra presenta diferentes calidades en el tallado, siendo las del friso las de mejor corte. Sin embargo, no se comparan con la maestría de los canteros de las ciudades vecinas de Labná, Kabah y Uxmal, debido a que la calidad de la roca de la región no es muy buena, ya que fácilmente se degrada (Pollock, 1980).

4. Técnicas y análisis realizados a las rocas que constituyen los mosaicos de la arquitectura Puuc

A continuación, se presentan los detalles metodológicos empleados en el desarrollo del trabajo, el cual tiene como objetivo principal determinar la relación existente entre la litología y el tipo de deterioro que presentan las rocas que conforman las fachadas oeste y sur del Codz Pop (E2C6) en Kabah y del Gran Palacio de Sayil (E2B1), respectivamente.

Para demostrar que el deterioro que presentan las fachadas de los palacios está sujeto a los cambios en las características petrofísicas y sedimentológicas (texturales) de las rocas carbonatadas; se tomaron muestras de rocas procedentes del contexto inmediato de los palacios, es decir, frente a sus fachadas. Así mismo, se compararán las muestras con los deterioros observables en los mosaicos. Por ello, se diseñó una metodología con enfoque mixto, ya que se realizaron análisis cualitativos, en donde se describieron las características texturales en muestra de mano y en láminas delgadas por medio de petrografía; y análisis cuantitativos, empleando técnicas analíticas como difracción de rayos X, espectrometría de emisión óptica con plasma de acoplamiento inductivo y fluorescencia de rayos X, para conocer la composición mineralógica y química; mientras que para saber las propiedades petrofísicas se realizaron mediciones de porosidad-densidad, pruebas de absorción por capilaridad, expansión hídrica y térmica, resistencia a la compresión uniaxial y a la cristalización de sales.

Lo anterior se llevó a cabo en tres etapas principales, las cuales abarcaron desde revisión de literatura, visitas y reconocimientos geológicos en campo, así como, colecta de muestras y la realización de las técnicas analíticas en laboratorio.

4.1 Trabajos de gabinete

El trabajo de gabinete consistió en realizar una búsqueda de información sobre las características geológicas de la región, la arquitectura Puuc, antecedentes de restauración-conservación e históricos de los palacios de Kabah (E2C6) y Sayil (E2B1), así como familiarizarse con la terminología usada y las técnicas que se emplean en la restauración de bienes patrimoniales. Dicha información se recolectó desde plataformas virtuales como CREATIVA (Centro de Recursos Académicos Informáticos Virtuales de la UASLP) de la cual se obtuvieron boletines, artículos y tesis; así como en repositorios del INAH.

4.2 Trabajos de campo

Los trabajos de campo iniciaron con un reconocimiento geológico general de las fachadas oeste y sur del Codz Pop (E2C6) y del Gran Palacio de Sayil (E2B1), respectivamente; así como de los afloramientos cercanos a dichas áreas, para identificar las características que presentaban las rocas, y bajo un trabajo interdisciplinario con los restauradores del proyecto, donde ellos establecieron el grado de deterioro de éstas y desde la visión de la geología, determinar el grado de deterioro de éstas y en qué zonas de las fachadas se encontraba el mayor y menor daño. Lo anterior, para establecer una relación visual entre la litología y el deterioro; y así determinar la simbología para el mapeo litológico y establecerse el tamaño del muestreo.

Se realizaron tres salidas de campo a las zonas de estudio, comprendidas en una semana por salida siendo éstas en los meses de diciembre de 2022, febrero y junio de 2023.

4.2.1 Mapeo litológico

Se estableció realizar un análisis litológico de cada una de las rocas que conforman los mosaicos de las fachadas, con el propósito de crear registros que, al momento de conjuntarse con el mapeo de deterioros realizados por los restauradores (Hernández Tangarife, 2024 en “La restauración de los mosaicos de piedra de la estructura 2C6 o Codz Pop de la Zona Arqueológica de Kabah, Yucatán”), se lograra establecer qué tipo de textura está asociada a diversos deterioros; y con ello, sostener la hipótesis de que el deterioro está condicionado por la textura que presentan las rocas carbonatadas.

Como primera instancia, se realizó un análisis visual de cada una de las rocas que componen los mosaicos que recubren el friso 2 y los muros 1-6 de la fachada oeste del Codz Pop en Kabah (E2C6) y los frisos 1-4 de la fachada sur del Gran Palacio de Sayil (E2B1); donde se identificaron el tamaño de grano y de los clastos, los porcentajes de matriz, color, minerales presentes, estructuras internas y si existía la presencia de componentes observables a simple vista. Lo anterior, con la finalidad de crear una simbología de acuerdo con las clasificaciones composicionales y texturales de Dunham (1962), Folk, (1962) y Embry y Klovan (1972). Se lograron reconocer dos litologías: calizas y brechas calcáreas, las cuales se clasificaron en tres texturas: wackestone, floatstone, y rudstone.

Con los registros fotogramétricos proporcionados por los arquitectos del Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023), y las texturas identificadas se prosiguió a realizar el mapeo litológico en formato físico (fotogrametría impresa) y digital (AutoCAD versión 24.2).

Asimismo, fueron proporcionados los mapeos de deterioros realizados por los restauradores en “La restauración de los mosaicos de piedra de la estructura 2C6 o Codz Pop de la Zona Arqueológica de Kabah, Yucatán” (Hernández Tangarife, 2024), para crear una correlación de las texturas que presentan las rocas junto con el tipo de deterioro observado.

4.2.2 Columna litológica

Se realizó una columna litológica de un afloramiento cercano a la iglesia del poblado de Santa Elena (Figura 28), aproximadamente a 9 kilómetros al norte de Kabah; la cual se elaboró con ayuda de un flexómetro para medir el espesor de las capas; además, se describieron 18 capas, especificando su color de acuerdo con la escala de Munsell (1915), la presencia de estructuras sedimentarias, el tamaño de los granos y se utilizaron las clasificaciones de Dunham (1962) y Embry y Klovan (1972) para determinar la textura de las calizas.



Figura 28. Afloramiento de donde se realizó la columna litológica, ubicado en el poblado de Santa Elena.

4.2.3 Toma de muestras

La toma de muestras se efectuó durante el Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023) llevado a cabo por el INAH Yucatán bajo la dirección de la M.A. Natalia Hernández Tangarife, con quien se seleccionaron y recolectaron las muestras de los afloramientos de Kabah, y piezas pertenecientes a los núcleos de los muros que se localizaban frente a cada sección de muro y fachada de los palacios.

El muestreo se realizó con el fin de obtener ejemplares con el tipo de textura observada en los mapeos litológicos (wackestone, floatstone y rudstone); para la petrografía y los análisis petrofísicos y geoquímicos, los cuales nos permitieron someterlas a diversas pruebas que nos brindaron información de la calidad de la roca como material de construcción y cómo es su respuesta a diversas condiciones; así como para obtener las concentraciones de los elementos mayores y traza que contienen. La cantidad de éstas estuvo condicionada por la predominancia de cada de textura en las fachadas, sin embargo, existieron ciertas limitaciones, ya que no es posible la extracción directa de una roca labrada que compone la fachada por su importancia cultural, arquitectónica y su calidad de patrimonio cultural de la nación. No obstante, gracias a los trabajos de restauración de los mosaicos de piedra que se estaban realizando bajo el Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023), se permitió obtener una pieza de una espiga del mosaico de Kabah (M21), y rocas pertenecientes a los núcleos de los muros, que comparten las características de las piezas labradas que decoran las fachadas, con las dimensiones necesarias para los análisis petrofísicos (Tabla 6, Anexo 2).

Se recolectaron 41 muestras en total, dentro de la cuales 14 pertenecen a Kabah, 20 a Sayil y 7 del afloramiento donde se realizó la columna litológica Santa Elena. Dentro de las 41 muestras en total, se registraron 15 muestras de caliza y 26 de brecha calcárea; así como dos muestras en polvo, una del suelo (kancab) de Kabah y otra más del sascab (Tabla 6).

Las muestras se etiquetaron y empaquetaron, con claves singulares donde se especifica el inmueble, fachada y el número de muro. Las claves fueron asignadas por el Proyecto Conservación Ruta Puuc (2022-2023).

Tabla 6. Relación de las muestras colectadas y su respectivo análisis realizado.

	Clave	Tipo de roca	Láminas delgadas	Análisis petrofísicos					Análisis geoquímicos		
				Densidad-porosidad	Expansión hídrica/ térmica	Absorción capilar	Salas	Compresión uniaxial	ICP-OES	FRX	DRX
Kabab	M20	Caliza cristalina	X	X					X		
	M21	Brecha (rudstone)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	M22	Brecha (floatstone)	X	X					X		X
	M23	Brecha (packstone)	X	X							
	M24	Brecha (floatstone)							X		X
	M25	Caliza (wackestone)	X	X							
	M26	Caliza (mudstone)							X		
	M27	Brecha (floatstone)		X							
	M28	Brecha (floatstone)		X							
	M29	Caliza (mudstone)	X	X							
	M30	Caliza (mudstone)		X					X		
	M31	Brecha (floatstone)		X							
	M32	Brecha (rudstone)	X	X							
	M40	Brecha (floatstone)	X	X					X	X	
Sayil	M42	Brecha (floatstone)		X							
	M43	Caliza (mudstone)		X		X					
	M44	Brecha (rudstone)	X	X	X				X		X
	M45	Caliza (mudstone)		X					X		
	M46	Brecha (floatstone)		X							
	M47	Brecha (floatstone)							X		X
	M48	Caliza (mudstone)							X		
	M50	Brecha (floatstone)	X	X		X		X			
	M51	Caliza (mudstone)	X	X		X					
	M52	Caliza (wackestone)	X	X		X	X		X		X
	M53	Brecha (floatstone)	X	X		X	X		X	X	
	M54	Caliza (mudstone)		X		X		X			
	M55	Caliza (mudstone)		X		X	X				
	M59	Brecha (floatstone)							X		
	M60	Brecha (floatstone)	X								
	M61	Brecha (floatstone)							X		X
	M62	Caliza (packstone)	X								
	M66	Caliza (mudstone)	X						X		
	M67	Brecha (floatstone)							X		
	M68	Brecha (floatstone)							X		
Santa Elena	M69	Caliza (mudstone)			X						
	M70	Brecha (floatstone)							X		X
	M71	Brecha (floatstone)	X								
	M72	Brecha (floatstone)			X						
	M73	Brecha (floatstone)	X								
	M74	Brecha (floatstone)		X							
	M75	Brecha (floatstone)		X					X	X	
	M19	Suelo (kancab)							X	X	X
	M41	Sascab							X		X

4.3 Trabajo de laboratorio

4.3.1 Elaboración y análisis de láminas delgadas

Las láminas delgadas son de vital importancia para el presente trabajo, ya que, por medio de ellas se identificaron las texturas y ambientes de depósito de las rocas carbonatadas, así como sus componentes y estructuras; las cuales nos permitieron determinar la relación textural con el deterioro y establecer cuáles son las que presentan mayor o menor deterioro.

La elaboración de las láminas delgadas se llevó a cabo en el Laboratorio de Laminación del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (LL-IG-UASLP).

Se utilizaron 18 muestras en total: siete calizas y once brechas calcáreas, las cuales se cortaron y pulieron en discos con equipos marca Hillquist, después se pegaron en un portaobjeto con una mezcla de catalizador y resina (Hillquist), en proporción 1:3 respectivamente. Ya pegadas, se pulieron nuevamente con abrasivos sobre vidrio hasta que se obtuvo el espesor deseado, para observar los componentes en microscopios petrográficos.

El análisis petrográfico se realizó en el Laboratorio de Microscopía del IG-UASLP, en un microscopio petrográfico marca Leica DMLP. Se utilizó una cámara marca OMAX A3550U3 para las fotografías y el software OMAX Toup View Versión 4.11 2023 para la edición de estas. Para la descripción de las láminas delgadas se consideraron las clasificaciones texturales y composicionales de Dunham (1962), Folk (1962) y Embry y Klovan (1972); mientras que para determinar el ambiente de depósito y microfacies se utilizaron los trabajos de Flügel (2004) y Wilson (1975).

4.3.2 Análisis petrofísicos

Los análisis petrofísicos aportan información muy importante para conocer las causas del deterioro que presentan los materiales de construcción, ya que nos ayudan a definir su calidad y durabilidad ante los ambientes a los que están expuestos. Con diversas pruebas se lograron determinar las propiedades físicas que contribuyen a explicar su comportamiento respecto a los agentes de alteración.

Los análisis petrofísicos se realizaron con base en las Normas DIN (Deutsches Institut für Normung, Instituto Alemán de Normalización), los cuales se ejecutaron en el Laboratorio de Petrofísica del IG-UASLP.

- Porosidad-Densidad

La densidad (ρ) de un material puede dividirse en densidad de la matriz (ρ_{Matriz}) y densidad aparente (ρ_{Bulk}). Mientras que el valor de la densidad aparente se establece con respecto a la porosidad de un material, la densidad de la matriz sólo depende de los componentes y no tiene en cuenta la porosidad. Por lo tanto, la densidad de la matriz proporciona datos sobre la composición de un material.

Por medio del método de Arquímedes es posible determinar estas densidades, los parámetros para determinar la densidad son:

- i) el peso de la muestra en condiciones secas (peso seco)

- ii) el peso en condiciones totalmente saturadas (peso húmedo)
- iii) el peso de la muestra con la muestra totalmente sumergida en agua (peso sumergido)

Así, la densidad de la matriz se determina con la siguiente ecuación:

$$(\rho_{\text{Matriz}}) = \rho_{\text{Agua}} (\text{peso seco} / \text{peso seco} * \text{peso sumergido})$$

Mientras que la densidad aparente se determina:

$$(\rho_{\text{Bulk}}) = \rho_{\text{Agua}} (\text{peso seco} / \text{peso húmedo} / \text{peso sumergido})$$

La porosidad de una roca se define como la relación entre el volumen de poros (cavidades, grietas) y el volumen de toda la roca (Siegesmund & Snethlage, 2011). Puede calcularse aplicando las mismas variables utilizadas para la determinación de la densidad aparente y de la matriz:

$$\text{Porosidad} = (\text{peso húmedo} - \text{peso seco}) / (\text{peso húmedo} - \text{peso sumergido}) * 100$$

Se utilizó la clasificación establecida por von Moos & de Quervain (1948) para determinar el grado de porosidad de las rocas (Tabla 7).

Tabla 7. Clasificación de von Moos & de Quervain (1948) para determinar la porosidad de una roca.

Clasificación de Moos y Quervain (1948)	
<1%	porosidad compacta
1-2.5%	poco porosa
2.5-5%	ligeramente porosa
5-10%	significativamente porosa
10-20%	muy porosa
>20%	gran espacio poroso

El análisis se realizó de acuerdo con la norma DIN 772-4 (DIN, 1998). Las muestras se colocaron en un horno (Boekel modelo 107905) a 60 °C por 24 horas. Luego, se pesaron en una balanza Kern PCB 2500-2 y se obtuvo el valor del peso seco de estas. Después, se colocaron en un desecador KIMAX de vidrio refractario, donde se creó un vacío por aproximadamente 3 horas. Seguido a esto, se llenó el desecador con agua destilada hasta que cubrió por completo las muestras y se dejó que se saturaran por 24 horas (Figura 29).

Pasado el tiempo, se sacaron las muestras del desecador y se pesaron, lo que dio como resultado el peso húmedo. Finalmente, en un recipiente con agua destilada se sumergieron las muestras y se obtuvo el peso sumergido.

Con este experimento se calculó la porosidad (en %), la densidad de matriz, la densidad aparente o bulk density (en g/cm³) y la absorción de agua al vacío (en porcentaje de peso).

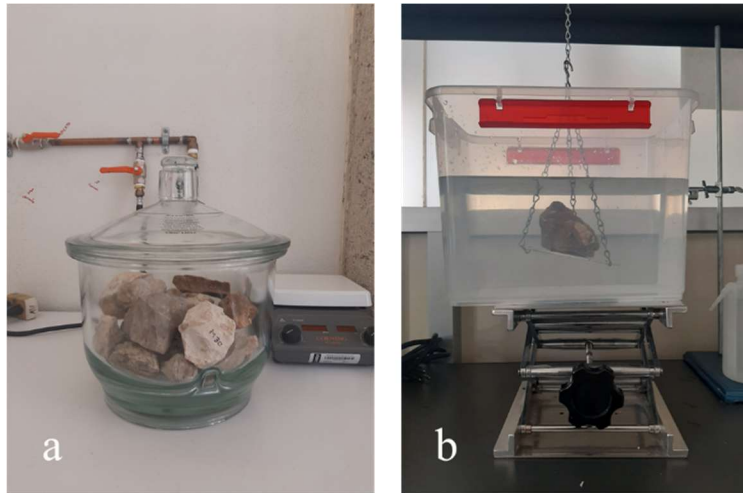


Figura 29. Prueba de porosidad-densidad, a) muestras en el desecador para crear vacío y b) método para obtener el peso sumergido de las muestras.

-Absorción capilar experimental

La absorción capilar de agua de los materiales porosos puede describirse mediante el coeficiente de absorción de agua (valor w). La relación de la absorción capilar de agua frente al tiempo se determina registrando periódicamente el cambio de peso. El valor w se determina mediante:

$$w = m_w / t$$

donde m_w es la absorción de agua superficial (en kg/m²) y t es el tiempo de absorción (en minutos).

Se utilizaron cubos de 6.5 cm por lado previamente secados en el horno por 24 horas, de lo anterior se obtuvo el peso seco y consecuentemente, con ayuda de abrazaderas se colocó la muestra cuidadosamente sobre agua destilada sin tocar el fondo. Se anotó el peso que el cubo fue adquiriendo cada 30 segundos durante 1 hora (DIN 15148 (DIN EN ISO, 2002) (Figura 30).

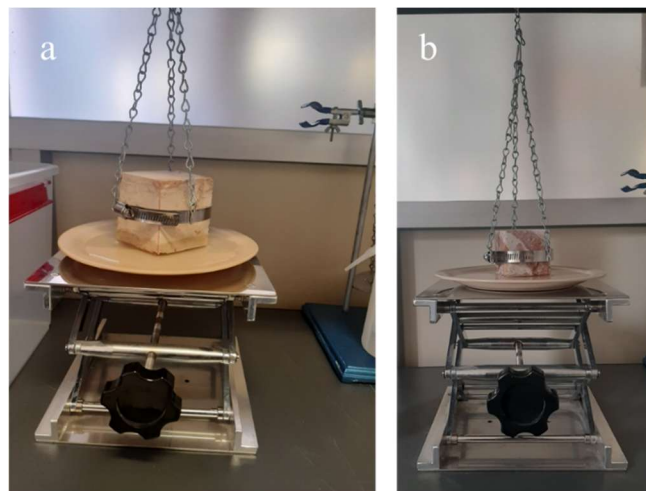


Figura 30. Prueba de absorción por capilaridad en laboratorio, a) brecha de Kabah y b) brecha de Sayil.

- Expansión hídrica y térmica

Para estas pruebas se utilizaron muestras de 10 cm de largo por 1.5 cm de ancho.

La expansión hídrica se llevó a cabo por medio del procedimiento de (Wedekind et al., 2013). Inicialmente, se midieron las caras de las muestras por el eje largo con ayuda de un vernier y se obtuvo un promedio. Posteriormente, se dejaron secar en un horno por 24 horas, y seguido a este tiempo se colocaron las muestras de manera vertical en un recipiente de vidrio. Se colocó sobre ésta un fragmento de sílica y a continuación, se ajustó el micrómetro digital (WESTWARD) sobre el mismo (Figura 31).

Después, se agregó agua destilada hasta la mitad del fragmento de sílica y se anotó el tiempo en que el micrómetro midió el cambio en la expansión.

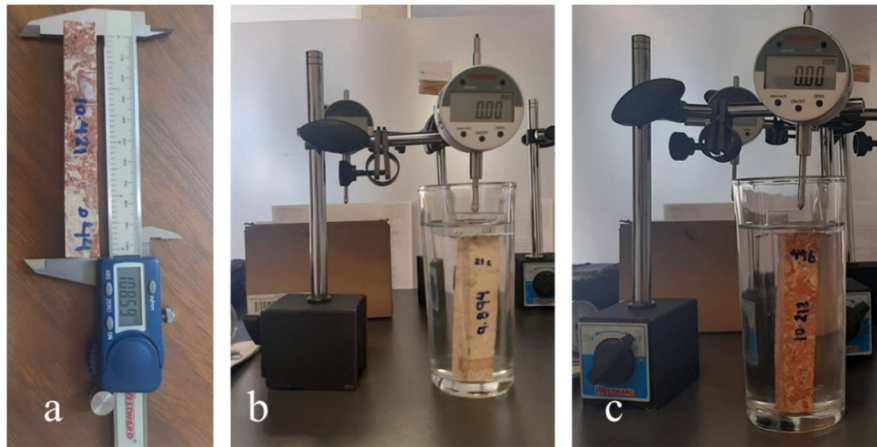


Figura 31. Prueba de expansión hídrica, a) toma de medidas de las muestras, b) brecha de Kabah y c) brecha de Sayil.

En cuanto a la medición de expansión térmica, las muestras se situaron en una plancha térmica (CORNING PC-420D) a 50°C, donde se les colocó en los extremos dos de los indicadores electrónicos. A continuación, se fue aumentando gradualmente la temperatura hasta que la roca alcanzó los 150°C, y el proceso se realizó a la inversa hasta que la roca alcanzó nuevamente los 50°C (Figura 32).

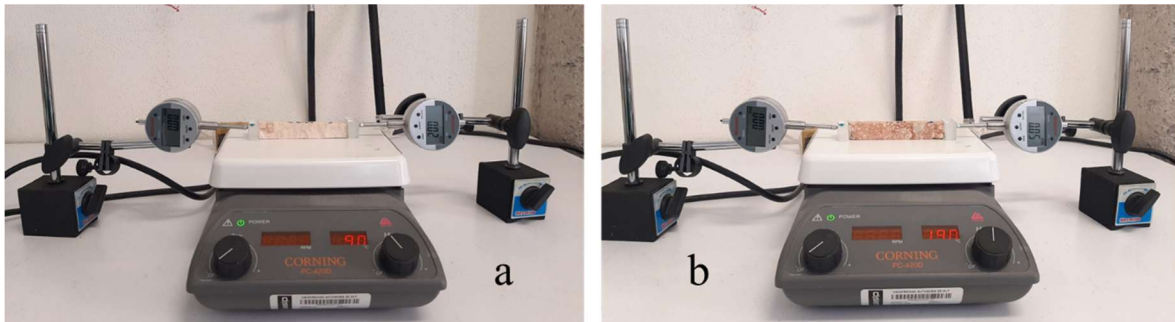


Figura 32. Expansión térmica en a) brechas de Kabah y b) brechas de Sayil.

- Resistencia a la cristalización de sales

La presión generada por el crecimiento de cristales de sales provoca daños estructurales en las rocas (Steiger et al., 2011).

El análisis se realizó de acuerdo con la norma DIN EN 12370 (DIN, 1999). Los cubos se sumergieron por completo en una solución de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ por 4 horas y luego se secaron en un horno a una temperatura de 50°C por 24 horas, lo que correspondió a un ciclo. Dicho proceso se repitió hasta que la roca se destruyó. Después de cada ciclo, se determinó el peso de la muestra por la pérdida de material que sufre. El proceso de deterioro se documentó por medio de fotografías (Figura 33).

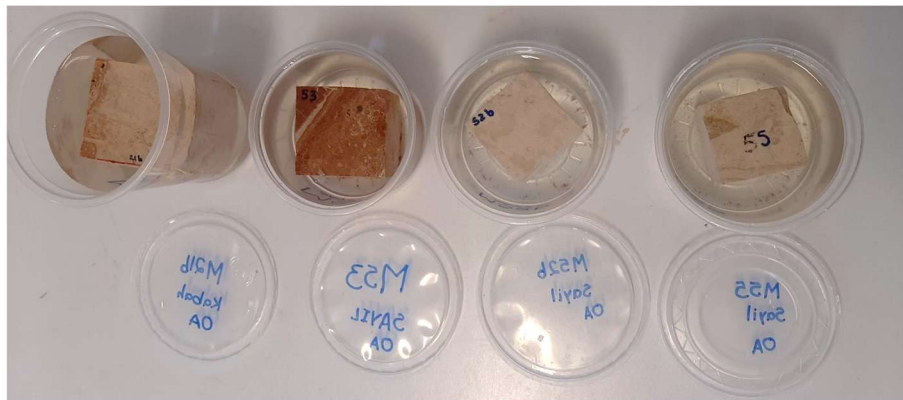


Figura 33. Muestras en la solución de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$.

- Resistencia a la compresión uniaxial

Los valores de resistencia a la compresión uniaxial están controlados por el tamaño de grano, la foliación y los cambios mineralógicos con respecto a la estratificación (Siegesmund & Snethlage, 2011).

Durante el experimento de presión uniaxial no confinada, la muestra experimenta tensión longitudinal hasta que falla y se rompe definitivamente. De acuerdo con Unconfined Compression Strength (UCS), las rocas se han clasificado como se muestra en la Tabla 8 (Attewell & Farmer, 1976).

Tabla 8. Clasificación de la Unconfined Compression Strength (UCS) para la resistencia de las rocas.

Clasificación	Rango de resistencia (MPa)
Rocas duras	80-160 MPa
Rocas de dureza media	40-80 MPa
Rocas débiles	20-40 MPa
Rocas muy débiles	10-20 MPa

Esta prueba se realizó en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Área Civil, UASLP. A los cubos de 6.5 por lado, se les aplicó una carga de $1.5 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$ por medio de una prensa automática Automax 5, marca Controls. La prueba terminó hasta que se provocó la ruptura de la muestra (DIN EN 1926, (DIN, 2007) (Figura 34).



Figura 34. Prueba de resistencia a la compresión uniaxial, a) brecha de Kabah y b) brecha de Sayil.

4.3.3 Análisis geoquímicos

Los análisis geoquímicos permiten conocer la concentración de elementos mayores y trazas, dichos elementos son utilizados en la caracterización química y paleoambiental de las rocas carbonatadas.

- Espectrometría de emisión óptica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES)

El ICP-OES permite el análisis de elementos mayores. El análisis se realizó en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología (IGQ-IG) de la UASLP con un equipo marca Thermo SCIENTIFIC modelo iCap 7000 series, con automuestreador modelo ASX-520 CETAC. Los resultados se llevaron a cabo mediante el software Qtebra versión 2.8.

Se analizaron 23 muestras en total, ocho calizas, trece brechas calcáreas, una de kancab y otra de sascab. La digestión de las muestras se realizó por parrilla.

Como primer paso, las rocas se trituraron (trituradora Retsch) y molieron (molino Retsch RS 200) en el Laboratorio de Preparación del IG-UASLP. Después, el polvo resultante se cribó en tamices Tyler del número 50 y 100 respectivamente, de donde se obtuvieron tamaños de grano menores a $80\mu\text{m}$.

Con el tamaño de partículas deseado, se pesó 0.1g de muestra en viales de PFA Savillex con ayuda de una balanza analítica (Ohaus Adventurer) y una espátula; lo anterior se realizó a todas las muestras y se agregaron 3 duplicados, 2 estándares (UNAM IGLc-1 y NIST 2710 Montana Soil) y 1 blanco reactivo. La digestión de las muestras se realizó por parrilla (Figura 35).

Para la digestión de las muestras, a todos los viales se les agregó 1ml de HNO_3 grado ULTREX y 1ml de HF grado ULTREX con ayuda de micropipetas (Eppendorf Research plus) y puntas.

Se taparon los viales y se colocaron en una parrilla (Barnstead International modelo SP131325); se dejaron reposar los viales por 8 horas a 120°C.

Pasado el tiempo, se destaparon los viales y se dejaron evaporar en una campana de flujo laminar por 3.5 horas, hasta que se formó una costra.

Posteriormente, a los viales se les agregó 1ml de HCl grado ULTREX. Se continuó con la evaporación por 2.5 horas, hasta que se formó una costra.

Se dejaron enfriar los viales y se les agregó 1ml de agua destilada y 1ml de HNO₃ grado ULTREX. Agregado lo anterior, se dejaron en la parrilla por 8 horas. Transcurrido el tiempo, se dejaron enfriar en la parrilla y a continuación se realizó el aforo.

El aforo consistió en agregar la solución de la muestra en tubos para centrifuga y se le añadió agua destilada hasta que el peso total fue 50 ml, con el propósito de someterlas al análisis en el ICP-OES.



Figura 35. Proceso de digestión de las muestras en el Laboratorio de Geoquímica, a) peso de las muestras, b) muestras en la parrilla listas para la evaporación de ácidos, c) adición de ácidos con micropipeta y d) aforo de las muestras.

-Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X ayuda a entender la presencia de diversas fases cristalinas relacionadas con el ambiente de formación. Esto además de indicar las procedencias del material, explica su comportamiento y vulnerabilidad a los factores extrínsecos.

La DRX identifica las fases minerales en las muestras a estudiar. Se realizó en el Instituto de Metalurgia de la UASLP y se analizaron 10 muestras en total, una caliza, siete brechas calcáreas, el kancab y el sascab.

La preparación de la muestra consistió en triturar la roca a un tamaño de partículas de 40 micras. Antes de iniciar, todos los materiales se limpiaron con alcohol isopropílico para evitar contaminación de la muestra.

Primero, se homogenizó la muestra con ayuda de una espátula; realizado lo anterior, se vació una porción del polvo en el porta muestras y se compactó con un portaobjetos y la espátula hasta que ésta permaneció al ras del porta muestras.

Ya bien compactada la muestra, se procedió a colocarla en el difractómetro para polvo (Bruker D8 Advance), el cual tienen una fuente de un tubo de rayos X, de cobre con una longitud de onda de 1.5418 Angströms.

La difracción de Rayos X se enfoca en la fase cristalina, donde se cumple la Ley de Bragg: donde llegue un haz de rayos X, si la muestra es cristalina dispersa la red cristalina y se crea un patrón de difracción.

Las condiciones de trabajo que se utilizaron para los análisis son descritas a continuación:

- Ángulo de difracción (2θ): se utilizó un rango de 4-90°, ya que es el rango para una muestra mineral. La estructura cristalina de las sustancias sólidas puede provocar fenómenos de difracción cuando incide un haz de rayos X en un determinado ángulo (2θ).
- Step/size: 0.02, se avanza cada 0.02 grados. Ejemplo: 4.0, 4.02, 4.04, 4.06, 4.08.
- Time/step: 0.3 segundos. Cada 0.02 la muestra se queda 0.3 segundos.
- Duración: se sumaron los segundos y dio como resultado un tiempo de 21 minutos.

Se utilizó el software DRIFRACT EVA versión 5.2 para la identificación de las fases minerales mediante la base de Datos PDF (Powder Diffraction File)-2 Release 2022 de la ICDD (International Centre for Diffraction Data).

-Fluorescencia de Rayos X (FRX)

La FRX se utiliza para determinar la composición elemental desde el magnesio hasta el uranio. Para este trabajo, dicha técnica permitió conocer el contenido de silicio, ya que, los resultados obtenidos del Si con el ICP-OES de acuerdo con la digestión realizada se pudo evaporar cierto contenido de este elemento. Por lo que esta técnica permitió comparar los valores y obtener un valor más acertado.

La FRX se realizó en el Laboratorio de Remediación del Instituto de Metalurgia de la UASLP, se analizaron cinco muestras en total, de las cuales tres pertenecen a Kabah, dos a Sayil y una al afloramiento de Santa Elena, respectivamente.

Para el análisis se requirió que las muestras estuvieran molidas a un tamaño de partículas de 40 micras, para luego colocarlas en una pequeña bolsa de plástico y lograr medirlas con ayuda de una pistola portátil marca Olympus modelo Delta Professional. El método empleado para el análisis fue el geoquímico.

5. Caracterización geológica, petrográfica, petrofísica y geoquímica de las rocas carbonatadas

En este apartado se presentan los resultados obtenidos, entre los que destacan el trabajo de campo, el cual estuvo comprendido en la realización de una columna litológica, el mapeo litológico de cada sillar y módulo de mosaico que componen las fachadas de los palacios. De igual manera, se presentan los datos obtenidos de los análisis petrofísicos y geoquímicos.

5.1 Litología

5.1.1 Descripción general del tipo de roca

El Codz Pop de Kabah (E2C6) y el Gran Palacio de Sayil (E2B1) están compuestos por mosaicos de rocas labradas que presentan coloraciones rojizas y blancas, de los cuales se identificaron dos tipos: caliza y brecha calcárea. En campo, utilizando las clasificaciones de Dunham (1962) y Embry y Klovan (1972), se logró identificar una textura para la caliza: wackestone, la cual es micrita con poca cantidad de componentes; y dos texturas para las brechas calcáreas: floatstone y rudstone, que la principal diferencia entre ambas es que, los componentes de la primera están soportados por lodo y los de la segunda están grano soportado.

Las calizas presentan un color gris crema (5Y 8/1 para Kabah y 10YR 8/2 para Sayil, según la escala de Munsell), con intercalaciones de brechas calcáreas con una matriz roja muy característica de los palacios (5Y 8/4 para ambas fachadas) (Tabla 9). Los clastos de las brechas están compuestos por calcita de color gris (5Y 8/1), su tamaño es variado, desde 1 milímetro a más de 15 centímetros, se encuentran mal clasificados y son subangulosos a muy angulosos. Además de las texturas mencionadas con anterioridad, por medio de la petrografía de láminas delgadas, se identificaron dos más: mudstone y packstone. Asimismo, se observó que estas rocas presentan gran porosidad, principalmente en las brechas calcáreas.

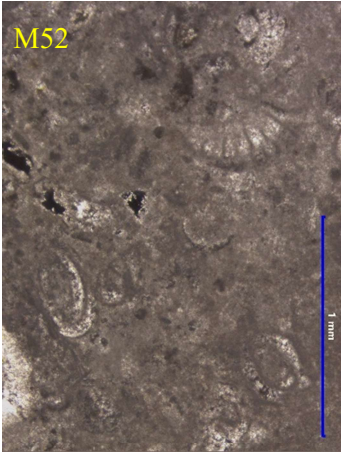
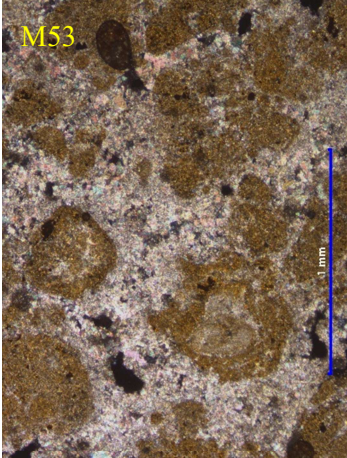
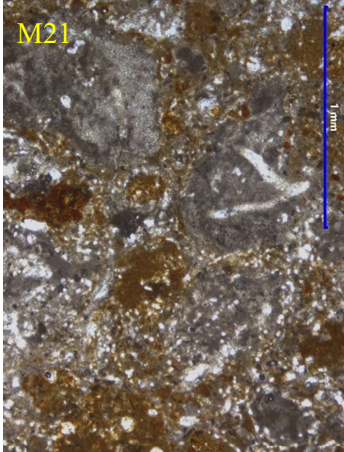
Cabe resaltar que, se observó una ligera variación en el color del Muro 2 de Kabah, para las calizas se registró un color más amarillento (10 YR 8/2) y para las brechas (10R 6/6), debido a la abundante humedad que presenta este muro (Tabla 9).

Tabla 9. Colores de las rocas, suelo y sascab según la escala de Munsell (1915).

Tipo de material	Color presente en:	Color según la escala de Munsell (1915)
Calizas	Kabah: Friso 2, Muro 1,	5Y 8/1
Clastos de las brechas	Muros 3-6	10YR 8/2
Calizas	Kabah: Muro 2 y Sayil	5Y 8/4
Matriz de las brechas	Ambas fachadas	10R 6/6
Matriz de las brechas	Kabah: Muro 2	10R 4/6
Suelo (kancab)		2.5Y 8/2
Sascab		

Es importante mencionar que, en la literatura no existen trabajos que profundicen en las características de las brechas calcáreas de la región, sin embargo, en el presente trabajo dichas brechas poseen gran importancia en el enfoque del deterioro, pues se observó que son este tipo de rocas las que presentan mayores problemas de deterioro (Tabla 10).

Tabla 10. Litologías observadas en el Codz Pop de Kabah (E2C6) y el Gran Palacio de Sayil (E2B1).

	Caliza (wackestone)	Brecha calcárea (floatstone)	Brecha calcárea (rudstone)
Kabah (E2C6)			
Sayil (E2B1)			
Muestras laboratorio			
Microscopio (luz polarizada)			

El suelo presente en la zona arqueológica de Kabah es de color rojo (10R 4/6) de grano fino a grueso y presenta nódulos mayores a 1 mm color negro, posiblemente ferruginosos, parcialmente consolidado (Figura 36a). Según la literatura se ha clasificado como luvisol y en maya se conoce como kancab, corresponde a suelos rojizos con un horizonte de acumulación de arcilla, con saturación por aluminio menor al 60% y entre 25 y 125 cm de profundidad (Bautista, 2021b).

En cambio, el sascab presenta colores crema (2.5Y 8/2), de grano muy fino y con textura suave (Figura 36b). Es un agregado mineral que se utiliza en los morteros del área maya (Straulino Mainou, 2010).

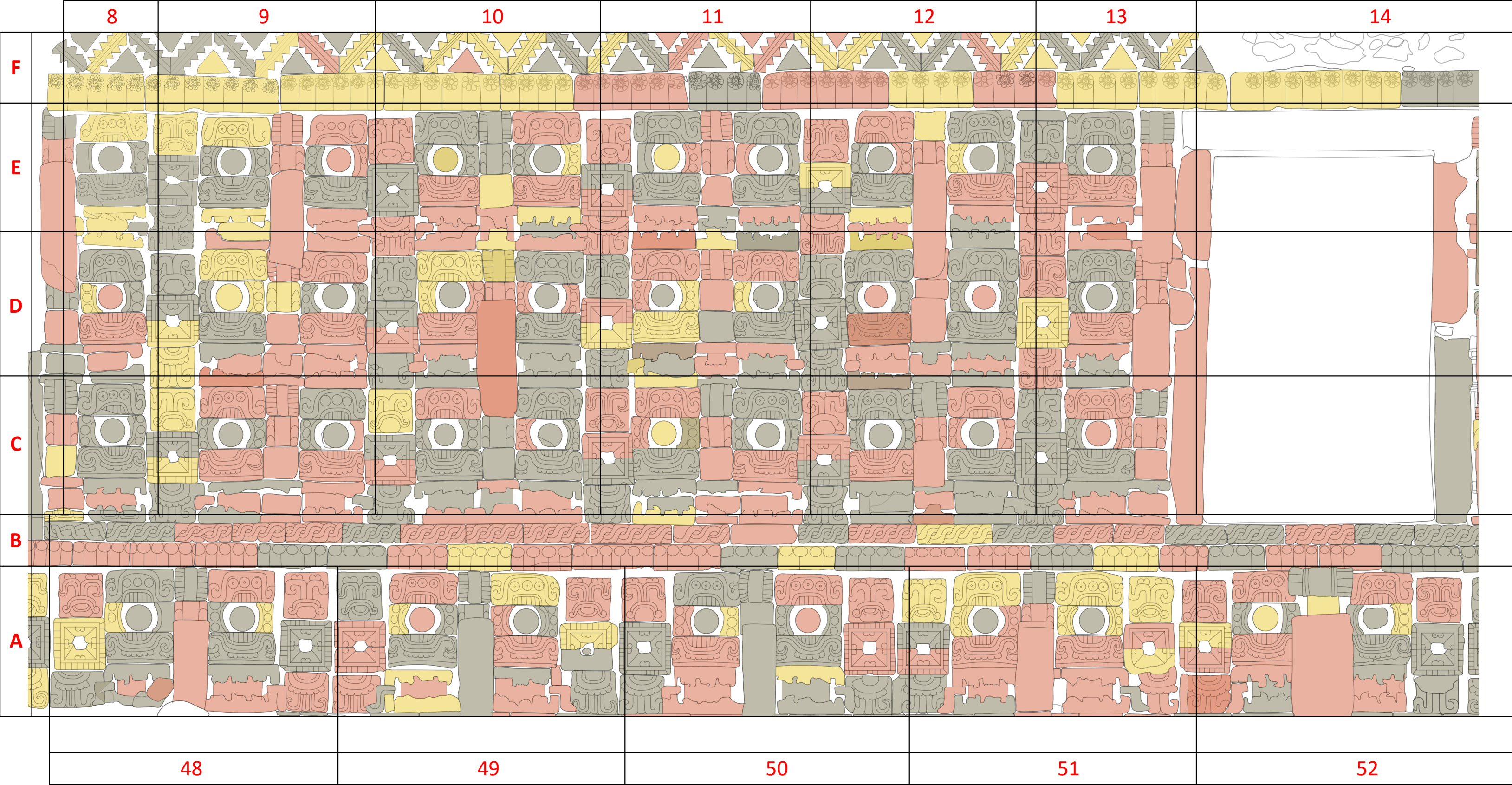


Figura 36. A) suelo kancab y b) sascab.

5.1.2 Mapeos litológicos

Se realizaron los mapeos litológicos y de deterioros de los muros 1-6 y friso 2 de la fachada oeste del Codz Pop en Kabah (E2C6) y los frisos 1-4 de la fachada sur del Gran Palacio de Sayil (E2B1); en general, se observó que las fachadas están compuestas por calizas y brechas calcáreas.

La roca predominante en la mayoría de los muros y frisos es la caliza (textura wackestone), seguida de las brechas calcáreas de textura floatstone y en menor medida las brechas con textura rudstone. Los tipos de roca no presentan preferencia por algún elemento del mosaico (Figuras 37 y 38, Anexo 3).



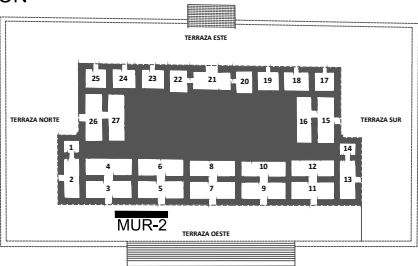
LITOLOGÍA (TEXTURAS CARBONATADAS)

Litología	
Caliza (wackestone)	Núcleo
Brecha calcárea (floatstone)	
Brecha calcárea (rudstone)	

OBSERVACIONES

Figura 37. Mapeo litológico del Muro 2 de la fachada oeste del Codz Pop (E2C6) de Kabah.

UBICACIÓN



Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán



Directoras de Proyecto:
Mtra. Natalia Hernández Tangarife
Mtra. Karla Martínez López

Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda Lazo de la Vega

Equipo de Arquitectura:
Jesús A. Muñoz Cinta
Vidaura A. Cardos Ramírez

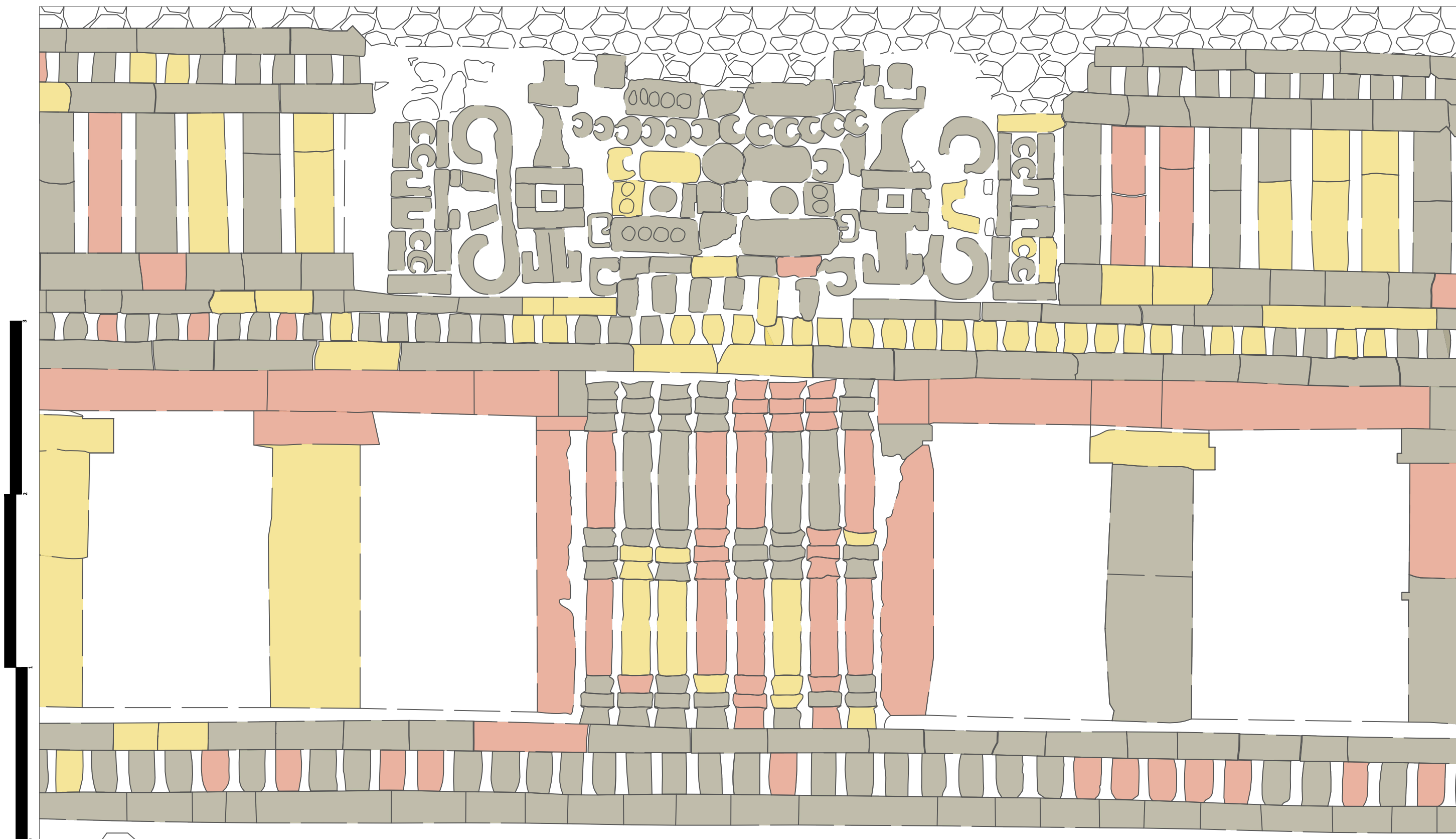
Registro Litológico:
Ing. Osmar A. Coronado Coronado

Registro Digital:
Arq. Daniela Vargas/ Arq. Kin Durán

Registro Litológico:
Diciembre 2022

Registro Digital:
Marzo 2024

Clave: PUC_0002_KAB_E2C6_MOP_FCH_OES_MUR-2_ELI

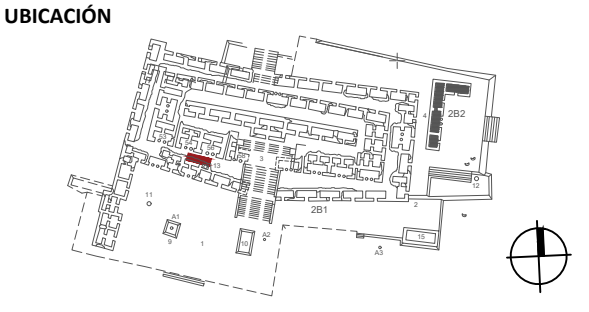


LITOLOGÍA (TEXTURAS CARBONATADAS)

Litología	
Caliza (wackestone)	Núcleo
Brecha calcárea (floatstone)	
Brecha calcárea (rudstone)	

OBSERVACIONES

Figura 38. Mapeo liológico del Friso 3 de la fachada sur del Gran Palacio de Sayil (E2B1).





Conservación-Restauración Yucatán

Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán



Directoras del Proyecto: Mtra. Natalia Hernández Tangarife Mtra. Karla Martínez López	Registro Fotogramétrico: Benjamín Esqueda Lazo de la Vega
Equipo de Arquitectura: Jesús A. Muñoz Cinta Vidaura A. Cardos Ramírez	Registro Litológico: Ing. Osmara A. Coronado Coronado
Registro Digital: Ricardo Luján	Registro Litológico: Marzo 2023
Clave: PUUC_0078_SAY_E2B1-N2_MOP_FCH_SUR_FRI-3_ELI	Registro Digital: Marzo 2024

5.1.3 Columna litológica

Se realizó una columna litológica denominada Santa Elena, el cual es el nombre del municipio donde se encuentra el afloramiento, sobre el que se erige, en el punto más alto el Templo de San Mateo Apóstol (que data del siglo XVII construido en este poblado), localizado aproximadamente 9 y a 20 kilómetros al norte de las zonas arqueológicas de Kabah y Sayil, respectivamente (Figura 39).

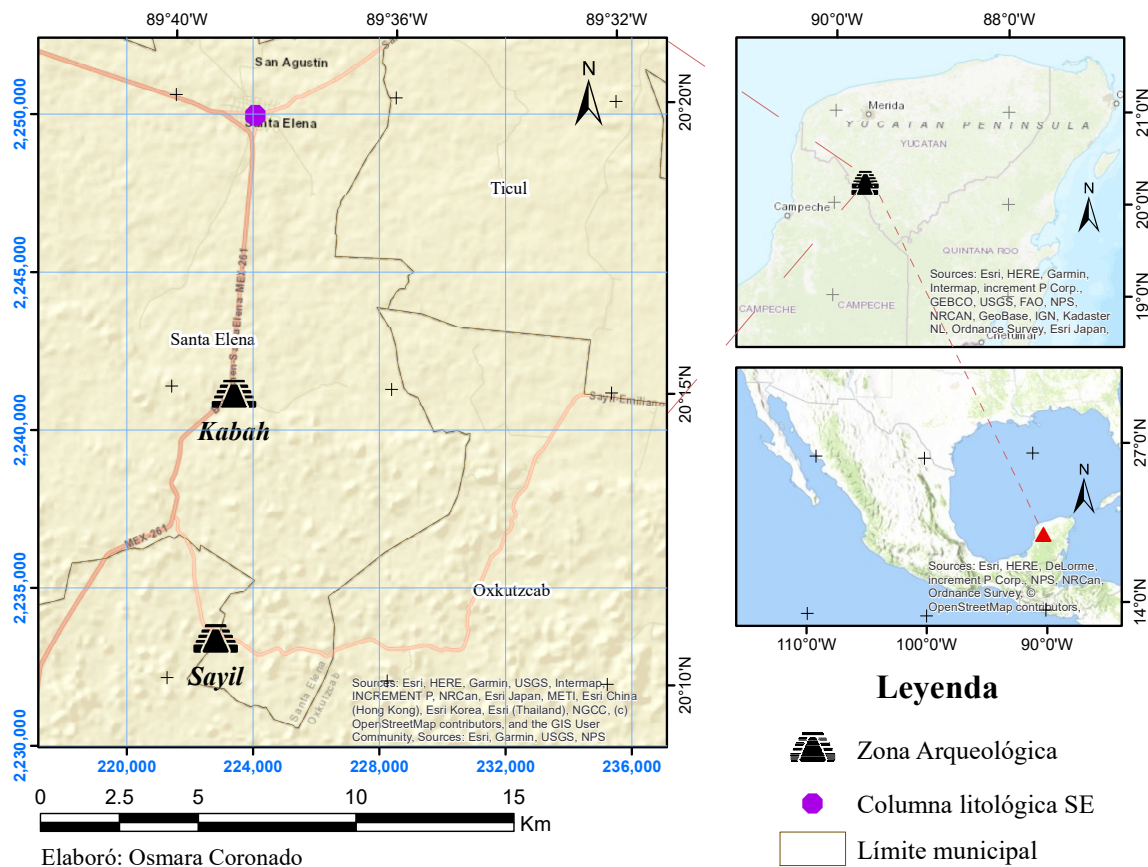


Figura 39. Ubicación del afloramiento de Santa Elena respecto a las zonas arqueológicas. ©PNGWING.

La columna tiene un espesor aproximado de 20 metros, compuesta por 18 capas, de estratos horizontales medianos a gruesos de calizas color blanco a gris, algunos de ellos presentan un rumbo al NE e inclinación al SE, dichos estratos se encuentran intercalados por brechas calcáreas de matriz roja, un rasgo que predomina en las rocas de estos palacios y en los afloramientos cercanos a ellos; los granos presentan diversos tamaños que van desde menores a 1 mm hasta 15 cm, las texturas observadas fueron mudstone, wackestone, floatstone y rudstone. No se observaron fósiles a simple vista (Figura 40 y 41).

Es importante mencionar, que las rocas descritas en este afloramiento y las que conforman las fachadas de los palacios presentan características similares.

Columna Litológica Santa Elena

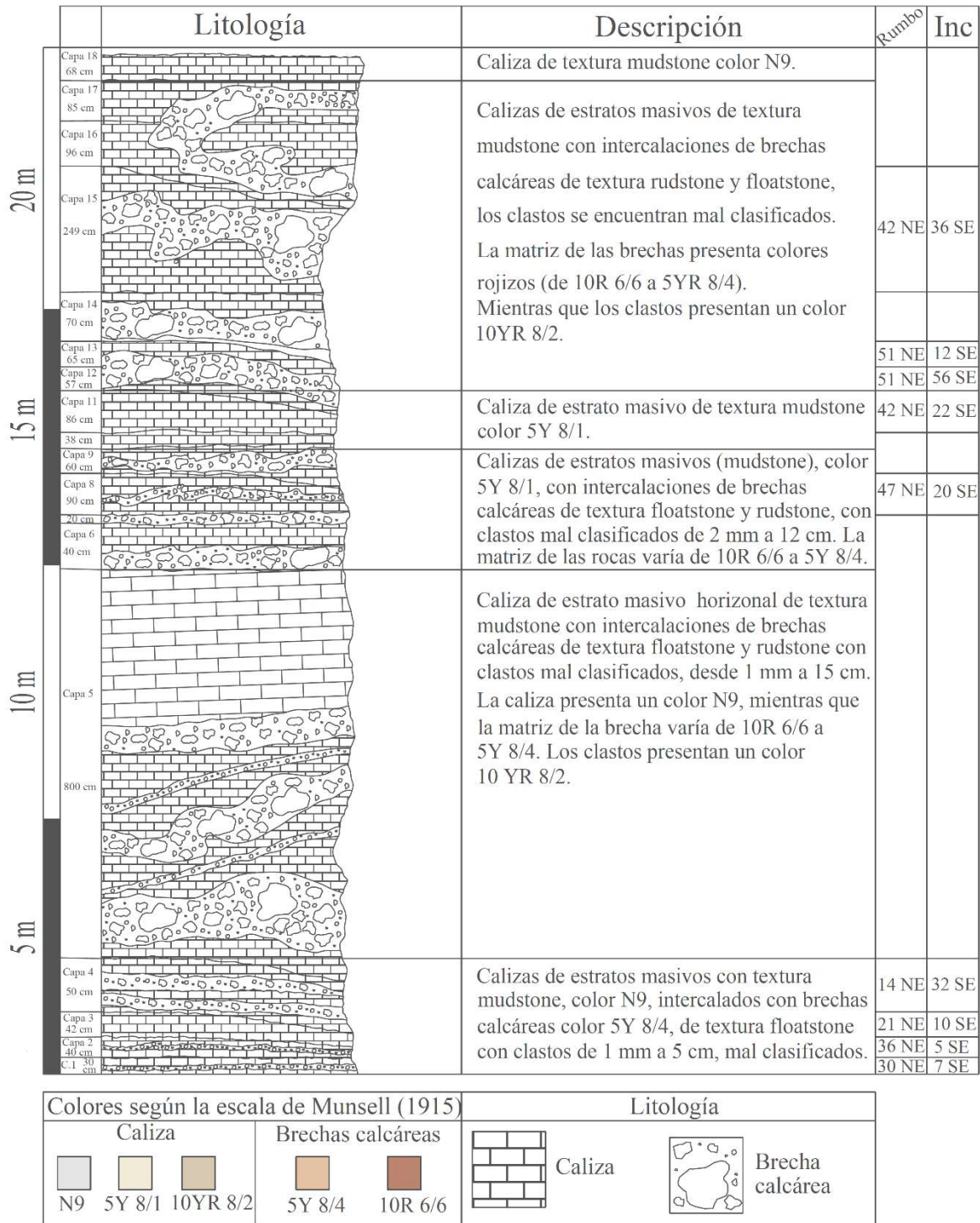


Figura 40. Columna litológica de Santa Elena.

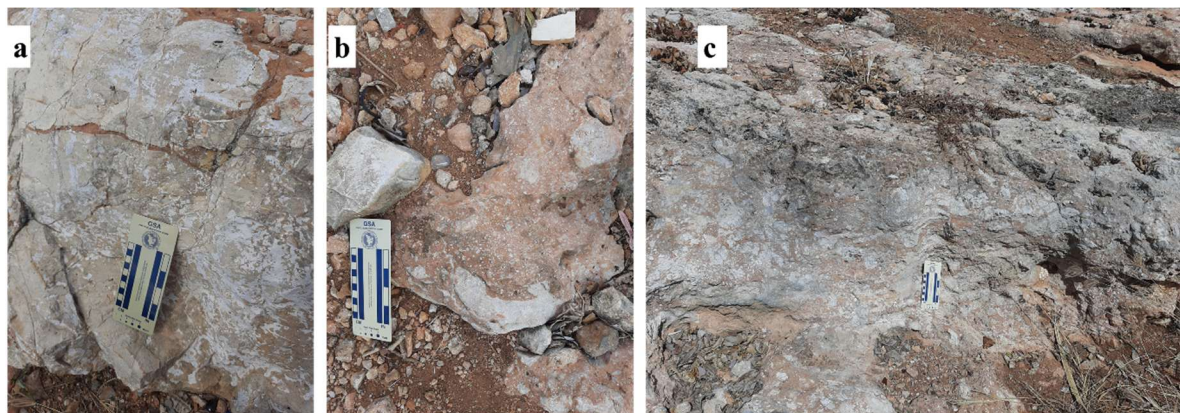


Figura 41. A) Caliza masiva, b) brecha calcárea y c) intercalación de caliza y brecha calcárea.

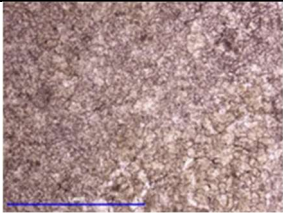
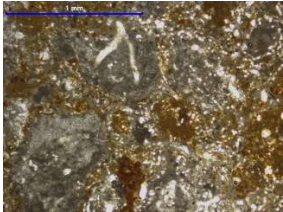
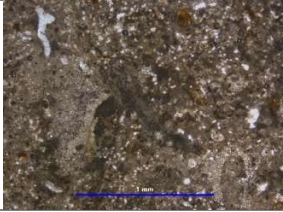
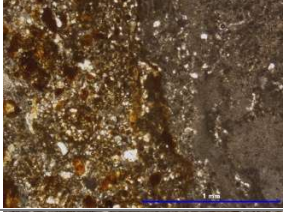
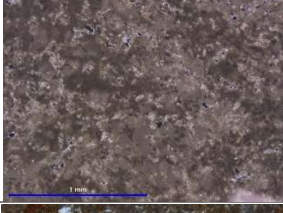
5.2 Petrografía de carbonatos

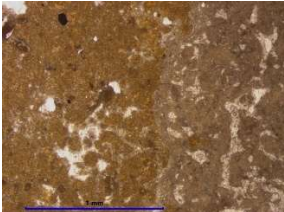
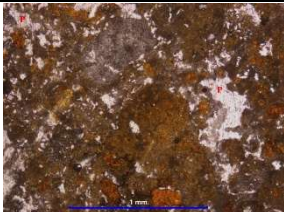
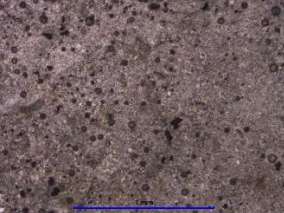
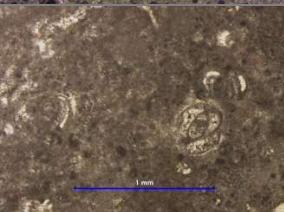
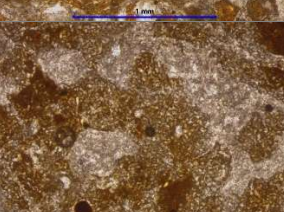
Se realizaron 18 láminas delgadas, de las cuales 8 pertenecen a Kabah, 8 a Sayil y 2 pertenecen al afloramiento de Santa Elena (Tabla 11, Anexo 4).

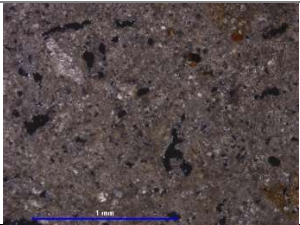
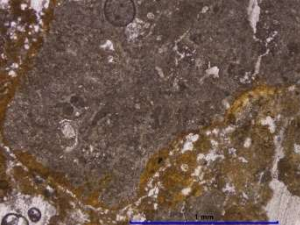
De forma general, las calizas presentan matriz micrítica (>70%), con componentes esqueléticos (30 a 5%) entre los que destacan foraminíferos bentónicos como miliólidos y orbitolinas, además de pelletes, ooides e intraclastos. Presentan porosidad primaria de tipo intergranular (espacios vacíos entre los granos individuales de la roca). Las texturas identificadas para este tipo de rocas son mudstone, wackestone y packstone.

Las brechas calcáreas presentan matriz micrítica (30 a 90%) en ocasiones oxidada, los principales componentes son intraclastos (10 a 70%), sin presencia de fósiles. Salvo en los intraclastos de la M50 y M60 que presentan contenido faunístico. Los clastos se encuentran mal clasificados, predominan los del tipo subanguloso y su tamaño es de 0.2 mm a >1 mm. Presentan porosidad primaria intergranular, así como espacios vacíos entre los clastos de las brechas (M40). Se identificaron tres texturas: packstone, floatstone y rudstone.

Tabla 11. Descripción general y clasificación de las muestras de láminas delgadas, de acuerdo con Dunham, 1962; Folk, 1962 y Embry y Klovan, 1972.

Kabah (E2C6)	Muestra	Descripción general	Clasificación	Fotografías a luz natural (5x)
	M20	Caliza cristalina rosa grisáceo (5R8/2), posiblemente es un mudstone diagenetizado.	Dismicrita (Folk, 1962).	
	M21	Brecha calcárea con clastos gris amarillento (5Y 8/1) como componentes (70%) y matriz micrítica (30%) rosa moderado a anaranjado (5Y 8/4).	Rudstone (Embry y Klovan, 1972) e intrabiomicrudita (Folk, 1962).	
	M22	Brecha calcárea con clastos gris amarillento (5Y 8/1) como componentes (10%) y matriz micrítica (90%) naranja rojizo (10R 6/6).	Floatstone (Embry y Klovan, 1972) e intramicrudita (Folk, 1962).	
	M23	Brecha calcárea con clastos gris amarillento (5Y 8/1) como componentes (15%) y matriz micrítica-arcillosa (85%) naranja rojizo (10R 6/6).	Packstone (Dunham, 1962) e intramicrita (Folk, 1962).	
	M25	Caliza gris amarillento (5Y 8/1), con matriz micrítica (85%) y biocomponentes (15%).	Wackestone (Dunham, 1962) e intrabiopelomicrita (Folk, 1962).	
	M29	Caliza gris amarillento (5Y8/1) con matriz micrita-arcillosa (95%) y biocomponentes (5%).	Mudstone (Dunham, 1962) y micrita (Folk, 1962).	
	M32	Brecha calcárea con clastos gris amarillento (5Y 8/1) como componentes (20%) y matriz micrítica (80%) rosa moderado a anaranjado (5Y 8/4).	Rudstone (Embry y Klovan, 1972) e intramicrudita (Folk, 1962).	

Sayil (E2B1)	M40	Brecha calcárea con clastos gris amarillento (5Y 8/1) y rojo claro (5R 6/6) como componentes (40%) y matriz peloidal (60%) desde rosa moderado a anaranjado (5Y 8/4).	Floatstone (Embry y Klovan, 1972) e intrapeloomicrita (Folk, 1962).	
	M44	Brecha calcárea con clastos gris amarillento (5Y 8/1) y gris claro (N8) como componentes (40%), y matriz (60%) rosa moderado a anaranjado (5Y 8/4).	Rudstone (Embry y Klovan, 1972) e intramicrudita (Folk, 1962).	
	M50	Brecha calcárea con clastos gris amarillento (5Y 8/1) como componentes (15%) y matriz micrítica oxidada (85%) naranja rojizo (10R 6/6).	Floatstone (Embry y Klovan, 1972) y extrabiomicrudita (Folk, 1962).	
	M51	Caliza gris amarillento (5Y 8/1) con matriz micrítica (95%) con intraclastos como componentes (5%).	Mudstone (Dunham, 1962) y micrita (Folk, 1962).	
	M52	Caliza gris amarillento (5Y 8/1) con matriz micrítica (70%) con biocomponentes (30%).	Wackestone de miliólidos (Dunham, 1962) y biomicrita (Folk, 1962).	
	M53	Brecha calcárea con clastos gris amarillento (5Y 8/1) como componentes (30%) y matriz micrítica oxidada (70%) rojo claro (5R 6/6).	Floatstone (Embry y Klovan, 1972) e intrapeloomicrudita (Folk, 1962).	
	M60	Brecha calcárea con clastos (5Y 8/1) y fragmentos esqueléticos como componentes (40%) y matriz micrítica oxidada (60%) naranja rojizo (10R 6/6).	Floatstone (Embry y Klovan, 1972) y extrabiopeloomicrudita (Folk, 1962).	

Santa Elena	M62	Caliza gris amarillento (5Y 8/1) a naranja claro (10YR 8/2) con matriz micrítica (70%) y componentes esqueléticos (30%)	Packstone de miliólidos (Dunham, 1962) y biopelmicrita (Folk, 1962).	
	M66	Caliza gris amarillento (5Y 8/1) con matriz micrítica (95%) e intraclastos como componentes (5%).	Mudstone (Dunham, 1962) y micrita (Folk, 1962).	
	M71	Brecha calcárea con clastos gris rosado (5YR 8/1) como componentes (40%) y matriz pelodial oxidada (60%) rosa claro a anaranjado (5Y 8/4).	Floatstone (Embry y Klovan, 1972) y peloointramicrudita (Folk, 1962).	
	M73	Brecha calcárea con clastos gris rosado (5YR 8/1) y matriz micrítica (60%) rosa claro a anaranjado (5Y 8/4). Dentro de los componentes (40%) se encuentran intraclastos (30%) y biógenos (10%)	Floatstone (Embry y Klovan, 1972) e intrabiomicrudita (Folk, 1962).	

El análisis de microfacies nos permite identificar por medio de los sedimentos dominantes y la biota el ambiente de depósito, así como las condiciones ambientales que dieron lugar a dichos carbonatos (Flügel, 2010).

De acuerdo con lo anterior, se identificaron tres ambientes de depósito de las muestras analizadas: rampa interna, rampa media y rampa profunda. Se observó que las calizas se agruparon en la rampa interna y profunda, mientras que las brechas en la rampa media (Figura 42).

Las calizas (mudstone, wackestone, packstone) de la rampa interna pertenecientes a Kabah (E2C6) y Sayil (E2B1), se describieron como depósitos de lodo carbonatado formados en zonas costeras poco profundas afectados por la agitación de las olas, con presencia de ooides, foraminíferos, algas y moluscos. Mientras que las calizas de rampa profunda de ambas fachadas se caracterizaron como carbonatos de grano fino y en ocasiones arcillosos, desarrollados en un ambiente de baja energía, con presencia de organismos como foraminíferos, esponjas, briozoos, braquiópodos, moluscos y equinodermos.

Por otro lado, las brechas calcáreas (packstone, floatstone, rudstone) de ambas fachadas, así como del afloramiento de Santa Elena se ubicaron en la rampa media, en este ambiente los

sedimentos reflejan la influencia de las tormentas, por lo que es común encontrar brechas, intraclastos y los componentes esqueléticos muestran signos de transporte.

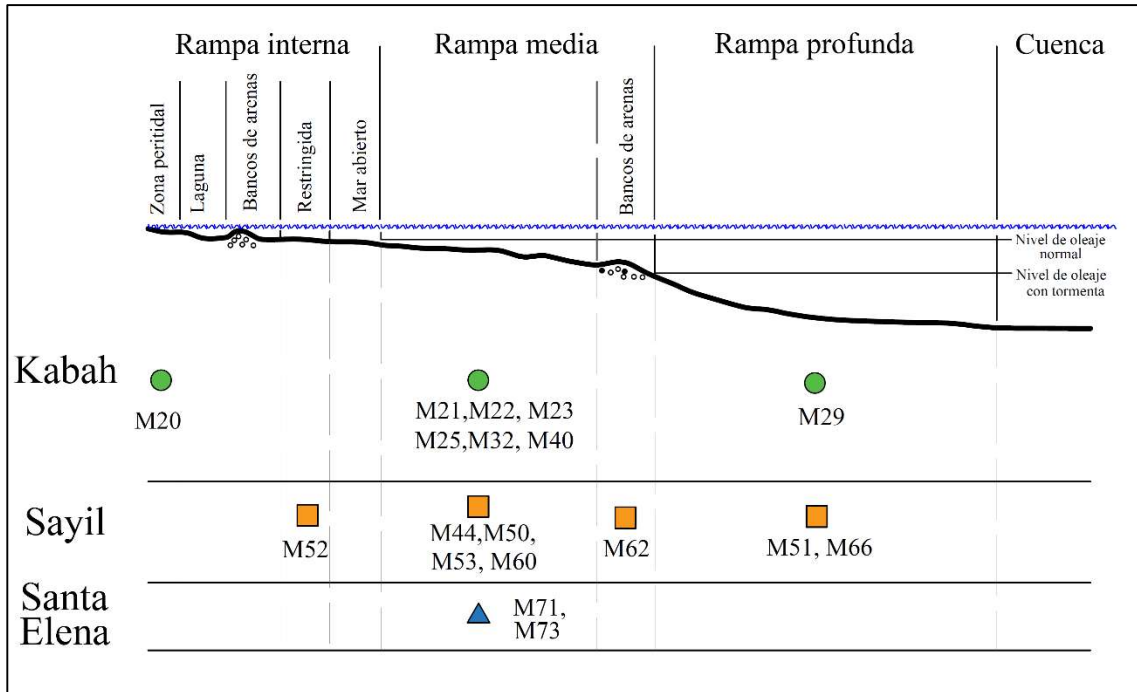


Figura 42. Ambientes de depósito de las rocas de las fachadas del Codz Pop (E2C6), del Gran Palacio de Sayil (E2B1) y del afloramiento de Santa Elena.

Por lo expuesto anteriormente, las rocas de ambas fachadas y las del afloramiento de Santa Elena, poseen semejanzas tanto en muestra de mano como en el análisis petrográfico, por lo que se llega a la conclusión de que pertenecen a la misma formación geológica; en el apartado de discusión se explica a profundidad.

5.3 Análisis petrofísicos

Los análisis petrofísicos se realizaron en el Laboratorio de Petrofísica, como se describe a continuación.

5.3.1 Porosidad-densidad

Se determinaron los valores de porosidad y densidad de 25 muestras en total, de las cuales 15 son brechas calcáreas y 10 son de calizas.

De acuerdo con los resultados de porosidad, las rocas de ambos palacios presentaron valores desde 2.5% hasta 29%. Tanto las calizas como las brechas se agruparon en cuatro grupos según la clasificación de von Moos y de Quervain (1948) siendo ligeramente porosa, significativamente porosa, muy porosa y gran espacio poroso, predominando las rocas con valores de 10 a 20% (muy porosa) (Tabla 12).

En las muestras analizadas de los palacios, la porosidad general promedio es de 15%, mientras que para las calizas es de 14% y para las brechas de 16%, se observó que las brechas pertenecientes a Kabah (E2C6) poseen mayor porosidad (20-28%), que las calizas (13-18%);

mientras que en Sayil (E2B1) las calizas presentan un amplio rango de porosidad (8-18%), y las brechas se agrupan en dos grupos contrastantes: 1) de gran espacio poroso (22-29%) similar a las brechas de Kabah, y 2) de ligera porosidad (2-3%), debido a que estas rocas se encuentran parcialmente o totalmente recrystalizadas debido a procesos diagenéticos.

La densidad de la matriz (Tabla 12) es cercana a la densidad de la calcita (2.7 g/cm^3), ya que es el componente principal de las rocas; mientras que, la densidad aparente oscila entre de 1.8 a 2.5 g/cm^3 , dicha variación se debe al porcentaje de espacios vacíos. Como mencionaron Rocha-Vargas et al. (2019), cuanto menor sea la densidad de una roca, mayor será la cantidad de espacios vacíos y en consecuencia la porosidad de ésta.

Tabla 12. Resultados de la prueba de densidad-porosidad.

	Muestra	Tipo de roca y textura	Densidad de Matriz (g/cm^3)	Densidad Aparente (g/cm^3)	Absorción al vacío (% en peso)	Porosidad (%)	Clasificación de Moos y Quervain (1948)
Kabah (E2C6)	M20	Caliza cristalina	2.667	2.568	1.455	3.736	ligeramente porosa
	M21	Brecha (rudstone)	2.598	2.108	8.952	18.868	muy porosa
	M22	Brecha (floatstone)	2.639	2.255	6.548	14.563	muy porosa
	M23	Brecha (packstone)	2.626	2.099	9.568	20.083	gran espacio poroso
	M25	Caliza(wackestone)	2.614	2.139	8.503	18.183	muy porosa
	M27	Brecha (floatstone)	2.606	1.865	15.258	28.450	gran espacio poroso
	M28	Brecha (floatstone)	2.619	2.069	10.149	21.001	gran espacio poroso
	M29	Caliza (mudstone)	2.619	2.170	7.906	17.155	muy porosa
	M30	Caliza (mudstone)	2.631	2.232	6.788	15.152	muy porosa
	M31	Brecha floatstone)	2.576	1.918	13.327	25.558	gran espacio poroso
	M32	Brecha (rudstone)	2.622	2.267	5.967	13.530	muy porosa
	M40	Brecha (floatstone)	2.622	2.394	3.627	8.684	significativamente porosa
Sayil (E2B1)	M42	Brecha (floatstone)	2.692	2.593	1.425	3.694	ligeramente porosa
	M43	Caliza (mudstone)	2.667	2.377	4.572	10.869	muy porosa
	M44	Brecha (rudstone)	2.653	1.867	15.880	29.644	gran espacio poroso
	M45	Caliza (mudstone)	2.643	2.273	6.159	13.997	muy porosa
	M46	Brecha (floatstone)	2.655	2.047	11.192	22.906	gran espacio poroso
	M50	Brecha (floatstone)	2.643	2.575	1.001	2.577	ligeramente porosa
	M51	Caliza (mudstone)	2.677	2.172	8.694	18.881	muy porosa
	M52	Caliza(wackestone)	2.666	2.430	3.641	8.849	significativamente porosa
	M53	Brecha (floatstone)	2.629	2.128	8.944	19.036	muy porosa
	M54	Caliza (mudstone)	2.709	2.373	5.228	12.405	muy porosa
	M55	Caliza (mudstone)	2.669	2.191	8.173	17.906	muy porosa
S E	M74	Brecha (floatstone)	2.690	2.259	7.094	16.024	muy porosa
	M75	Brecha (floatstone)	2.634	2.419	3.374	8.160	significativamente porosa

5.3.2 Absorción por capilaridad experimental

La prueba de absorción por capilaridad se llevó a cabo en ocho muestras, de las cuales tres son brechas y cinco son calizas (Tabla 13).

Tabla 13. Resultados de la prueba de absorción por capilaridad. Ordenados de mayor a menor porcentaje de absorción.

	Muestra	Tipo de roca	Porcentaje de absorción (%)	Porosidad (%)
Kabah	M21	Brecha (rudstone)	4.13	18.86
	M51	Caliza (mudstone)	1.78	18.88
	M55	Caliza (mudstone)	0.64	17.9
Sayil	M54	Caliza (mudstone)	0.45	12.4
	M53	Brecha (floatstone)	0.33	19.03
	M43	Caliza (mudstone)	0.27	10.86
	M52	Caliza (wackestone)	0.22	8.84
	M50	Brecha (floatstone)	0.10	2.57

La absorción por capilaridad depende del sistema poroso de las rocas, y en particular, de la porosidad (abierta) y del tamaño de los poros. La representación de la absorción capilar está compuesta por dos etapas, en la primera se produce la entrada de agua al sistema poroso de la roca por capilaridad, hasta que la roca se satura de agua, lo que sería la segunda etapa (Benavente et al., 2004).

Se analizaron tres muestras de brecha calcárea y se graficó su comportamiento (Figuras 43 y 44). La brecha que mayor absorción mostró fue la de Kabah (M21), sin embargo, todas las muestras tuvieron un comportamiento similar: inicialmente se observó una absorción rápida donde el tiempo es variable en cada muestra, después de esto se mostró una disminución del ritmo de absorción y finalmente se registraron los valores de equilibrio, es decir, la muestra alcanzó la saturación.

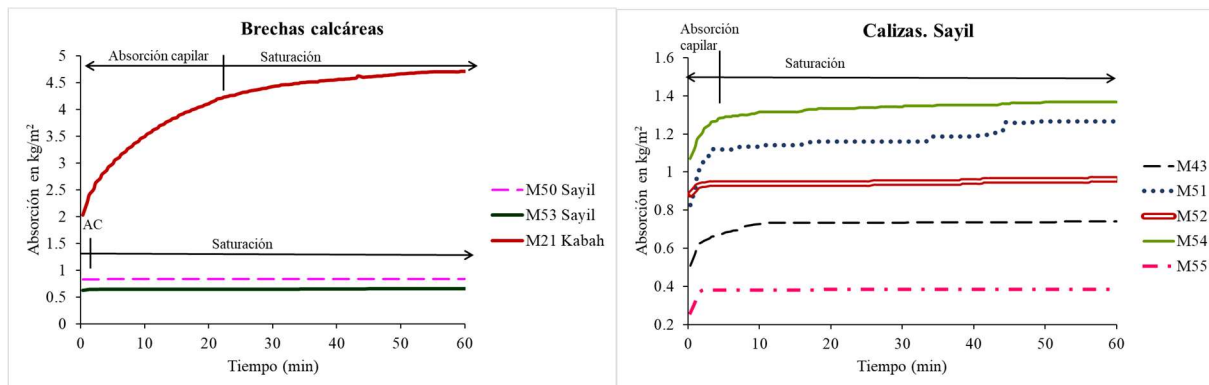


Figura 43. Comportamiento de las brechas calcáreas y las calizas ante la absorción capilar experimental.



Figura 44. Absorción capilar experimental de las muestras colectadas. La línea roja indica la absorción registrada en 60 minutos.

5.3.3 Expansión hídrica

Se utilizaron cinco muestras, de las cuales dos son calizas y tres son brechas. Se realizó la prueba a cada muestra e inclusive se repitió el experimento y no se obtuvo expansión hídrica, posiblemente a la ausencia de material arcilloso, ya que las muestras analizadas son calizas muy puras (Figura 45).

Diversos autores han mencionado que la expansión hídrica en las rocas porosas se debe principalmente a la expansión de los minerales arcillosos presentes, además, la microporosidad tiene un efecto significativo en ésta, pues se ha demostrado que las rocas con poros más grandes no muestran gran expansión (Ruedrich et al., 2011; Wedekind et al., 2013).

Asimismo, Ruedrich et al. (2011) mencionaron que la expansión se debe a la influencia entre la microporosidad y el contenido mineral arcilloso, así como la ubicación de estos dentro del espacio poroso, pues si se orientan a lo largo de los límites de grano se genera una mayor expansión.



Figura 45. Prueba de expansión hídrica en las muestras.

5.3.4 Expansión térmica

En cuanto a la expansión térmica, las cinco muestras (dos son calizas y tres brechas), presentaron respuestas positivas a la expansión, llegando inclusive hasta 1.19 mm/m de expansión a los 150°C y hasta -0.69 mm/m de contracción a los 40°C (Tabla 14, Figura 46). Es importante mencionar que, la prueba se realizó en condiciones secas.

Tabla 14. Expansión mínima y máxima de cada muestra.

Muestra		Tipo de roca	T (°C)	Expansión mínima (mm/m)	T (°C)	Expansión máxima (mm/m)	T (°C)	Contracción mínima (mm/m)	T (°C)	Contracción máxima (mm/m)
K	21a	Brecha (rudstone)	80	0.09	153	0.59	30	-0.09	99	0.49
	21c	Brecha (rudstone)	81	0.10	155	0.60	52	0.10	106	0.50
Sayil	43	Caliza (mudstone)	76	0.10	148	1.19	37	-0.44	91	-0.11
	44b	Brecha (rudstone)	90	0.09	154	0.48	52	0.09	105	0.39
	44d	Brecha (rudstone)	85	0.09	140	0.39	46	-0.49	83	-0.09
	69	Caliza (mudstone)	68	0.09	140	0.99	42	-0.69	113	-0.09
E	72	Brecha(floatstone)	74	0.10	139	0.70			122	0.60

En las gráficas (Figura 46) se observa el comportamiento de las rocas ante la exposición a la temperatura, el color azul indica cuando una roca registró contracción y el rojo cuando ésta mostró expansión.

Las brechas calcáreas (M21, M44, M72), muestran comportamientos cíclicos, algunos más acelerados que otros, sin embargo, al finalizar la prueba no vuelven a sus dimensiones iniciales. Mientras que las calizas (M43, M69), mostraron mayor respuesta a la expansión, en promedio 0.9 mm/m.

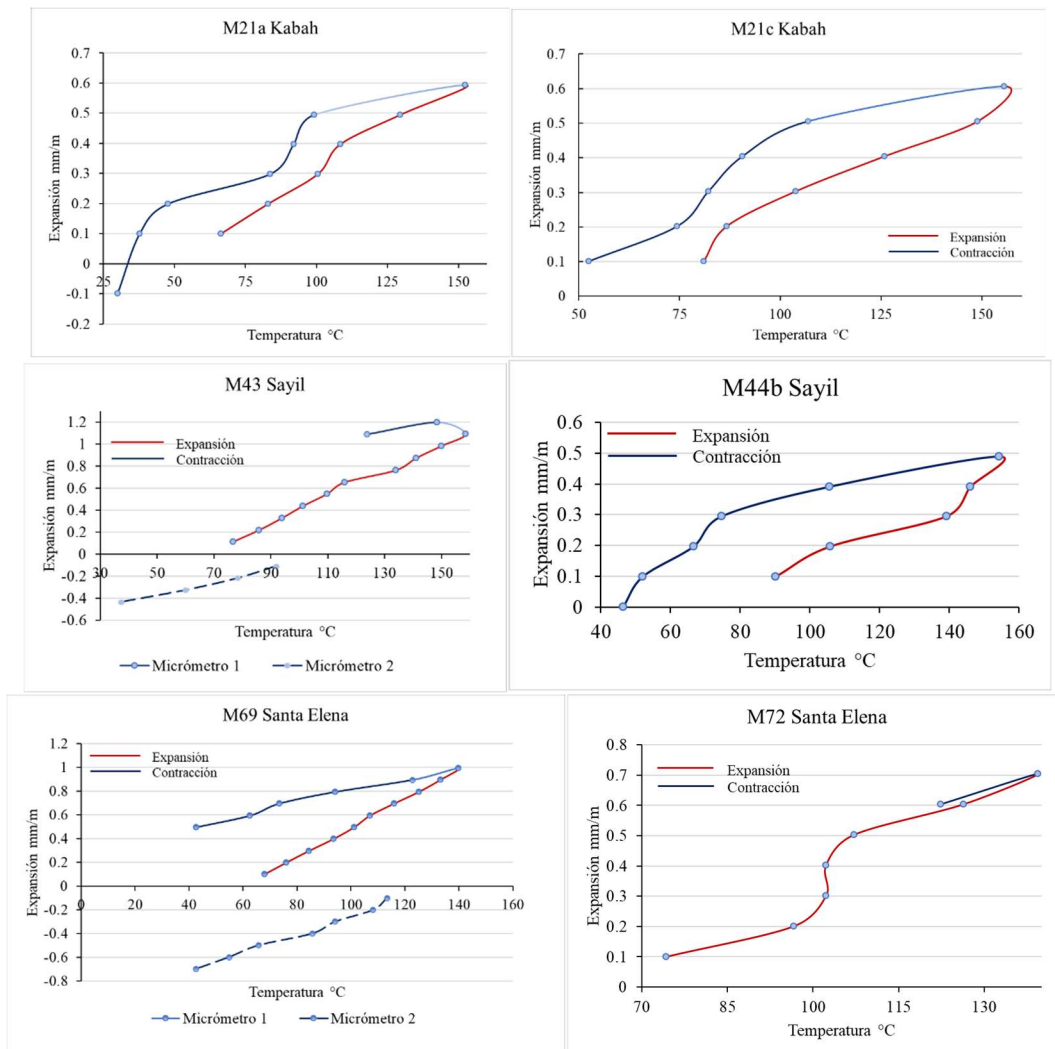


Figura 46. Comportamiento de las muestras ante la expansión térmica.

5.3.5 Resistencia a la cristalización de sales

Se realizó la prueba a cuatro muestras, de las cuales dos son calizas y dos son brechas calcáreas.

En la Tabla 15 se observan los deterioros que se registraron al sumergir las muestras en solución de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$. Asimismo, en las Figuras 47-50 se muestran de manera visual los deterioros que manifestaron las rocas.

Tabla 15. Comportamiento de las rocas ante los efectos de la cristalización de sales.

	Clave	Tipo de roca	Ciclos	Deterioros observados	
Kabah	M21	Brecha (rudstone)	100	-Erosión -Disgregamiento -Pérdida de matriz y clastos	-Fracturas rellenas por sal -Fisuras y grietas -Delaminación -Eflorescencia (Figura 47)
	M52	Caliza (wackestone)	100	-Eflorescencia -Delaminación -Eflorescencia	- <i>Flaking</i> -Erosión diferencial por detritos (Figura 48)
Sayil	M53	Brecha (floatstone)	25	-Erosión -Pérdida de matriz y clastos	-Delaminación -Eflorescencia (Figura 49)
	M55	Caliza (mudstone)	52	-Grietas -Fracturas -Delaminación	-Concentración de sales en las grietas y fisuras -Eflorescencia (Figura 50)

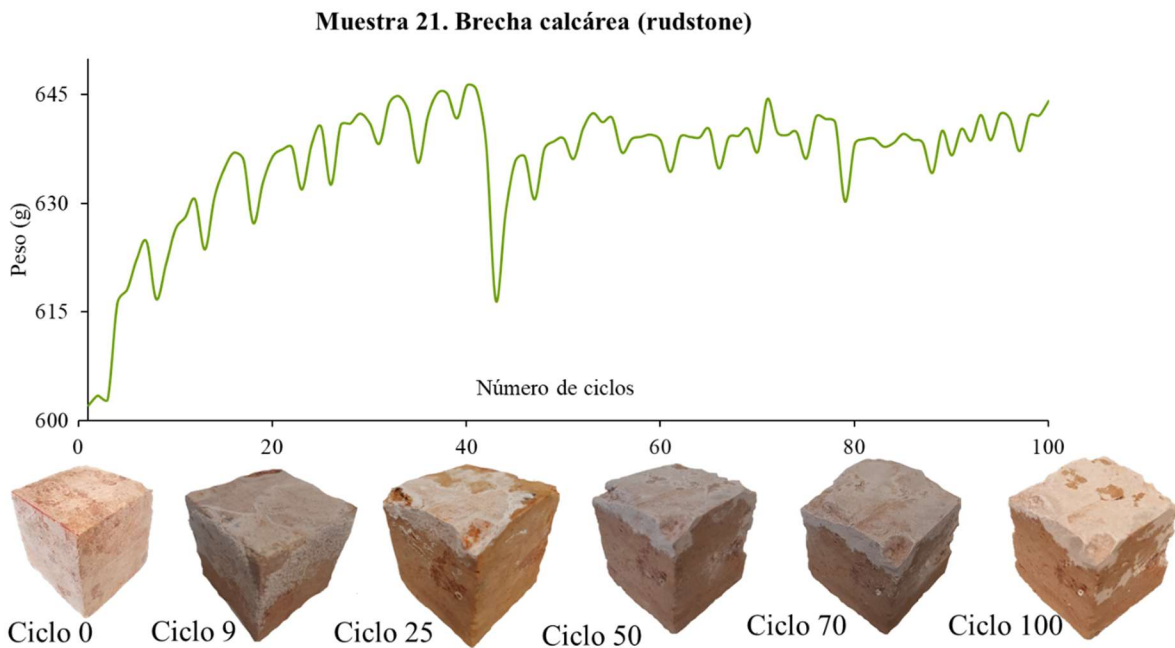


Figura 47. Comportamiento y evolución del deterioro en la brecha de Kabah frente a la cristalización de sales.

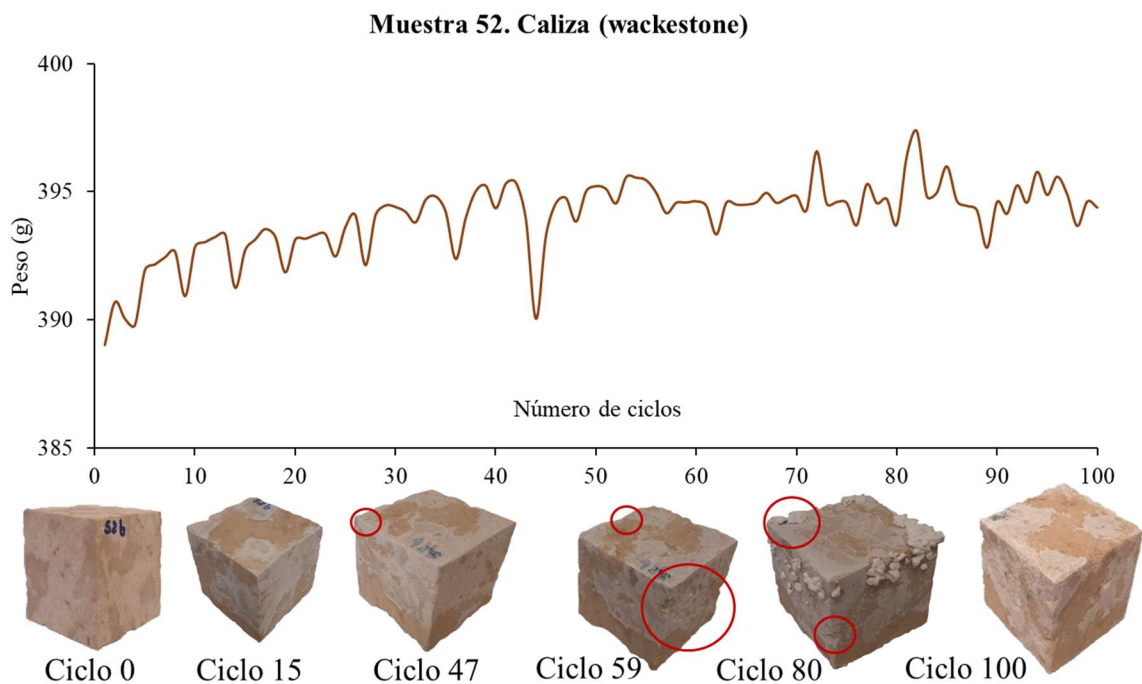


Figura 48. Comportamiento y evolución del deterioro en la caliza de Sayil debido a la cristalización de sales. En los círculos rojos se observa la delaminación.

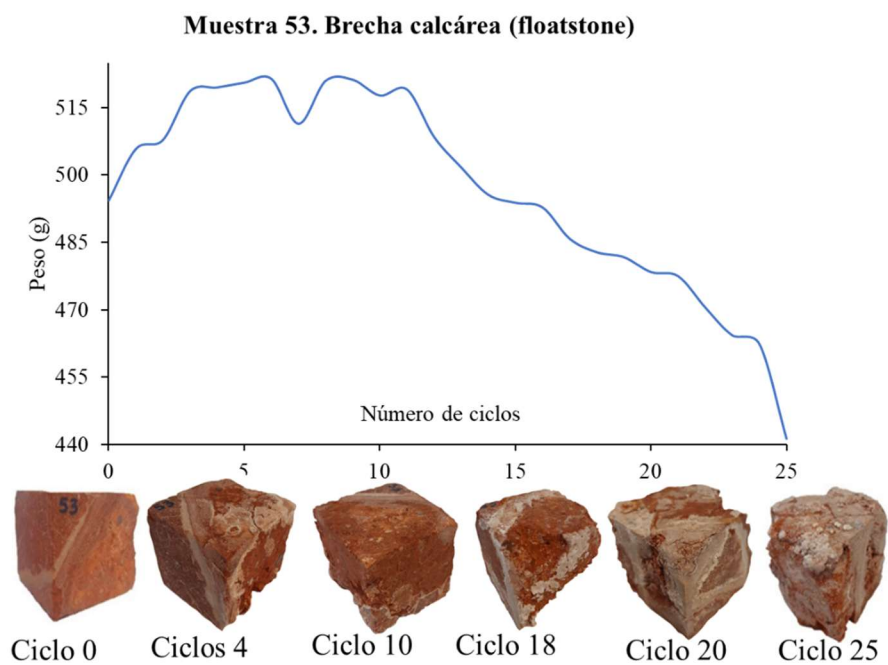


Figura 49. Comportamiento y evolución del deterioro en la brecha de Sayil frente a la cristalización de sales.

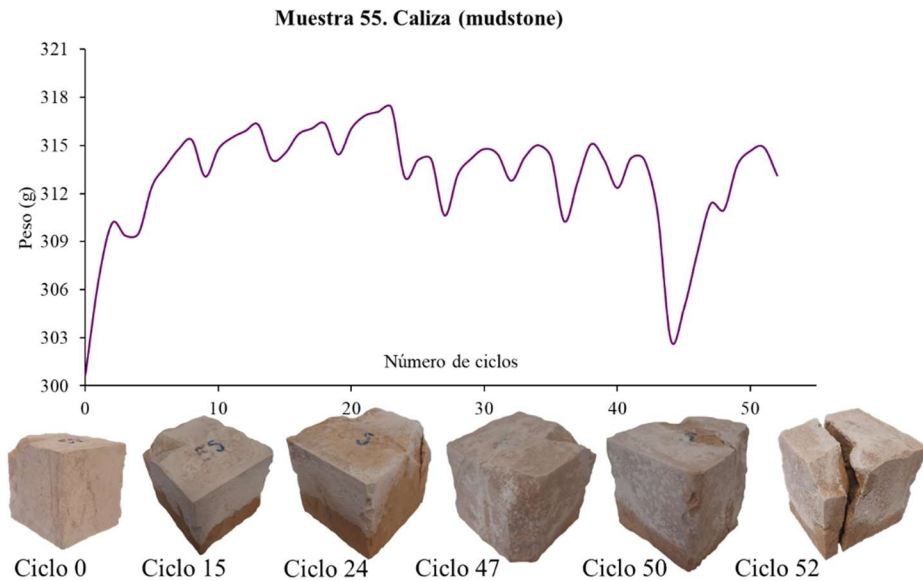


Figura 50. Comportamiento y evolución del deterioro en la caliza de Sayil debido a la cristalización de sales.

5.3.6 Resistencia a la compresión uniaxial

Se efectuó la prueba a tres muestras, dentro de las cuales dos pertenecen a brecha calcárea y la restante a caliza (Tabla 16). De acuerdo con la clasificación del Unconfined Compression Strength (UCS) (Attewell & Farmer, 1976), se tienen rocas débiles y de dureza media.

Cada una de las muestras mostraron una fractura extensional principal paralelas al eje z. Además, la brecha de Kabah exhibió fracturas secundarias oblicuas en el mismo eje que la principal (Figuras 51-53).

Tabla 16. Valores obtenidos de la prueba de compresión uniaxial en las muestras.

	Kabah (E2C6)	Sayil (E2C6)	
Muestra	M21	M50	M54
Tipo roca	Brecha (rudstone)	Brecha (floatstone)	Caliza (wackestone)
	Roca débil	Roca de dureza media	Roca débil
X (cm)	6.73	5.22	6.61
Y (cm)	6.64	5.17	6.64
Z (cm)	6.64	5.13	6.59
Carga (Ton)	11.030	14.699	11.605
Presión (MPa)	24	53	25



Figura 51. Evolución de la destrucción de la brecha (rudstone) de Kabah (M21) debido a una fuerza compresiva.



Figura 52. Evolución de la destrucción de la brecha (floatstone) de Sayil (M50) debido a una fuerza compresiva.



Figura 53. Evolución de la destrucción de la caliza (wackestone) de Sayil (M54) debido a una fuerza compresiva.

5.4 Análisis geoquímicos

En esta sección se resumen los hallazgos más relevantes de acuerdo con los análisis geoquímicos realizados a las rocas de ambas fachadas, de igual manera en el Anexo 5 se muestran los resultados de cada muestra.

Se analizaron un total de 22 muestras, para la espectrometría de emisión óptica (ICP-OES), de las cuales seis son calizas, una de suelo (kancab), otra más de sascab y 14 son brechas.

Se observó que, en todas las muestras de roca presentan contenido de CaO superior al 85%, lo que nos indica su gran pureza, seguido de este óxido en abundancia, se encuentran el Al₂O₃, el MgO y el Fe₂O₃, asociados al detrito orgánico, material terrígeno y con cambios químicos postsedimentarios (dolomitización).

En la FRX se analizaron cinco muestras, de las cuales cuatro de ellas son brechas y una pertenece al suelo (kancab). Los resultados indicaron una mayor cantidad de silicio tanto en el suelo (M19) como en las brechas (>2%) (Tabla 17, recuadros sombreados), sin embargo, el valor obtenido es mínimo, a comparación de las rocas silicatadas, ya que se trata de carbonatos.

Tabla 17. Valores promedio de los óxidos mayores analizados por ICP-OES.

ÓXIDOS MAYORES (% PESO)												
	Tipo de roca	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total
Codz Pop (E2C6)	Caliza	0.44	0.01	0.31	0.25	0.01	1.22	97.63	0.11	0.02	-	100
	Brecha	2.74	0.12	4.70	1.39	0.03	1.21	89.45	0.13	0.21	0.03	100
Palacio de Sayil (E2B1)	Caliza	0.31	0.08	3.03	0.80	0.04	0.40	95.18	0.01	0.14	0.02	100
	Brecha	3.40	0.22	10.01	2.80	0.20	0.85	81.97	0.06	0.47	0.02	100

En DRX se analizaron 10 muestras, de las cuales una es caliza, siete son brechas, una pertenece al suelo de Kabah (kancab), y otra al material utilizado en la preparación del mortero, denominado sascab.

Las muestras al ser calizas puras, predomina la calcita, sin embargo, algunas brechas mostraron dolomita, cuarzo y caolinita (Tabla 18).

Tabla 18. Minerales presentes en las muestras detectados por DRX.

	Muestra	Tipo de roca	Calcita	Otros minerales
Kabah (E2C6)	M21	Brecha (rudstone)	X	
	M22	Brecha (floatstone)	X	
	M24	Brecha (floatstone)	X	X
Sayil (E2B1)	M44	Brecha (rudstone)	X	
	M47	Brecha (floatstone)	X	
	M52	Caliza (wackestone)	X	
	M61	Brecha (floatstone)	X	X
SE	M70	Brecha (floatstone)	X	X

El suelo registró además de la calcita, caolinita, goetita, cuarzo, hematita y cloritoide (Anexo 5).

En el sascab se obtuvo calcita, dolomita y montmorillonita (Anexo 5).

6. Discusión: el impacto del deterioro en las rocas de los templos de la Región Puuc

En el presente apartado se muestra la interpretación de los resultados obtenidos tanto en las técnicas analíticas como en las observaciones en campo y su relación con el deterioro de los mosaicos que recubren el Codz Pop (E2C6) y el Gran Palacio de Sayil (E2B1).

6.1 Caracterización geológica de las rocas carbonatadas

Como ya se mencionó, las rocas que componen a los mosaicos de estos palacios se dividen en calizas (de texturas mudstone y wackestone), y en brechas calcáreas (con texturas packstone, floatstone y rudstone).

De acuerdo con las descripciones y observaciones en muestra de mano y en petrografía, las rocas de los mosaicos que componen la fachada oeste del Codz Pop y sur del Gran Palacio de Sayil, así como del afloramiento de Santa Elena, pertenecen a la misma formación geológica perteneciente al Paleoceno-Eoceno (66-33 Ma), ya que coinciden con lo reportado por García Gil y Graniel Castro (2010), sin mencionar algún nombre formacional, pues se trata de calizas compactas micro a macro cristalinas de color amarillo a blanco y rojizas, dolomitizadas y silicificadas, que afloran principalmente en la sierrita de Ticul, con un espesor de 350m, en ocasiones con fragmentos de algas, organismos marinos como foraminíferos y de moluscos terrestres.

Por un lado, las muestras de caliza amarillentas (M20, M25, M29 de Kabah y M51 de Sayil) están compuestas por matriz micrítica-arcillosa, con poca presencia de fósiles. Mientras que, las brechas calcáreas con matriz rojiza (M21, M22, M23, M32, M40 de Kabah y M44, M53, M66, M71, M73 de Sayil) están conformadas por matriz peloidal oxidada con clastos de calizas sin la suficiente presencia de fósiles tanto en la matriz como en los clastos para poder relacionarlas a alguna formación descrita en la península de Yucatán.

Es importante mencionar que, algunas rocas del núcleo del friso 4 del Gran Palacio de Sayil y de afloramientos cercanos a éste, presentan contenido faunístico, ya sea en la matriz de las calizas (M52, M62), o en los clastos de las brechas (M50, M60) principalmente foraminíferos bentónicos, sin embargo, debido a que los fósiles observados poseen gran rango estratigráfico, se cree que pertenecen a la misma formación no diferenciada del Paleoceno-Eoceno reportada por García Gil y Graniel Castro (2010).

Conforme a los análisis de facies realizados por medio de la petrografía, se identificaron tres zonas de depósito de las rocas de los núcleos de los palacios, directamente de éstos y de afloramientos cercanos a ellos: rampa interna, media y profunda. Cabe resaltar, que las brechas pertenecen exclusivamente a la rampa media y las calizas a la rampa interna y profunda, pues en el ambiente de rampa media es característico encontrar material producto de desprendimientos, además es un ambiente de alta energía dominado por el oleaje de tormenta que ocasiona fragmentos de fósiles y de roca; mientras que, en la rampa interna profunda es común encontrar calizas y margas con presencia de granos esqueléticos (Flügel, 2010).

De acuerdo con lo anterior, se llega a la conclusión de que las rocas presentes en las zonas arqueológicas son las que utilizaron los mayas para erigir dichos palacios; esto también se ha

documentado en diversas zonas arqueológicas de Campeche: Río Bec y Calakmul; así como en Yucatán en Ek Balam (Alonso Olvera et al., 2017; García-Solís et al., 2023; Straulino Mainou, 2010).

6.2 Litología y su deterioro

De acuerdo con los mapeos litológicos y su relación con el registro de deterioros realizados en las fachadas del Codz Pop (E2C6) y del Gran Palacio de Sayil (E2B1), se observó que ciertos deterioros presentaban preferencia por determinada textura carbonatada.

De manera general, se observó que las calizas presentan desprendimientos y fracturas en piedra; mientras que, las brechas calcáreas se caracterizan por la pérdida diferencial y de material. Las sales se encuentran en ambas litologías.

De acuerdo con su textura, las calizas wackestone son afectadas por la erosión y fracturas. Por otro lado, las brechas calcáreas de textura floatstone y rudstone se destacan por la pérdida diferencial por vetas, detritos, nódulos huecos y de hierro.

A continuación, en la Tabla 19 se muestran cuantitativamente los deterioros originados por las características intrínsecas de las rocas y los que son causados por el clima de la región. De igual manera se presentan las rocas predominantes en cada muro y friso de la fachada oeste del Codz Pop (E2C5) y en los frisos de la fachada sur del Gran Palacio de Sayil (E2B1).

Tabla 19. Porcentaje de litologías y deterioros presentes en los muros y frisos del Codz Pop (E2C6) y del Gran Palacio de Sayil (E2B1).

			Codz Pop (E2C6)							Gran Palacio de Sayil (E2B1)			
	Muro/ Friso		FRISO 2	MURO 1	MURO 2	MURO 3	MURO 4	MURO 5	MURO 6	FRISO 1	FRISO 2	FRISO 3	FRISO 4
Roca/ textura	Caliza	<i>Wackestone</i>	39%	65%	38%	51%	46%	56%	49%	58%	60%	64%	66%
	Brecha calcárea	<i>Floatstone</i>	35%	28%	13%	18%	38%	27%	35%	19%	23%	19%	18%
		<i>Rudstone</i>	25%	7%	48%	30%	15%	17%	15%	23%	14%	17%	15%
			100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Forma en que el deterioro se presenta	Pérdida de material	<i>Delaminación</i>	27%	13%	1%	4%	13%			2%	3%		
		<i>Erosión</i>	100%	9%	36%	15%	21%			25%	16%	29%	
	(Pérdida diferencial)	<i>Nódulos Fe</i>		3%	6%	1%	1%			5%	19%	19%	16%
		<i>Nódulos (huecos)</i>	27%	5%	3%	3%	2%	30%		10%	19%	5%	6%
		<i>Vetas</i>	18%	13%	10%	3%	5%	53%		30%	19%	21%	13%
		<i>Detritos</i>						5%			9%		
		<i>Helicoidal</i>								10%	38%		13%
	Desprendimientos	<i>Pulverulencia</i>		26%							6%		
		<i>Disgregación</i>		22%	4%								3%
	Fracturas en piedra	<i>Grietas</i>			3%	6%				10%		7%	3%
		<i>Fisuras</i>			4%	3%	3%						
		<i>Fracturas</i>		7%	33%	66%	69%			10%		16%	13%
	Sales	<i>Velos</i>	27%	2%									
			100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Las calizas estudiadas en los trabajos de Straulino-Mainou (2010, 2012) y García-Solís et al. (2023) al sureste de Campeche, presentan deterioros similares a los de estas fachadas, pues los autores registraron principalmente pérdida de material por nódulos (huecos) y disgregación, si bien pertenecen a una formación geológica diferente (Formación Icaiché del Paleoceno), el tipo de material es similar (calizas con matriz micrítica y componentes esqueléticos y no esqueléticos). Las causas de este deterioro se deben a la porosidad (>10%), al tamaño y estructura de la micrita, así como la heterogeneidad de los componentes, haciendo que tenga una amplia superficie para que los agentes de deterioro actúen. Por otro lado, los autores concluyen que las rocas que presentan menos deterioro exhiben una estructura más cristalina lo que las hace más resistentes al intemperismo.

Asimismo, se ha registrado que la erosión en calizas de Italia y Portugal tiene sus causas por la acción de la intemperie, escurrimientos de caída de agua, porosidad (distribución del tamaño de los poros, forma, conexión entre ellos), así como por la composición heterogénea intrínseca de la roca. De igual manera, se ha documentado, que las calizas con esparita están sujetas a una descomposición más lenta que las que poseen matriz de micrita. La erosión diferencial, es consecuencia de las características texturales de las rocas, principalmente debido a la presencia de los litoclastos, lo que las hace más susceptibles (Alves et al., 2021; Bonomo et al., 2020; La Russa et al., 2015; Sena da Fonseca et al., 2021)

Las grietas y fracturas son ocasionadas principalmente por la distribución espacial de los poros a una orientación preferida de los componentes, así como la cristalización y recristalización de las sales dentro de estos (Alves et al., 2021; Siegesmund et al., 1996).

Con la información anterior, se confirma la hipótesis de que diversas texturas tienden a mostrar preferencia por algún tipo de deterioro: por un lado, las calizas de textura wackestone poseen mayor cantidad de mosaicos con grietas y fracturas, mientras que las brechas calcáreas presentan erosión (floatstones), así como disgregación y pérdida diferencial tanto de nódulos (huecos), como nódulos de hierro, vetas y detritos (rudstones).

Si bien, la roca predominante es la caliza de textura wackestone, las brechas calcáreas (floatstone y rudstone), debido a su composición y estructura interna, son las que presentan mayores problemas de deterioro, ya que, al estar compuestas por matriz y clastos de diferentes tamaños, estos tienden a disgregarse y desprenderse, lo que ocasiona una pérdida significativa del material. Asimismo, se observó que estos tipos de texturas se encuentran principalmente en los módulos del mosaico de grandes dimensiones o monolíticos, como en las narices de los mascarones del Codz Pop (E2C6) y en las columnas y jambas centrales del Gran Palacio de Sayil (E2B1), lo que puede tener efectos en la estabilidad de los mosaicos.

6.3 Propiedades petrofísicas de las rocas carbonatadas

Se determinaron seis propiedades físicas a las muestras de estudio por medio de ensayos en laboratorio, para evaluar su comportamiento ante determinadas condiciones, como absorción capilar, exposición a temperaturas, contacto con soluciones salinas y esfuerzos compresivos. La respuesta de las rocas ante tales análisis está condicionada por su composición química y

mineral, así como por la presencia de espacios vacíos ocasionados por diagénesis y sus propiedades mecánicas.

La porosidad de las rocas es uno de los parámetros más importantes que intervienen en el proceso de degradación de los materiales, pues se relaciona directamente con la deformación de la roca y es inversamente proporcional a la resistencia y densidad (Galván Ceballos & Restrepo, 2016; Rocha-Vargas et al., 2019)

De las muestras analizadas de Kabah (E2C6), se observa que las rocas que poseen mayor porosidad, catalogadas como gran espacio poroso, de acuerdo con la clasificación de Moos y Quervain (1948), son las brechas calcáreas representadas por las texturas floatstone y packstone con valores superiores al 20%, lo que facilita el paso del agua y del ácido carbónico. Del mismo modo esta propiedad se ve reflejada en la densidad aparente, la cual tiene en cuenta la presencia de los poros de un material, pues poseen los valores más bajos registrados para este sitio. Seguido a esto, la categoría más abundante es la nombrada como muy porosa, que involucra brechas y calizas de textura mudstone, wackestone, floatstone y rudstone, lo que indica que las rocas de esta formación presentan porosidad primaria, la cual se desarrolló durante la génesis de la roca. Además, la muestra M40 se clasificó como significativamente porosa, destacando que dicha muestra es la única que proviene de un afloramiento cercano y no del núcleo de los palacios como las anteriores; y la caliza cristalina (M20) se catalogó como ligeramente porosa, debido a que se encuentra diagenetizada.

Por otro lado, Sayil (E2B1) muestra un comportamiento diferente a Kabah, pues las muestras que se clasificaron como con gran espacio poroso no sólo son brechas, sino que existen calizas de textura mudstone, con valores mayores al 20%. Al igual que en Kabah, la variedad muy porosa es la predominante, sin embargo, en esta clase, se tiene mayor presencia de calizas de textura mudstone que las brechas de textura floatstone. Asimismo, están presentes las categorías de significativamente y ligeramente porosas, siendo las texturas floatstones las que presentan menor porosidad, con valores menores a 3%, debido a que se encuentran recrystalizadas.

Las variaciones en los valores de porosidad de las muestras están controladas por su ambiente de depósito, así como por el tipo de matriz que contienen. Según lo reportado por Siegesmund y Snethlage (2011) las calizas más porosas son las formadas en ambientes marinos durante el Paleógeno hasta la actualidad, y por ende son más susceptibles al intemperismo y al deterioro. Dicha porosidad puede alcanzar hasta el 50%, sin embargo, normalmente oscilan entre rangos de 10-30%.

La cantidad de poros, así como el grado de conexión entre ellos, favorecen la descomposición y desintegración de la roca, pues de estas características depende su comportamiento frente a diversos factores. Se ha documentado que las rocas más porosas representan valores de absorción y saturación más altos tanto de agua y sales como de contaminantes atmosféricos; e inclusive los espacios vacíos promueven la colonización biológica, ya que en algunos casos se han detectado microorganismos dentro de los poros, al ser los lugares con mayor humedad (Alves et al., 2021; Ortiz et al., 1995; Silva et al., 2019).

Es bien sabido que el agua es el principal agente de deterioro que contribuye a la degradación del patrimonio cultural, pues interviene en las reacciones químicas de meteorización, disminuye la resistencia mecánica de la roca y favorece la colonización biológica (Çelik & Sert, 2021; Silva et al., 2019).

La absorción de agua de la roca por capilaridad se cuantifica con el coeficiente de absorción capilar (CAC) (Benavente et al., 2004).

De acuerdo, con el CAC las rocas de ambas fachadas se agruparon en baja, media y alta absorción (Tabla 20), donde se aprecia que las brechas que no han sufrido procesos diagenéticos (como la recristalización), son las que presentan mayor capacidad de succión capilar (M21), además influye directamente la porosidad, el tipo de matriz y la poca consolidación de los clastos, mientras que las brechas ya sea parcial (M53) o totalmente (M50) recristalizadas presentaron menor absorción, debido a que la matriz se encuentra cementada. Por otra parte, se observa que las calizas poseen un amplio rango de succión capilar (0.032 a $0.005 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$), dependiendo principalmente de la porosidad y al acomodo de sus componentes.

Tabla 20. Relación del CAC y la porosidad de las calizas y brechas de las fachadas.

	Muestra	Tipo de roca	Coeficiente de absorción capilar ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$)	Porosidad	
Kabah	M21	Brecha (rudstone)	0.051	18.86	Alta absorción
	M51	Caliza (mudstone)	0.032	18.88	
Sayil	M55	Caliza (mudstone)	0.012	17.9	Media absorción
	M54	Caliza (wackestone)	0.011	12.4	
	M53	Brecha (floatstone)	0.006	19.03	Baja absorción
	M43	Caliza (mudstone)	0.007	10.86	
	M52	Caliza (wackestone)	0.005	8.84	
	M50	Brecha (floatstone)	0.002	2.57	

Como se observa en la gráfica (Figura 54) que relaciona la porosidad con el CAC, a menor porosidad menor será su capacidad de absorber agua. Está bien documentado que la estrecha relación entre la absorción por capilaridad que una roca puede adquirir está íntimamente relacionada a la porosidad abierta o conectada, por consiguiente, a mayor porosidad, mayor será la absorción de agua en la roca y menor su resistencia físico-mecánica (Çelik & Sert, 2021; Rocha-Vargas et al., 2019; Thomas et al., 2009).

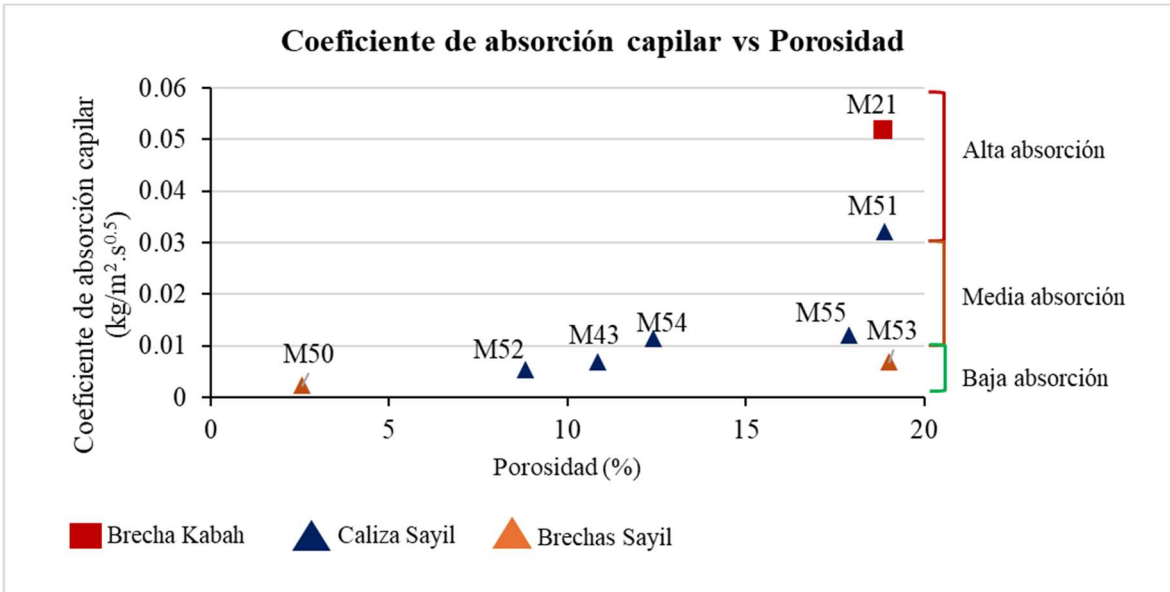


Figura 54. Gráfica que relaciona el coeficiente de absorción capilar contra la porosidad.

De igual manera, la elevada porosidad controla el transporte de soluciones salinas a través de la roca que a su vez está ligada a la absorción capilar de agua (Kamh et al., 2017).

De las muestras analizadas en la prueba de resistencia a la cristalización de sales, tres de ellas (dos calizas y una brecha calcárea) (Figura 55) muestran aumento de peso en la duración del ensayo, mientras que la brecha restante muestra pérdida de éste.

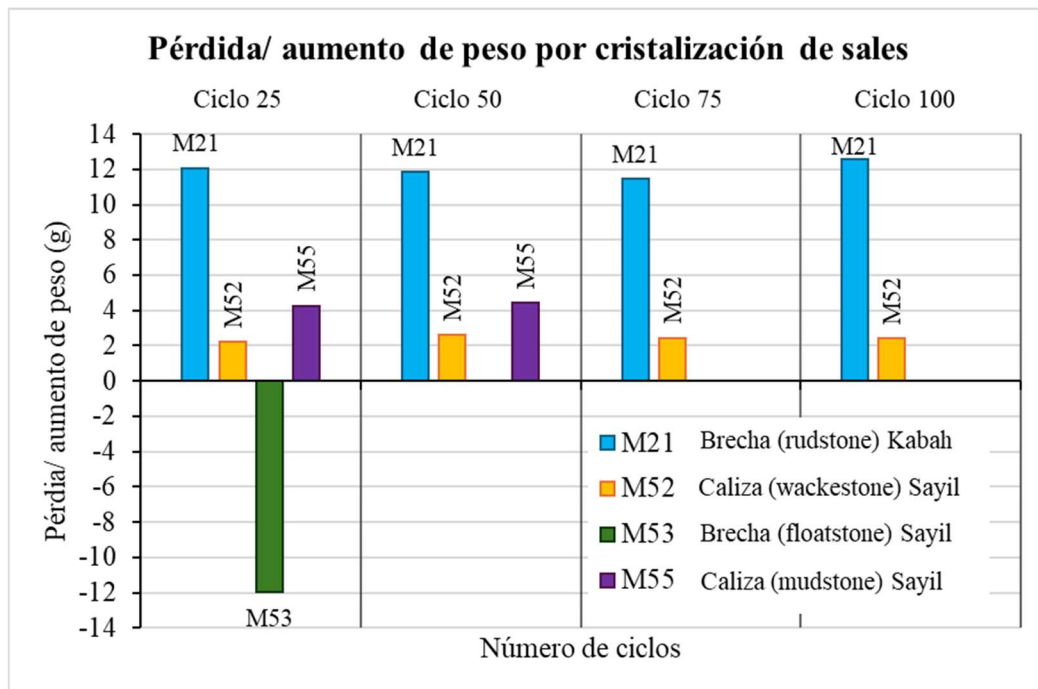


Figura 55. Pérdida y aumento de peso de las calizas y brechas debido a la interacción con soluciones salinas.

El aumento de peso es debido a la acumulación de sales dentro de los poros y a la retención de agua del material (López-Doncel et al., 2016; Salvini et al., 2022). Al respecto, Angeli et al. (2007), afirmaron que el daño ocasionado por la cristalización de las sales se produce en tres etapas: 1) debido a la adición de sales en los poros, el peso aumenta y, en consecuencia, su porosidad se reduce; 2) después de rellenar los poros, el peso de las muestras disminuye ligeramente; 3) esta etapa comienza cuando la absorción de sal se vuelve insignificante en comparación con la pérdida de material, pues se da el crecimiento de cristales de sal dentro de los poros y ejerce una presión en el espacio confinado ocasionando grietas que a su vez crean nuevos poros y conexiones entre ellos, inclusive puede ocasionar la destrucción total, este fenómeno es una de las principales causas de pérdida de la arquitectura histórica alrededor de todo el mundo. El efecto de la sal está relacionado con la porosidad, la distribución del tamaño de los poros y la presencia de agua en cualquier forma y, por lo tanto, de las condiciones climáticas de la región que conducen a ciclos constantes de cristalización-disolución (La Russa et al., 2015; López-Doncel et al., 2016; Oguchi & Yu, 2021; Rothert et al., 2007; Sousa et al., 2021).

Está documentado que, la presencia de las sales en las rocas suscita daños estructurales y la pérdida de material derivada de la ocurrencia de ciertos deterioros entre los que se encuentran la erosión, exfoliación, alveolización, delaminación, velos, eflorescencias y subeflorescencias (Buj et al., 2010; Kamh et al., 2017; Oguchi & Yu, 2021).

Asimismo, se esperaba que, al graficar los valores de porosidad, así como el porcentaje de matriz contra los ciclos salinos, se obtuviera una relación lineal que comprobara la estrecha relación entre ambos parámetros. Sin embargo, si sólo se toman en cuenta las muestras M53 y M55, es decir, las muestras que llegaron a la destrucción por la solución salina, se tiene una perfecta relación entre dichos parámetros (Figura 56).

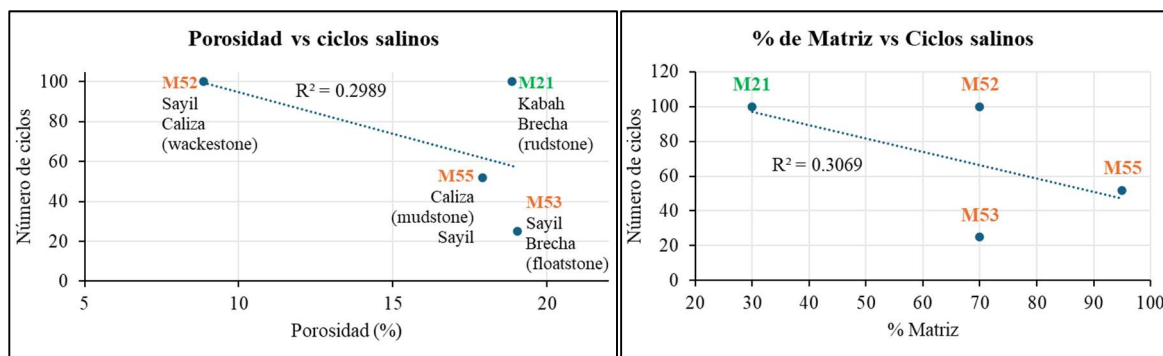


Figura 56. Gráficas que muestran la relación entre el número de ciclos salinos contra la porosidad y el porcentaje de matriz de las muestras analizadas.

Debido a lo anterior, se llegó a la conclusión de que para que las sales causen un deterioro acelerado, las muestras deben tener valores altos de porosidad, así como del porcentaje de matriz, ya sea en las calizas y en las brechas. Pues las muestras que mostraron mayor deterioro son la M53 y la M55, donde ambas poseen porosidades superiores a 17% y un porcentaje de matriz superior al 70%. En cambio, si sólo se tiene un valor alto de un parámetro, ya sea porosidad o porcentaje de matriz, el deterioro existe, pero es más bien un proceso lento. Se

concluye que, si se tienen valores altos tanto de porosidad como porcentaje de matriz el deterioro se acelera y se ve reflejado en el número de ciclos que llevaron a la destrucción total de la roca, en calizas mediante una grieta principal y en las brechas calcáreas por pérdida diferencial de clastos y de matriz (Tabla 21).

Tabla 21. Efectos de las sales con respecto a la porosidad y al porcentaje de matriz.

Muestra	Porosidad (%)	% Matriz	# Ciclos	Efecto de las sales
M21. Brecha (rudstone)	18.86	30	100	Proceso lento
M52. Caliza (wackestone)	8.84	70	100	Proceso lento
M53. Brecha (floatstone)	19.03	70	25	Proceso rápido
M55. Caliza (mudstone)	17.90	95	52	Proceso rápido

Como ya se mencionó en los resultados de la resistencia a la de cristalización de sales, las calizas presentan deterioros como grietas y delaminación, mientras que las brechas muestran erosión por pérdida diferencial tanto de clastos como de la matriz; en ambos tipos de roca las sales se muestran como eflorescencias en su superficie. Según Salvini et al. (2022), dichas eflorescencias pueden asociarse a dos mecanismos de deterioro en las rocas carbonatadas: 1) desarrollo de microgrietas con formación de fisuras que modifican la estructura interna de los poros, afectando significativamente las propiedades mecánicas, y localmente haciendo que la superficie se desprenda, y 2) la descohesión de la roca con el desprendimiento de los granos más grandes, como los clastos, y la pérdida progresiva de la matriz.

Asimismo, en calizas de Sayil (Friso 4), se observó pérdida diferencial (detritos y helicoidal) (Figura 57a y 57b), un tipo de deterioro ocasionado por las sales, que en el trabajo de Rothert et al. (2007) lo denominaron relieve (Figura 70c), el cual consiste en 5 fases según el modelo de Vannucci et al. (1994) y Fitzner et al. (1996) como se observa en la Figura 58. En la fase 1, se forma una costra superficial por la reprecipitación de la calcita disuelta, en la fase 2 y 3, la superficie de la roca comienza a desgastarse por la formación de cavidades vecinas (relieve inicial). Las cavidades se deben a la formación de fisuras y/o pérdidas parciales de la corteza debido a las tensiones mecánicas provocadas por la cristalización de la sal. Una mayor acumulación de sal detrás de la corteza provoca el desprendimiento del material de piedra en forma de desintegración granular y *flaking* dentro de las cavidades. En la fase 4, comienza el relieve avanzado, un estado en el que la pérdida de material y la formación de huecos o alveolos es muy pronunciada, incluso pueden conectarse entre ellos. Finalmente, en la fase 5, los huecos están totalmente erosionados de modo que se desarrolla una superficie más o menos lisa y los bordes de los bloques se redondean.

Debido al modelo mencionado con anterioridad, las calizas con este tipo de deterioro en Sayil, se localizan en la fase 3 y 4, ya que se observó la conexión entre algunos huecos.

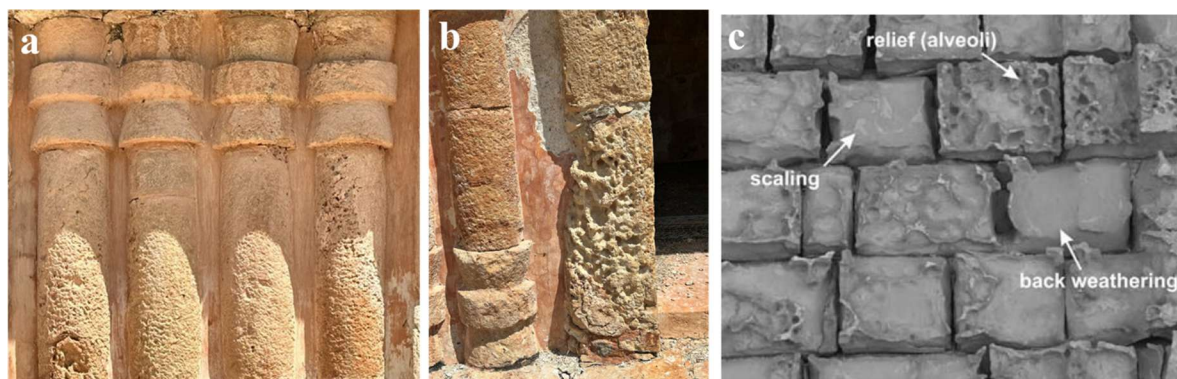


Figura 57. Pérdida diferencial por detritos y helicoidal en a) junquillos y b) jamba del Friso 4. C) Deterioros observados en la Caliza Globigerina en la fachada sur de la Iglesia de Santa Marija Ta' Cwerra, Malta. Tomada de Rothert et al. (2007).

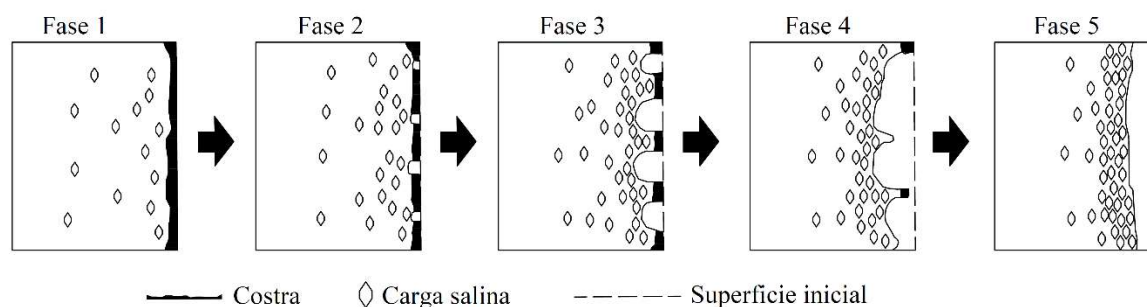


Figura 58. Representación del desarrollo del relieve, modelo propuesto por Vannucci et al. (1994) y Fitzner et al. (1996), digitalizado de Rothert et al. (2007).

Conjuntamente, la resistencia de las rocas está influenciada por su capacidad de soportar fuerzas sin que se ocasionen rupturas o grietas en éstas, que, están determinadas por su composición, tipos de grano y poros, así como de su capacidad de absorber agua (Abd El Aal et al., 2023; Siegesmund & Snethlage, 2011).

El valor medio de compresión de las muestras analizadas es de 34 MPa, con variación de 24 a 53 MPa, de las cuales se pueden clasificar como rocas débiles y de dureza media según la UCS (Unconfined Compression Strength), siendo la más débil la brecha de textura rudstone (M21), seguida de la caliza con textura mudstone (M54) y la de mayor resistencia la brecha de textura floatstone (M50), debido a que se encuentra parcialmente recrystallizada.

De acuerdo, con las gráficas (Figura 59) donde se relaciona al valor del esfuerzo compresivo con la porosidad y el coeficiente de absorción capilar, el coeficiente de determinación R^2 indica que la resistencia de las rocas está fuertemente ligada a la porosidad y a la capacidad de absorción de agua. Ya que, las rocas con mayor porosidad y mayor coeficiente de absorción de agua poseen menor resistencia a la compresión. Lo anterior ha sido documentado de igual manera en calizas de Colombia, donde se observó que a mayor porosidad de la roca se reduce su resistencia (Galván Ceballos & Restrepo, 2016). Mientras que, Rodríguez Pérez et al. (2021)

afirman que los altos valores de coeficiente de absorción se asocian a la alta porosidad del material y por ende un aumento en el deterioro.

Como lo indicaron Peng & Zhang (2007), la porosidad está controlada por la forma, tamaño y arreglo de los granos de la roca, así como de los procesos diagenéticos (compactación, cementación, cristalización) y químicos (disolución, precipitación, cambios en la mineralogía).

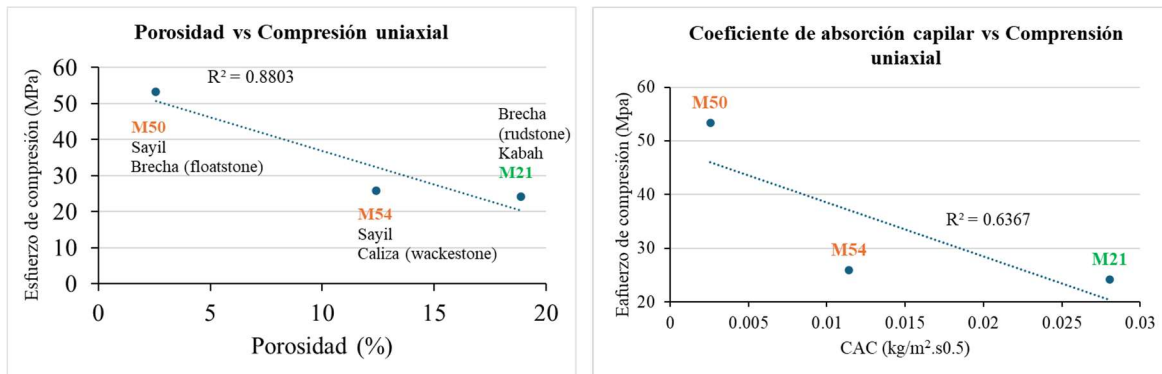


Figura 59. Relación de los valores de compresión uniaxial contra la porosidad y el coeficiente de absorción capilar.

Igualmente, existen estudios donde se relaciona la resistencia de las rocas carbonatadas con el contenido de matriz (micrita) y de los componentes presentes (esqueletales y no esqueletales), pues el porcentaje de estos parámetros parece controlar el comportamiento mecánico de las calizas de Pakistán: mientras mayor contenido de micrita tenga la roca mayor será la resistencia; por el contrario, a mayor proporción de componentes la resistencia será menor (Akram et al., 2017).

A consecuencia de esto, se realizaron las comparaciones en las muestras de estudio (Figura 60), para tratar de identificar si el contenido de matriz y componentes juegan un papel importante en la resistencia mecánica de dichas rocas, dando como resultado que ninguno de estos parámetros influye en su capacidad de resistencia.

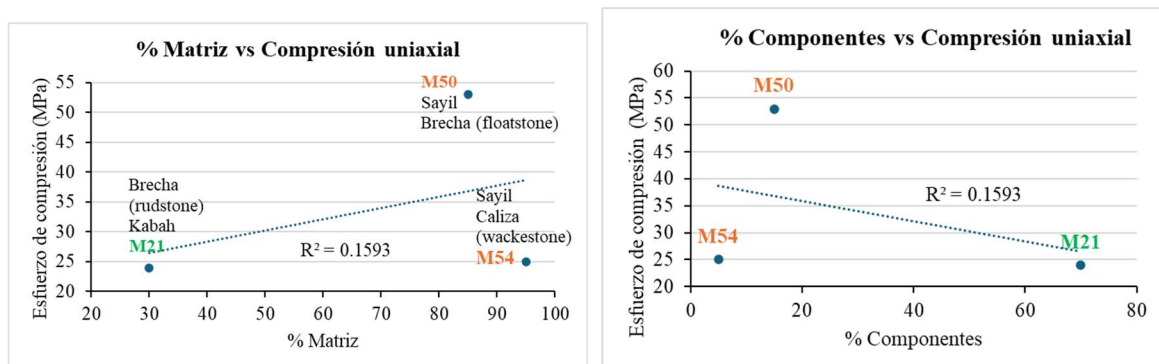


Figura 60. Relación de los valores de compresión uniaxial el porcentaje de matriz y componentes de las rocas.

Se concluye que la disminución en la resistencia a la compresión de estas calizas y brechas está ligada principalmente a la porosidad y por ende a su capacidad de absorber agua. Y, mientras las rocas no se encuentren afectadas por procesos de diagénesis (recristalización), las calizas son más resistentes a la compresión simple que las brechas.

La resistencia de las rocas también está condicionada por los ciclos de expansión y contracción ocasionados por las variaciones de temperatura que sufren a lo largo del día. El diferencial de expansión térmica entre los minerales que constituyen la roca hace que se aumente la intensidad del estrés en contacto con los granos, que a su vez promueve la formación de grietas, fracturas y la disgregación; este proceso se acelera especialmente en presencia del agua (Stakhri et al., 2021; Villarraga et al., 2018)

La expansión térmica de un material rocoso está condicionada por la composición mineral de éste, la presencia de ciclos de expansión y contracción ocasionados por temperaturas ambientales entre 10° y 50°C, resultan en la acumulación de deformaciones que afectan las propiedades mecánicas de las rocas (Siegesmund & Dürrast, 2014; Villarraga et al., 2018).

La expansión térmica registró valores interesantes, pues la expansión máxima en las brechas calcáreas es de 0.70 mm/m, mientras que para las calizas incluso sobrepasa el mm/m (0.99 a 1.19 mm/m). En cambio, los valores mínimos para las brechas son en promedio -0.49 mm/m y para las calizas de -0.69 mm/m. Con lo anterior, se concluye que la expansión térmica afecta en mayor medida a las calizas que a las brechas calcáreas, pues tanto los valores máximos como mínimos se observaron en las calizas.

La causa del porqué las muestras de caliza mostraron mayores expansiones que las brechas calcáreas se debe principalmente a la predominancia de calcita, la cual es un mineral altamente expansivo. Este comportamiento también ha sido documentado en calizas del Mioceno de Europa Central, que bajo cambios drásticos de temperatura (15°-45°C) las rocas experimentan ciclos de expansión/contracción que causan cambios de tensión que pueden producir deformaciones. Si bien, no se observa a simple vista el desarrollo de fisuras o fracturas en las rocas, se considera que la degradación de éstas se debe esencialmente a procesos que actúan a microescala; no obstante, después de cierto período de tiempo y ciclos pueden aparecer microgrietas aisladas, llegando a ocasionar grietas y fracturas (Pápay & Török, 2017; Sevilla et al., 1995; Villarraga et al., 2018).

Finalmente, como se mencionó en el capítulo 5 las muestras no manifestaron expansión hídrica, una de las razones de este suceso es debido a la ausencia de arcillas, ya que comúnmente se ha relacionado la expansión hídrica en las calizas con la presencia de minerales arcillosos (Aly et al., 2018). Sin embargo, Wedekind et al. (2013), mencionan que este fenómeno no sólo se puede atribuir únicamente a la presencia de arcillas, sino que también la distribución y el radio de poros desempeñan un papel importante, especialmente la presencia de microporos (poros con diámetros <0.1 µm), no sólo por la presión de separación (*disjoining pressure*), sino porque, el agua de los poros queda atrapada y no puede ser drenada fuera de la roca, lo que contribuye a la disolución de ciertos minerales (Ruedrich et al., 2011) Por lo anterior, se concluye que las rocas de ambas fachadas son pobres en arcillas y no poseen gran cantidad de microporos.

6.4 La influencia de las condiciones ambientales en el deterioro

Las zonas arqueológicas de Kabah y Sayil se localizan en un clima cálido subhúmedo, con valores de humedad superiores al 50% y temperaturas entre 12 y 45°C durante el año, así como precipitaciones de 1000 a 1200 mm anuales. Además, la región es afectada regularmente por ciclones y huracanes (INEGI, 2016b).

En el Codz Pop (E2C6) en agosto de 2022, en la época de lluvias de la región, que ocasiona los valores más altos de humedad ambiental, se realizó un estudio termográfico a tres horarios diferentes: 1) 8:00 a 10:00 am, 2) 12:00 a 14:00 pm y 3) 18:00 a 17:00 pm; con la finalidad de detectar anomalías térmicas en los mosaicos de dicho edificio (Proyecto Conservación Ruta Puuc, 2023).

Este estudio, dio como resultado mapas de distribución de temperaturas, las cuales están estrechamente relacionadas a las condiciones microambientales del lugar y a las propiedades intrínsecas de las rocas. De acuerdo con lo anterior, los autores afirmaron que las mayores temperaturas (~52°C) registradas suceden alrededor de las 18:00 horas, momento en el que los rayos solares inciden de manera perpendicular sobre esta fachada; mientras que las temperaturas más bajas son en la mañana (8:00 horas), al no sobrepasar los 30°C, cuando la fachada oeste aún no recibe luz solar directamente. Por otro lado, en la tarde (12:00-14:00 horas), las temperaturas sobrepasan los 40°C (Proyecto Conservación Ruta Puuc, 2023).

Finalmente, concluyen que la distribución de temperaturas está relacionada con el horario y el ángulo de incidencia de la luz del sol; además de su relación con la superficie de cada módulo del mosaico y su capacidad de retener humedad, pues los elementos como las narices (mayor área superficial) son los que presentan las temperaturas más bajas. Mientras que, las temperaturas elevadas se registraron en zonas recubiertas con mortero. Además, si existe la presencia de biopátinas sobre la superficie rocosa las temperaturas se elevan en comparación de un mosaico libre de pátinas. La presencia de grietas ayuda a filtrar la humedad, ocasionando temperaturas bajas en estos elementos (Proyecto Conservación Ruta Puuc, 2023).

Además del estudio mencionado con anterioridad, se registraron valores de humedad relativa, temperatura y punto de condensación, durante octubre de 2022 a abril de 2023 con la utilización de *data-logger*. Se registraron los valores más altos de temperatura en los meses de marzo a abril (>45°C), mientras que la humedad, en la noche oscila entre 80-95% y en el día entre 15-35%, dándose la elevada humedad en los meses de octubre y noviembre (Proyecto Conservación Ruta Puuc, 2023).

En cambio, en la fachada sur del Gran Palacio de Sayil (E2B1) se efectuó un análisis de humedad relativa, temperatura y punto de condensación, durante junio de 2023 a junio de 2024 con la utilización de *data-logger*. Se registraron las mayores temperaturas durante los meses de junio y julio (>30°C) durante el día. Mientras que los valores de humedad durante la noche oscilan entre 75-90%, y durante el día los valores se encuentran entre 25-50%, es en octubre cuando la humedad alcanza los picos más altos registrados (Proyecto Conservación Ruta Puuc, 2024).

La presencia de la humedad es uno de los factores que intervienen en la disgregación de los materiales heterogéneos, como los componentes no tienen la misma solubilidad, el agua penetra

en diferentes puntos y distintas profundidades, eliminando a los componentes más solubles, lo que ocasiona pérdida de matriz y/o componentes (como los clastos), y su resistencia mecánica disminuye (Sanjuán Carracedo, 2013).

La capacidad de absorber humedad de un material está condicionada por la porosidad elevada, que permite la movilización y depósito de sales en los poros y grietas, al igual que incrementa la proliferación de organismos, entre los que se encuentran las algas verdes, musgos y bacterias (Alonso et al., 2006; Oguchi & Yu, 2021; Rocha-Vargas et al., 2019).

La humedad elevada favorece la acumulación de agua en los poros de la roca, acelerando procesos intrínsecos como la disolución química, cuando la humedad fluctúa durante periodos específicos, especialmente con descensos drásticos se producen ciclos de humectación y secado, provocando un estrés mecánico en la composición de las calizas, esto promueve además fracturas y grietas. Aunque no son visibles a simple vista estas oscilaciones tienen como consecuencia ciclos salinos que se favorecen conforme el tiempo (Proyecto Conservación Ruta Puuc, 2024).

Por otro lado, la principal fuente de dilatación térmica en las rocas de construcción es la radiación solar y la ubicación de las fachadas frente a este fenómeno. La orientación geográfica de las fachadas influye en la insolación y en la retención de humedad, además en los elementos singulares (zonas labradas, cornisas, dinteles) al aumentar la superficie expuesta se retiene más humedad y se modifica la circulación de agua de escorrentía (Alonso et al., 2006; Sevilla et al., 1995).

La fachada oeste del Codz Pop (E2C6), recibe la luz solar a partir del mediodía, por lo que en la mañana se tienen humedades elevadas (>60%) y temperaturas de 23° a 29°C, mientras que después de la 1 de la tarde el valor de humedad disminuye y la temperatura aumenta, inclusive se puede alcanzar superiores a los 45°C, principalmente en verano¹.

Por otro lado, la fachada sur del Gran Palacio de Sayil (E2B1), recibe luz solar gran parte del día, y a partir de las 4 pm comienza a recibir sombra, por lo que en las mañanas la humedad es elevada (>50%) y conforme pasa el día va disminuyendo, mientras que, la temperatura aumenta gradualmente conforme se eleva el sol (de 25° a 40°C)¹.

Las oscilaciones de temperatura durante el día y la noche, así como en los periodos de cambios estacionales, intensifican mecanismos de expansión y contracción térmica promoviendo grietas debido a las tensiones que se acumulan sobre las rocas (Proyecto Conservación Ruta Puuc, 2023, 2024).

El deterioro ocasionado por los cambios de temperatura depende de los parámetros térmicos (conductividad, difusividad y calor específico), de la porosidad y la mineralogía (Andriani & Germinario, 2014).

¹ Datos obtenidos con aparatos de medición puntual (termómetro FLUKE 62 MAX e higrómetro DURO 650195 OviBell) a algunos sillares con fácil acceso de ambas fachadas en las dos últimas salidas a campo (febrero y junio). Las mediciones se realizaron alrededor de las 9 am y la 1 pm.

Las rocas carbonatadas poseen gran conductividad térmica. Esta característica provoca que, en constantes ciclos de expansión y contracción, las rocas sufran tensiones diferenciales debidas al cambio de volumen. Las tensiones internas resultantes son capaces de producir microfisuras y descohesiones en el material rocoso (Sanjuán Carracedo, 2013).

Además, las discontinuidades, fracturas, estilolitas, laminaciones y planos de estratificación propios de la roca, corresponden a zonas de debilidad mecánica, que, gracias a los cambios de volumen ocasionados por el aumento de temperatura, hacen que se acelere el deterioro (Andriani & Germinario, 2014).

La composición mineralógica juega un papel importante en el comportamiento de las rocas ante el daño térmico, además de las propiedades intrínsecas como la textura, porosidad, el tamaño y orientación de los cristales y granos (Vigroux et al., 2021; Yavuz et al., 2010).

Es importante mencionar que, la combinación de calentamiento y humectación puede provocar la expansión de ciertas sales en los poros, como las sales tienen coeficientes de expansión volumétrica más altos que los minerales en la roca, crean presiones suficientes para provocar rupturas (Kamh et al., 2017; Oguchi & Yu, 2021; Siegesmund & Snethlage, 2011).

6.5 El papel de la geoquímica en el deterioro de los mosaicos

De los resultados de la composición elemental por medio de ICP-OES y FRX, se observa que las muestras, ya sean calizas o brechas, poseen gran contenido de CaO (>85% en peso), asimismo, con el análisis de DRX, se destaca la calcita como la fase mineral mayoritaria, y en algunas se detectó la presencia de cuarzo, caolinita y dolomita.

De las muestras analizadas en FRX e ICP-OES, se observa que en FRX se obtuvieron los óxidos mayores de silicio, aluminio, fierro, calcio y potasio. Mientras que en el ICP-OES todos los óxidos mayores mostraron contenido, salvo en algunas brechas que no se detectó la presencia de óxido de sodio y de fosforo.

Como se mencionó en el apartado de metodología, el contenido de óxido de silicio en el ICP-OES debido a la digestión se pudo evaporar cierto contenido de éste, por lo que la finalidad de los análisis de FRX fue complementar este valor, así pues, se comprobó que el contenido de silicio para las brechas oscila entre 2 a 3% en peso.

Por otro lado, la presencia de elementos traza se amplió con la FRX, pues con esta técnica se reconocieron nueve elementos más que los analizados en el ICP-OES, entre ellos el As, Sr, Rb, Y, Zr, Nb, Pd, Ta y Th. Como mencionó Graf (1960), la concentración de elementos minoritarios y traza en carbonatos, tales como Na, K, V, Mn, Cu, Zn, Sr y Ba varía en función de su concentración en minerales de carbonato poligénicos, así como la presencia de minerales detríticos y sus productos de alteración, el aporte de materia orgánica, y las cantidades adsorbidas en todos estos minerales.

Cabe resaltar que, las brechas de los palacios, así como del afloramiento de Santa Elena presentan valores promedio ligeramente altos de Al_2O_3 y Fe_2O_3 que las calizas (Tabla 22). El aluminio, podría estar relacionado con la presencia de material terrígeno, ya que en una muestra de Sayil se detectó caolinita por medio de DRX. Por otra parte, el hierro podría estar asociado

al soterramiento, ya que, conforme aumenta la profundidad, las condiciones en el medio tienden a ser más anóxicas, lo que hace que los contenidos de Fe aumenten en los fluidos diagenéticos (Warren, 2000). Además, altas concentraciones de V, Ni, Cu y Zn, son indicadoras de condiciones ligeramente reductoras (Graf, 1960).

Tabla 22. Promedio de elementos mayores obtenidos por ICP-OES y FRX.

PROMEDIO DE ELEMENTOS MAYORES (% EN PESO)											
	Tipo de roca	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Kabah (E2C6)	Calizas ICP-OES	0.44	0.01	0.31	0.25	0.01	1.22	97.63	0.11	0.02	-
	Brechas ICP-OES	0.82	0.12	4.79	1.42	0.03	1.23	91.21	0.13	0.22	0.03
	Brechas FRX	2.79	-	-	2.76	-	-	94.36	-	0.09	-
Sayil (E2B1)	Calizas ICP-OES	0.31	0.08	3.03	0.80	0.04	0.40	95.18	0.01	0.14	0.02
	Brechas ICP-OES	0.78	0.22	10.28	2.87	0.20	0.87	84.19	0.06	0.48	0.02
	Brechas FRX	3.49	-	-	4.25	-	-	92.03	-	0.23	-
Santa Elena	Brechas ICP-OES	0.66	0.09	3.32	1.19	0.03	5.20	89.26	-	0.22	0.03
	Brechas FRX	2.67	-	-	3.06	0.02	-	94.26	-	-	-

Cada compuesto químico y fase mineralógica presenta distintas susceptibilidades a los agentes externos siendo, en ocasiones, fácilmente solubles o hidrolizables. Por ejemplo, la calcita, se disuelve fácilmente en presencia de contaminantes ácidos (Villar-Rubio *et al.*, 2014). Las brechas calcáreas además de contener calcita poseen óxidos e hidróxidos de hierro, que ocasionan las tonalidades amarillentas de las calizas y rojizas en la matriz de las brechas, que, al estar en contacto con agua, son más propensos a procesos químicos como la disolución, oxidación y lixiviación, que después de determinado periodo de tiempo afecta a la matriz por medio de disgregación y los clastos de las brechas pueden llegar a desprenderse (Alonso *et al.*, 2006; Royo-Ochoa *et al.*, 2010).

Además, Sousa *et al.* (2021) mencionó que la presencia de hierro y arcillas hace que la cristalización de sales sea más efectiva, lo que contribuye a la disgregación y promueve la fisuración.

Por otro lado, el sascab dio como resultado en DRX la presencia mineral de calcita, dolomita y montmorillonita, mientras que Alonso-Olvera (2017) en su análisis de este material sólo detectó la presencia de dolomita en la zona arqueológica de Ek Balam, Por su parte, Sweitz (2012) mencionó que el sascab está compuesto por dolomita, talco y clorita. Si bien, este material está compuesto principalmente por calcita, ha demostrado tener más resistencia ante el intemperismo, según (Lorenzo Mora & Carrascosa Moliner, 2019), la diferencia de comportamiento radica en la forma y tamaño de sus partículas y en cómo estas interactúan con el conglomerante y con los aditivos orgánicos para formar una estructura más compacta y con menor porosidad.

En cambio, el suelo (kancab) está compuesto por calcita, caolinita, goetita, cuarzo, hematita y cloritoide de acuerdo con los resultados de DRX.

Los análisis realizados al suelo fueron con la finalidad de conocer sus componentes y compararlos con la matriz roja de las rocas de los palacios, se concluye que la coloración tanto de esta matriz como del suelo proviene del hierro; en las rocas no se identificó la presencia de minerales ferrosos por medio de DRX, posiblemente debido al límite de detección del equipo, pero en el suelo se encuentra como hematita y goetita.

La coloración a los suelos formados por la meteorización de la caliza en climas templado-húmedos, también ha sido reportada en España, pues se ha afirmado que, cantidades muy pequeñas de hierro son capaces de enmascarar a otros componentes y de otorgar una tonalidad rojiza a estos. Además, se revela el origen de los óxidos de hierro presentes en el suelo de Galicia: son heredados de la caliza, es decir son componentes de este tipo de roca (Taobada Castro et al., 1992, 1999; Taobada Castro & Silva Hermo, 1999).

Conclusiones

La caracterización de análisis de laboratorio, junto con la combinación de trabajo de campo (mapeos litológicos y de deterioro), permitió determinar las causas intrínsecas que causan el deterioro en los mosaicos que recubren la fachada oeste del Codz Pop y la fachada sur del gran palacio de Sayil.

Los mosaicos están compuestos por calizas y brechas calcáreas de edad Paleoceno-Eoceno (66-33 Ma), que muestran deterioros como pérdida de material, desprendimientos y fracturas, debido a sus elevadas porosidades (en promedio 15%), a la diversidad de texturas sedimentarias, a las matrices heterogéneas y al tipo de cementante.

Aunado a lo anterior, las condiciones medio ambientales y geográficas juegan un papel importante en el deterioro de las fachadas, ya a que se encuentran en un clima tropical y reciben gran incidencia de luz solar, lo que promueve la absorción por capilaridad de agua en los poros de las rocas, así como la cristalización de sales y la formación de fisuras debido a los cambios drásticos de temperatura.

De acuerdo con los resultados, en la fachada oeste del Codz Pop (E2C6), se observó que las calizas con textura wackestone presentan deterioros como grietas, fracturas y delaminación. Mientras que, en las brechas calcáreas, específicamente en la textura floatstone, el principal deterioro es la pérdida de material, que se muestra como erosión, y la pérdida diferencial, entre las que se encuentran los nódulos (huecos), nódulos de hierro, vetas y detritos, de igual manera existe disgregación de la roca. Por otro lado, la textura rudstone tiende a mostrar erosión, delaminación y disgregación principalmente en las zonas del mosaico que más sobresalen del muro (por ejemplo, las narices), además, corresponden a aquellas zonas expuestas a la intemperie en mayor medida, debido a los escurrimientos directos del agua pluvial.

La presencia de sales a simple vista se presenta en forma de velos, los cuales se observan en las calizas y brechas calcáreas, sin preferencia por alguna textura, de los muros 1 y 2 del Codz Pop. Sin embargo, se presentan principalmente en los mascarones que están cerca del suelo, debido a la absorción por capilaridad de la humedad del ambiente.

En la fachada sur del Gran Palacio de Sayil (E2B1), se observa que las calizas de textura wackestone, son afectadas por la erosión y pérdida diferencial (helicoidal). En cambio, las brechas calcáreas de textura floatstone se caracterizan por tener nódulos de hierro, nódulos (huecos), y vetas. La textura rudstone es la que posee diversos deterioros detectados, entre los que destacan la pérdida diferencial por nódulos (huecos), nódulos de hierro, vetas y detritos, así como fracturas.

De acuerdo con lo anterior, se comprueba la hipótesis del presente trabajo de que los deterioros están condicionados por la litología como se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23. Relación litología-deterioro y factores que los condicionan.

Tipo de roca	Tipo de deterioro	Factores intrínsecos	Procesos químicos y físicos asociados	Factores ambientales y geográficos
Caliza	-Delaminación -Grietas -Fracturas -Pérdida diferencial (helicoidal)	-Elevada porosidad -Textura -Calcita como mineral altamente expansivo	-Cristalización de sales -Expansión térmica -Capacidad de absorber agua	Escurrimientos de agua Cambios drásticos de temperatura Clima tropical
Brecha calcárea	Pérdida diferencial (nódulos huecos, nódulos de Fe, vetas y detritos)	-Elevada porosidad -Textura -Matriz heterogénea -Clastos mal seleccionados -Contenido de Fe -Porcentaje de matriz y componentes	-Cristalización de sales -Expansión térmica de los clastos -Oxidación y lixiviación de óxidos e hidróxidos de Fe -Capacidad de absorber agua	Ubicación geográfica de las fachadas respecto a la luz solar Precipitaciones Elevada humedad
Ambas litologías	-Erosión -Disgregación -Pulverulencia -Sales	-Elevada porosidad -Textura	-Cristalización de sales -Disolución de calcita -Capacidad de absorber agua	

La presente investigación ofrece desde la perspectiva geológica la causa de algunos deterioros observados en fachadas seleccionadas (E2C6 y E2B1) de la Ruta Puuc, además se expone cómo las condiciones ambientales influyen en éstos, contribuyendo a la comprensión del comportamiento de estas rocas ante el intemperismo, pues brinda a los restauradores, información relevante a considerar en la toma de decisiones al momento de intervenir un bien inmueble.

Además, al encontrarse dichos palacios en la Plataforma de Yucatán y por ende ser las rocas carbonatadas, la principal materia prima que constituyen a estos palacios y a los de las zonas arqueológicas aledañas, se genera un punto del cual partir en cuanto a las propiedades intrínsecas que juegan un papel importante en el deterioro de los mosaicos.

Referencias

- Abd El Aal, A., Abdullah, G. M. S., Radwan, A. E., Ali, S. H., Wahid, A., Shoukat, N., Zakhera, M., & Mofitah, H. (2023). Experimental study of the influence of the degree of saturation on physical and mechanical properties of carbonate rocks in the Jurassic Tuwaiq Mountain Formation (Saudi Arabia). *Geological Journal*, 58(11), 3970–3984. <https://doi.org/10.1002/gj.4830>
- Ahr, W. M. (1973). Carbonate Ramp—Alternative to Shelf Model. *AAPG Bulletin*, 57(9), 1826–1826. <https://doi.org/10.1306/83D910BF-16C7-11D7-8645000102C1865D>
- Akram, M. S., Farooq, S., Naeem, M., & Ghazi, S. (2017). Prediction of mechanical behaviour from mineralogical composition of Sakesar limestone, Central Salt Range, Pakistan. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(2), 601–615. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-1002-3>
- Alfonso López-Doncel, R. (2015). *El rescate del patrimonio cultural pétreo de San Luis Potosí*. <https://www.researchgate.net/publication/306012302>
- Alonso, F. J., Esbert, R. M., Ordaz, J., & Vázquez, P. (2006). Análisis del deterioro en los materiales pétreos de edificación. *Revista Electrónica*, 10.
- Alonso Olvera, A., Pérez, N., Jiménez, A., Ruvalcaba, J. L., Casanova, E., & Torres, J. (2017). *Análisis de los morteros de cal: su tecnología y eficacia en diversas actividades de conservación en la zona arqueológica de Ek Balam*.
- Álvarez Pérez, A., & Plana Llevat, F. (1990). 1990 Cz rocas arquitectura romana. 129–139.
- Alves, C., Figueiredo, C. A. M., Sanjurjo-Sánchez, J., & Hernández, A. C. (2021). Effects of Water on Natural Stone in the Built Environment—A Review. *Geosciences*, 11(11), 459. <https://doi.org/10.3390/geosciences11110459>
- Aly, N., Wangler, T., & Török, Á. (2018). The effect of stylolites on the deterioration of limestone: possible mechanisms of damage evolution. *Environmental Earth Sciences*, 77(16), 1–11. <https://doi.org/10.1007/S12665-018-7746-2/METRICS>
- Andriani, G. F., & Germinario, L. (2014). Thermal decay of carbonate dimension stones: fabric, physical and mechanical changes. *Environmental Earth Sciences* 2014 72:7, 72(7), 2523–2539. <https://doi.org/10.1007/S12665-014-3160-6>
- Angeli, M., Bigas, J.-P., Benavente, D., Menéndez, B., Hébert, R., & David, C. (2007). Salt crystallization in pores: quantification and estimation of damage. *Environmental Geology*, 52(2), 205–213. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0474-z>
- Aranda García, M., Hernández Romano, U., Ortega González, V., Miranda Canseco, E., & Mora Oropeza, G. (2010). *Provincias Geológicas de México*.
- Árcega Cabrera, F., Robledo Ardila, P. A., Rodríguez Fuentes, G., & Durán Valsero, J. (2021). *Los ojos de Yucatán. Una ventana al mundo subterráneo*.
- Arman, H., Abu Saima, M., Abdelghany, O., & Paramban, S. (2021). Comparative Study on Degradability Characteristics of Evaporitic and Carbonate Rocks from Al Ain, United Arab Emirates. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 906(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/906/1/012130>

- Attewell, P. B. (1971). Geotechnical properties of the Great Limestone in northern England. *Engineering Geology*, 5(2), 89–116. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(71\)90014-7](https://doi.org/10.1016/0013-7952(71)90014-7)
- Attewell, P. B., & Farmer, I. W. (1976). Principles of Engineering Geology. *Principles of Engineering Geology*. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5707-7>
- Barrow, L. T. (1922). *M-rc is AU original ua-lusc^ t M U« HOT BE COPTO «™º m.*
- Bautista, F. (2021a). Clasificación de suelos de la península de Yucatán. En: Los territorios kársticos de la península de Yucatán: caracterización, manejo y riesgos. *Asociación Mexicana de Estudios sobre el Karst.*, 25–38.
- Bautista, F. (2021b). Clasificación de suelos de la península de Yucatán. En: Los territorios kársticos de la península de Yucatán: caracterización, manejo y riesgos. *Asociación Mexicana de Estudios sobre el Karst.*, 25–38.
- Bautista, F., Palacio, G., Ortiz Pérez, M., Batllori Sampedro, E., & Castillo González, M. (2005). *El origen y el manejo maya de las geoformas, suelos y aguas en la Península de Yucatán.*
- Becerra, J. E., & Pulido González, O. (2019). *Rocas ornamentales* (Vol. 1). Servicio Geológico Colombiano. www.imprenta.gov.co
- Benavente, D., Bernabéu, A. M., & Cañaveras, J. C. (2004). *Estudio de las propiedades físicas de las rocas* (Vol. 12).
- Bonomo, A. E., Minervino Amodio, A., Prosser, G., Sileo, M., & Rizzo, G. (2020). Evaluation of soft limestone degradation in the Sassi UNESCO site (Matera, Southern Italy): Loss of material measurement and classification. *Journal of Cultural Heritage*, 42, 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.07.017>
- Braun, R. C., & Wilson, M. J. G. (1970). The removal of atmospheric sulphur by building stones. *Atmospheric Environment* (1967), 4(4), 371–378. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(70\)90082-X](https://doi.org/10.1016/0004-6981(70)90082-X)
- Buj, O., López, P. L., & Gisbert, J. (2010). Characterization of pore system and their influence on decay rates caused by salt weathering on limestones and dolostones quarried in Abanto (Zaragoza, Spain). *Materiales de Construcción*, 60(299), 99–114. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.50108>
- Butterlin, J., & Bonet, F. (1960). Microfauna del Eoceno inferior de la Península de Yucatán. *Instituto de Geología*, 27.
- Camuffo, D. (1986). Deterioration processes of historical monuments. *Studies in Environmental Science*, 30(C), 189–221. [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)70884-7](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)70884-7)
- Camuffo, D. (1995). Physical weathering of stones. *Science of the Total Environment*, 167(1–3), 1–14. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04565-I](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04565-I)
- Cardoso-Vázquez, E. A., Sánchez-Garrido, E., & Rafael-Fernández, J. A. (2004). *Carta Geológico-Minera Calkiní, Campeche y Yucatán F15-9-12, escala 1:250,000: Pachuca, Hidalgo.*
- Çelik, M. Y., & Sert, M. (2021). An assessment of capillary water absorption changes related to the different salt solutions and their concentrations ratios in the Döğler tuff (Afyonkarahisar-Turkey)

- used as building stone of cultural heritages. *Journal of Building Engineering*, 35, 102102. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102102>
- Climate Data. (2024). *Climate Data*. <https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico/yucatan/merida-3374/>
- Colín Gámez, M., & Hernández Tangarife, N. (2024). *Hallazgos de las policromías y acabados arquitectónicos de los mascarones de mosaico de piedra del Codz Pop, Kabah, Yucatán. Visiones desde la conservación-restauración Palabras clave*.
- CONAGUA. (2024). *COORDINACIÓN GENERAL DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL*. https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales_Climatologicas/Normales9120/yuc/or9120_31027.txt
- David, R., Castro, T., Liliana, A., & López, B. (2013). *ENFOQUE QUÍMICO DEL DETERIORO Y BIODETERIORO DE ROCAS CALCÁREAS CONFORMANTES DE MONUMENTOS PATRIMONIALES DE IMPORTANCIA HISTÓRICA Y CULTURAL*.
- DIN. (1998). *Methods of test for masonry units D Part 4: Determination of real and bulk density and of total and open porosity for natural stone masonry units; German version EN 772-4*.
- DIN. (1999). *Natural stone test methods D Determination of resistance to salt crystallisation; German version EN 12370*.
- DIN. (2007). *Natural stone test methods - Determination of uniaxial compressive strength; German version EN 1926*.
- DIN EN ISO. (2002). *Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of*. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5ab182e2-a7ad-428c-87e1-40fe97b42300/iso-15148-2002>
- Dunham, R. J. (1962). *Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Textures*. 38, 108–121. <https://archives.datapages.com/data/specpubs/carbona2/data/a038/a038/0001/0100/0108.htm>
- Edmunds, F. H., & Schaffer, R. J. (1932). Portland Stone; its geology and properties as a building stone. *Proceedings of the Geologists' Association*, 43(3), 225-IN4. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(32\)80019-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(32)80019-2)
- El-Gohary. (2010). INVESTIGATIONS ON LIMESTONE WEATHERING OF EL-TUBA MINARET EL MEHALLA, EGYPT: A CASE STUDY. En *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* (Vol. 10, Número 1).
- Embry, A., & Klován, J. E. (1972). A Late Devonian Reef Tract on Northeastern Banks Island, N.W.T. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*. <https://doi.org/10.35767/GSCPGBULL.19.4.730>
- Esbert, R. M., Montoto, M., & Ordaz, J. (1991). Rock as a construction material: durability, deterioration and conservation. *Materiales de Construcción*, 41(221), 61–73. <https://doi.org/10.3989/mc.1991.v41.i221.753>
- Esbert, R. M., Ordaz, J., Alonso, F. J., Ruiz, V. G., Argandona, D. E., Montoto, M., Marcos, R., & Valdeon, L. (1988). *Caracterización petrofísica y alterabilidad de las piedras de la Catedral de Sevilla*. <http://materconstrucc.revistas.csic.es>

- Esbert, R. M., Ordaz, J., Alonso, F. J., & Montoto, M. (1997). *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*.
- Filina, I. (2019). Crustal architecture of the northwestern and central Gulf of Mexico from integrated geophysical analysis. *Interpretation*, 7(4), T899–T910. <https://doi.org/10.1190/INT-2018-0258.1>
- Filina, I., & Beutel, E. (2022). *Geological and Geophysical Constraints Guide New Tectonic Reconstruction of the Gulf of Mexico*. <https://doi.org/10.1002/essoar.10511463.1>
- Filina, I., & Hartford, L. (2021). Subsurface structures along western Yucatan from integrated geophysical analysis. *Marine and Petroleum Geology*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.104964>
- Filina, I., Liu, M., & Beutel, E. (2020). Evidence of ridge propagation in the eastern Gulf of Mexico from integrated analysis of potential fields and seismic data. *Tectonophysics*, 775. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.228307>
- Flügel, E. (2004). Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application. xx + 976 pp. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag. Price Euros 99.95 (+ VAT at local rate), SFr 169.00, £77.00, US \$99.00 (hard covers). ISBN 3 540 22016 X. *Geological Magazine*, 143(1), 137–138. <https://doi.org/10.1017/S0016756806221940>
- Flügel, E. (2010a). Depositional Models, Facies Zones and Standard Microfacies. *Microfacies of Carbonate Rocks*, 657–724. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03796-2_14
- Flügel, E. (2010b). Microfacies of Carbonate Rocks. *Microfacies of Carbonate Rocks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03796-2>
- Folk, R. L. (1962). *Spectral Subdivision of Limestone Types*. 38, 62–84. <https://archives.datapages.com/data/specpubs/carbona2/data/a038/a038/0001/0050/0062.htm>
- Foncerrada de Molina. (1961). La arquitectura Puuc dentro de los estilos de Yucatán. *Universidad Iberoamericana*, 14.
- Galván Ceballos, M., & Restrepo, I. (2016). Correlación de la resistencia a compresión uniaxial con la humedad y porosidad eficaz en rocas. *DYNA*, 83(198), 9–15. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n198.53151>
- García de Miguel, J. M. (2011). *ICOMOS-ISCS: Illustrated glossary on stone deterioration patterns = Glosario ilustrado de formas de deterioro de la piedra*. http://www.international.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf
- García Gil, G., & Graniel Castro, E. (2010a). *Geología del estado de Yucatán*.
- García Gil, G., & Graniel Castro, E. (2010b). *Geología del estado de Yucatán*.
- García-Solís, C. A., Quintana-Owen, P., López-Doncel, R. A., & Illescas-Salinas, J. F. (2023a). Microfacial analysis on the building stones of the Maya site of Calakmul. *Environmental Earth Sciences*, 82(12). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10987-z>

- García-Solís, C. A., Quintana-Owen, P., López-Doncel, R. A., & Illescas-Salinas, J. F. (2023b). Microfacial analysis on the building stones of the Maya site of Calakmul. *Environmental Earth Sciences*, 82(12). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10987-z>
- Gendrop, P. (1983). *Los estilos Río Bec, Chenes y Puuc en la arquitectura maya*. Universidad Nacional Autónoma de México, División de Estudios de Posgrado Facultad de Arquitectura.
- Graf, D. (1960). *Geochemistry of carbonate sediments and sedimentary carbonate rocks*. Urbana, Ill. : State of Illinois, Dept. of Registration and Education, Division of the State Geological Survey.
- Hernández Rosado, A. (2000). *Museo de la Ruta Puuc Kabah, Yucatán* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández Tangarife, N. (2024). *La restauración de los mosaicos de piedra de la estructura 2C6 o Codz Pop de la Zona Arqueológica de Kabah, Yucatán*.
- Hernández Tangarife, N., Martínez López, K., & Escalante Hernández, M. F. (2022). *Proyecto de Conservación y restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán*.
- Huchim Herrera, J. H., & Toscano, L. (2018). *Diagnóstico y Prospectiva de las Zonas Arqueológicas del Sureste de México*.
- INEGI. (2016a). *Estudio de información integrada del acuífero cárstico Península de Yucatán Península de Yucatán*. www.inegi.org.mx
- INEGI. (2016b). *Estudio de información integrada del acuífero cárstico Península de Yucatán Península de Yucatán*. www.inegi.org.mx
- INEGI. (2017). *Conociendo Yucatán Séptima edición*. www.inegi.org.mx
- Jones, R. J. (1965). Aspects of the biological weathering of Limestone pavement. *Proceedings of the Geologists' Association*, 76(4), 421-IN8. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(65\)80041-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(65)80041-4)
- Kamh, G. M. E., Koltuk, S., & Ismael, H. (2017). Refinement of categorization and scaling of weathering-related damage to natural stone: case study on oolitic limestone from El-Shatbi Tombs (Egypt). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(1), 39–57. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0946-7>
- La Russa, M. F., Belfiore, C. M., Fichera, G. V., Maniscalco, R., Calabrò, C., Ruffolo, S. A., & Pezzino, A. (2015). The behaviour to weathering of the Hyblean limestone in the Baroque architecture of the Val di Noto (SE Sicily): An experimental study on the “calcarea lumachella” stone. *Construction and Building Materials*, 77, 7–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.073>
- Lerma Pérez, L. M. (2021). *Evaluación del deterioro y propiedades físicas de las rocas del Edificio J y Edificio de los Danzantes en la Zona arqueológica de Monte Albán, Oaxaca* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- López Doncel, R. (2004). *Manual para la clasificación de rocas carbonatadas*.
- López Ramos, E. (1973). Estudio geológico de la Península de Yucatán. *Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Boletín*, 25, 23–76.

- López Ramos, E. (1975). Geological Summary of the Yucatan Peninsula. *The Gulf of Mexico and the Caribbean*, 257–282. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8535-6_7
- López-Doncel, R., Wedekind, W., Dohrmann, R., & Siegesmund, S. (2013). Moisture expansion associated to secondary porosity: an example of the Loseros Tuff of Guanajuato, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 69(4), 1189–1201. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1781-1>
- López-Doncel, R., Wedekind, W., Leiser, T., Molina-Maldonado, S., Velasco-Sánchez, A., Dohrmann, R., Kral, A., Wittenborn, A., Aguillón-Robles, A., & Siegesmund, S. (2016). Salt bursting tests on volcanic tuff rocks from Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 75(3), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4770-3>
- Lorenzo Mora, F., & Carrascosa Moliner, B. (2019). Influencia de los aditivos orgánicos naturales en la resistencia a la cristalización de sales en morteros tradicionales de cal con distinto árido. Análisis del caso: sitio arqueológico La Blanca, Petén, Guatemala. *Devenir - Revista de estudios sobre patrimonio edificado*, 6(12), 11–26. <https://doi.org/10.21754/devenir.v6i12.741>
- Martínez Piñeiro, E., Álvarez Guzmán, G., & Cervantes Jáuregui, J. (2021). *CONSERVACIÓN DE MATERIALES CALCÁREOS ARQUEOLÓGICOS*.
- Molina Maldonado, S. A. (2016). *Estudios geológicos, petrográficos, geoquímicos y geotécnicos en las rocas de construcción del centro histórico de Santiago de Querétaro y su comportamiento al intemperismo* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Monier, A., Sáenz Pita, M. R., & López-Palomino, I. (2011). *Formación Carrillo Puerto*.
- Montante Hernández, G. N. (2019). *Estudios geológicos para determinar el intemperismo en las rocas del quiosco, de la Plaza de Armas, en la ciudad de San Luis Potosí* [Trabajo recepcional]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Montuori, R., & Gilabert Sansalvador, L. (2018). *DOCUMENTACIÓN Y ESTUDIO COMPARATIVO DE CUATRO BÓVEDAS MAYAS DEL ÁREA PUUC*.
- Mora Navarro, G. (2015). *Estudios de los mecanismos de alteración del Edificio B"Altar de cráneos" zona arqueológica Templo Mayor, Ciudad de México. Implicaciones petrográficas, geoquímicas y mecánicas* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Munsell, A. H. (1915). *Atlas of the Munsell color system*.
- Oguchi, C. T., & Yu, S. (2021). A review of theoretical salt weathering studies for stone heritage. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8(1), 32. <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00414-x>
- Ortiz, P., Mayoral, E., Guerrero, M. A., & Galán, E. (1995). CARACTERIZACION PETROGRAFICA y GEOQUIMICA DE LAS CALIZAS DE LA SIERRA DE ESTEPA (SEVILLA) Y EVALUACION DE LA CALIDAD TECNICA COMO MATERIALES DE CONSTRUCCION. En *Estudios Geol* (Vol. 51).
- Pápay, Z., & Török, Á. (2017). Effect of Thermal and Freeze-thaw Stress on the Mechanical Properties of Porous Limestone. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. <https://doi.org/10.3311/PPci.11100>
- Paredes, C., Matos, H., de la Vega, R., & Pardo, E. (2019). Reconocimiento semiautomático de depresiones kársticas mediante análisis clúster de las distribuciones morfométricas y su

- aplicación al karst del Estado de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 36(2), 270–288. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2019.2.1017>
- Patiño Ruiz, J., Bernal Vargas, L., Valdés, L., Gómez Rodríguez, R., & Navarro Baca, F. (2013). *Provincia Petrolera Plataforma de Yucatán*.
- PEMEX. (1988). *Estratigrafía de la República Mexicana: Cenozoico*.
- Peng, S., & Zhang, J. (2007). Engineering geology for underground rocks. *Engineering Geology for Underground Rocks*, 1–319. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73295-2>
- Pollock, H. E. D. . (1980). *The Puuc: an architectural survey of the hill country of Yucatan and northern Campeche, Mexico*. Peabody Museum of Archaeology and Ethnology, Harvard University.
- Přikryl, R., & Török, Á. (2010). Natural stones for monuments: Their availability for restoration and evaluation. *Geological Society Special Publication*, 333, 1–9. <https://doi.org/10.1144/SP333.1>
- Proyecto Conservación Ruta Puuc. (2023). *Reportes de condiciones ambientales del Proyecto de Conservación de la Piedra Labrada y Acabados de Estuco 2022-2023*.
- Proyecto Conservación Ruta Puuc. (2024). *Reportes de condiciones ambientales del Proyecto de Conservación de la Piedra Labrada y Acabados de Estuco 2023-2024*.
- Reddy, M. M. (1989). Ancient works, monuments and historical sites. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 70(8), 114–114. <https://doi.org/10.1029/89EO00067>
- Reed. (2001). *Sayil, Great Palace: Front facade, Mid-level of Left Side*. <https://www.reed.edu/uxmal/galleries/Mid/Sayil/GrPalace/Sayil-GrPalace-114.htm>
- Ringle, W. M., Negrón, T. G., Ciau, R. M., Seligson, K. E., Fernandez-Diaz, J. C., & Zapata, D. O. (2021). Lidar survey of ancient Maya settlement in the Puuc region of Yucatan, Mexico. En *PLoS ONE* (Vol. 16, Número 4 April). Public Library of Science. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249314>
- Rocha Reina, K. V. (2020). *Estudios geológicos y petrofísicos de las rocas naturales de construcción en el centro histórico de Santo Domingo, República Dominicana* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Rocha Reina, K. V. (2022). *Evaluación geológica-geoquímica de las rocas del edificio D y de los morteros de la zona arqueológica de Monte Albán, Oaxaca, implicaciones a su intemperismo y deterioro* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Rocha-Vargas, D. C., Becerra- Becerra, J. E., Benavente, D., Cañaveras, J. C., & Gilberto-Costa, A. (2019). Estudio preliminar de las características petrográficas, petrofísicas y comportamiento mecánico de rocas naturales tipo “piedra bogotana” y “mármol royal bronze” utilizadas en construcciones patrimoniales y recientes en Colombia. *Revista UIS Ingenierías*, 18(3), 203–222. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n3-2019021>
- Rodríguez Pérez, I., Vasconcelos, G., Lourenço, P. B., Quintana, P., García, C., & Dionísio, A. (2021). Physical-mechanical characterization of limestones from Yucatan churches, Mexico. *Journal of Building Engineering*, 44, 102895. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102895>

- Rothert, E., Eggers, T., Cassar, J., Ruedrich, J., Fitzner, B., & Siegesmund, S. (2007). *Stone properties and weathering induced by salt crystallization of Maltese Globigerina Limestone*.
- Royo-Ochoa, M., Chávez-Aguirre, R., Pinales-Munguía, A., Castañeda-Ávila, J., Villalba, M. L., Espino-Valdés, M. S., De La Garza-Aguilar, R., Cordero-De Los Ríos, P. I., Acosta-Chávez, R., Urrutia-Fucugauchi, J., Alva-Valdivia, L. M., Royo-León, M., & Colmenero-Sujo, L. H. (2010). *EL INTEMPERISMO Y LAS ROCAS EN LA CONSTRUCCIÓN*.
- Ruedrich, J., Bartelsen, T., Dohrmann, R., & Siegesmund, S. (2011). Moisture expansion as a deterioration factor for sandstone used in buildings. *Environmental Earth Sciences*, 63(7–8), 1545–1564. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0767-0>
- Sabloff, J., & Tourtellot, G. (1991). The ancient maya city of Sayil: The mapping of a Puuc Region Center. *Middle American Research Institute. Tulane University, New Orleans*, 47.
- Salvini, S., Coletti, C., Maritan, L., Massironi, M., Pieropan, A., Spiess, R., & Mazzoli, C. (2022). *Petrographic characterization and durability of carbonate stones used in UNESCO World Heritage sites in northeastern Italy*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1651027/v1>
- Sanjuán Carracedo, M. (2013). *ESTUDIO DE PATOLOGÍAS, TÉCNICAS DE DIAGNOSIS, RESTAURACIÓN Y CONSERVACIÓN DE MATERIALES PÉTREOS*.
- Sapper, C. (1986). *GEOLOGY OF CHIAPAS, TABASCO AND THE PENIN-SULA OF YUCATAN.I*.
- Scholle, P. A., & Ulmer-Scholle, D. S. (2003). *A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks*. American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/M77973>
- Sena da Fonseca, B., Ferreira Pinto, A. P., Rodrigues, A., Piçarra, S., & Montemor, M. F. (2021). The role of properties on the decay susceptibility and conservation issues of soft limestones: Contribution of Ançã stone (Portugal). *Journal of Building Engineering*, 44, 102997. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102997>
- Sevilla, J. B., Químicas, L. C., & Biológicas, L. C. (1995). *Características térmicas de rocas ornamentales*.
- Siegesmund, S., & Dürrast, H. (2014). Physical and Mechanical Properties of Rocks. *Stone in Architecture: Properties, Durability: Fifth Edition*, 97–224. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45155-3_3
- Siegesmund, S., Kruhl, J. H., & Lüschen, E. (1996). *The Significance of rock fabrics for the geological - interpretation of geophysical anisotropies*.
- Siegesmund, S., & Snethlage, R. (2011). Stone in architecture: Properties, durability. En *Stone in Architecture: Properties, Durability*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2>
- Siegesmund, S., Weiss, T., & Vollbrecht, A. (2002). Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies: introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 205(1), 1–7. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.205.01.01>
- Silva, B., Sanmartín, P., & Prieto, B. (2019). Caracterización de la roca soporte de los petroglifos de Campo Lameiro (Pontevedra). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe. Revista de Xeoloxía Galega e do Hercínico Peninsular*, 41, 141–152. <https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2019.41.0.5821>

- Sousa, L., Menningen, J., López-Doncel, R., & Siegesmund, S. (2021). *Petrophysical Properties of Limestones - Influence On Behaviour Under Different Environmental Conditions And Applications*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-862528/v1>
- Stakhri, M. D. A., Ghobadi, M. H., & Mohseni, H. (2021). Predicting the long-term durability of limestones subjected to freeze–thaw cycles (case study: Guilan province, north of Iran). *Geopersia*, 11(2), 377–397. <https://doi.org/10.22059/geope.2021.317876.648597>
- Steiger, M., Charola, A. E., & Sterflinger, K. (2011). Weathering and Deterioration. *Stone in Architecture: Properties, Durability*, 227–316. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2_4
- Straulino Mainou, L. (2010a). *El fluoruro de sodio, una alternativa para la conservación de roca caliza disgregada*.
- Straulino Mainou, L. (2010b). *El fluoruro de sodio, una alternativa para la conservación de roca caliza disgregada*.
- Straulino Mainou, L. (2012). Weathering of limestone in prehispanic Mayan monuments. The case of the cornice of building 5N2, Rio Bec. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(1), 49–60. <https://doi.org/10.18268/bsgm2012v64n1a4>
- Sweitz, S. (2012). *On the Periphery of the Periphery*. <http://www.springer.com/series/5734>
- Taobada Castro, M. T., & Silva Hermo, B. M. (1999). *Factores de formación y propiedades de los suelos formados sobre calizas en Galicia*.
- Taobada Castro, M. T., Silva Hermo, B. M., & Barral Silva, M. T. (1999). *RELACIÓN ENTRE FORMAS DE HIERRO Y COLOR ROJO EN SUELOS SOBRE CALIZAS DE GALICIA*. 13(4), 31–41.
- Taobada Castro, M. T., Silva Hermo, M. B., & Barral Silva, M. T. (1992). *Distribución y origen de los óxidos de hierro en suelos sobre calizas*.
- Thomas, C., Lombillo, I., Setién, J., Polanco, J. A., & Villegas, L. (2009). *Absorción por capilaridad y consolidación de materiales pétreos del patrimonio histórico construido impermeabilizados y reforzados con productos hidrofugantes y consolidantes comerciales*.
- Toscano, L., Novelo, G., Ortégón, D., & Valle, A. (2007). *Programa institucional restauración del ala oriente del Palacio de Sayil. Temporada 2007*.
- Tucker, M. E., & Wright, V. P. (1990). *Carbonate Sedimentology*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781444314175>
- Valdeon, L., Esbert, R. M., & Marcos, R. M. (1985). *La alveolización y otras formas de alteración desarrolladas sobre las areniscas del palacio de Revillagigedo de Gijón (Asturias)*. <http://materconstrucc.revistas.csic.es>
- Valdés, C., Corvo, F., González, E., Pérez, J., & Portilla Osvaldo Cuesta, C. (2007). Mecanismos de deterioro de la piedra caliza coralina estructural del Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís y ensayo de productos para su conservación. En *Revista CENIC Ciencias Químicas* (Vol. 38, Número 3).

- Vidal, L., & Cosme, C. Y. G. M. (1997). *La arquitectura de las ciudades Mayas del área Puuc, Yucatán*.
- Videla, H., Guiamet, P., & Gómez de Saravia, P. (2003). Biodeterioro de materiales estructurales de sitios arqueológicos de la civilización maya. *Revista del Museo de la Plata*.
- Vigroux, M., Eslami, J., Beaucour, A.-L., Bourghès, A., & Noumowé, A. (2021). High temperature behaviour of various natural building stones. *Construction and Building Materials*, 272, 121629. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121629>
- Villar Rubio, J., Mendoza Pérez, L. A., Bello Caballero, L. E., & Chico Ponce de León, P. A. (2014). *Relaciones entre la Teoría y las Concreciones en la Conservación del Patrimonio Cultural Edificado Icomos Cuba* (1a ed.). Universidad Autónoma de Yucatán.
- Villarraga, C. J., Gasc-Barbier, M., Vaunat, J., & Darrozes, J. (2018). The effect of thermal cycles on limestone mechanical degradation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 109, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.06.017>
- von Moos, A., & de Quervain, F. (1948). Technische Gesteinskunde. *Technische Gesteinskunde*. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-6799-3>
- Warren, J. (2000). Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52(1–3), 1–81. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00022-2)
- Wedekind, W., López-Doncel, R., Dohrmann, R., Kocher, M., & Siegesmund, S. (2013). Weathering of volcanic tuff rocks caused by moisture expansion. *Environmental Earth Sciences*, 69(4), 1203–1224. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2158-1>
- Wilson, J. L. (1975). Carbonate Facies in Geologic History. *Carbonate Facies in Geologic History*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-6383-8>
- Winkler, E. M. (1966). Important agents of weathering for building and monumental stone. *Engineering Geology*, 1(5), 381–400. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(66\)90003-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(66)90003-2)
- Winkler, E. M. (1968). Frost damage to stone and concrete: geological considerations. *Engineering Geology*, 2(5), 315–323. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(68\)90010-0](https://doi.org/10.1016/0013-7952(68)90010-0)
- Winkler, E. M. (1970). The importance of air pollution in the corrosion of stone and metals. *Engineering Geology*, 4(4), 327–334. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(70\)90022-0](https://doi.org/10.1016/0013-7952(70)90022-0)
- Winkler, E. M. (1987). *Weathering and Weathering Rates of Natural Stone*.
- Wright, V. P., & Burchette, T. P. (1998). Carbonate ramps: an introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 149(1), 1–5. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.149.01.01>
- Yavuz, H., Demirdag, S., & Caran, S. (2010). Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(1), 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.09.014>
- Záruba, Q., & Mencl, V. (1976). Geophysical methods. *Developments in Geotechnical Engineering*, 10(C), 140–145. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-99877-4.50010-0>

Anexos

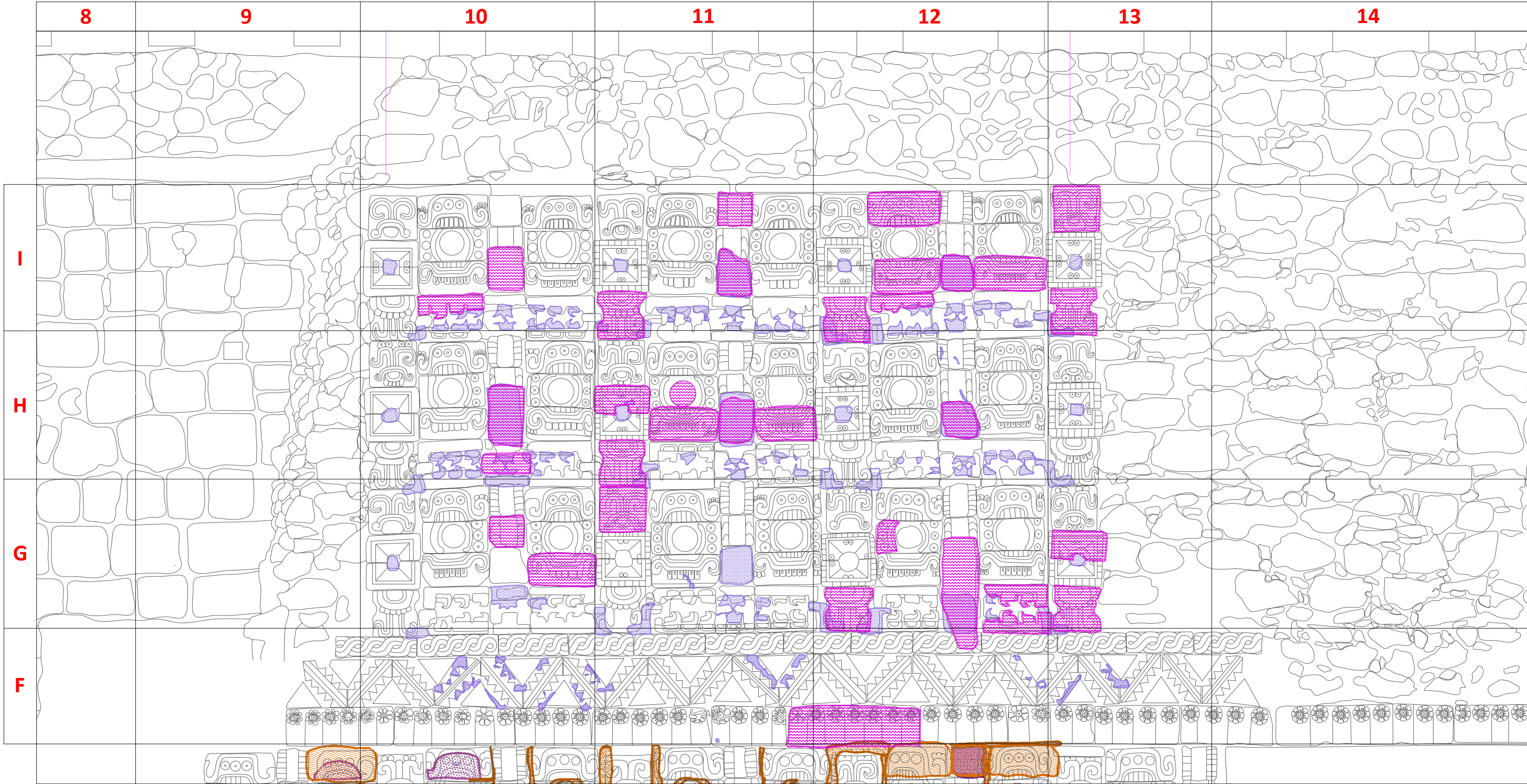
Anexo 1. Microfacies (RMF) comunes en rampas Paleozoicas y Mesozoicas (Ahr, 1973).

Microfacies (RMF) comunes en rampas Paleozoicas y Mesozoicas
Cuenca
RMF 1. Calcsiltita y mudstone con peloides, con espículas de esponjas y en ocasiones con laminación
RMF 2. Mudstones y wackestones arcillosos, poca presencia de aglutinaciones de foraminíferos, ostrácodos y equinodermos
RMF 3. Wackestone y packstone de bioclastos con diversos fósiles (bivalvos, braquiópodos, equinodermos) y peloides
Rampa profunda
RMF 1. Calcsiltita y mudstone con peloides, con espículas de esponjas y en ocasiones con laminación
RMF 2. Mudstones y wackestones arcillosos, poca presencia de aglutinaciones de foraminíferos, ostrácodos y equinodermos
RMF 3. Wackestone y packstone de bioclastos con diversos fósiles (bivalvos, braquiópodos, equinodermos) y peloides
RMF 4. Wackestone y packstone peloidal
RMF 5. Mudstone pelágico con microfósiles plantónicos y fósiles nectónicos de mar abierto (amonites)
RMF 6. Grainstone bioclástico y peloidal, bien clasificado y con laminación cruzada, tempestitas.
Rampa media
RMF 2, RMF 3, RMF 5
RMF 7. Packstone de bioclastos con abundantes equinodermos, son comunes los bivalvos y foraminíferos
RMF 8. Packstone y grainstone con granos esqueléticos, intraclastos, oncoides y peloides
RMF 9. Wackestone, packstone, floatstone con intraclastos de micrita y material derivado de arrecifes, suelen ocurrir microbrechas
RMF 10. Conglomerados de calizas (en rampa distalmente inclinada)
RMF 11. Margas con intraclastos y guijarros de calizas (en rampa distalmente inclinada)
RMF 12. Boundstone y framestones de corales y algas rojas.
Rampa interna
RMF 12
<i>Ambientes de mar abierto</i>
RMF 13. Wackestone y packstone bioclásticos con abundantes foraminíferos de mayor tamaño (orbitolinas)
RMF 14. Packstone y wackestone con granos esqueléticos, cierta cantidad de intraclastos y ooides
RMF 15. Floatstone de bioclastos con material derivado de arrecifes (corales, algas, bivalvos)
<i>Ambientes restringidos</i>
RMF 7, RMF 13
RMF 16. Mudstone, wackestone o packstone con abundantes foraminíferos (miliólidos)
RMF 17. Wackestone de bioclastos con algas verdes (dasycladales)
RMF 18. Wackestone de bioclastos con ostrácodos
<i>Ambientes de lagunas</i>
RMF 17.
RMF 19. Mudstone no bioturbado
RMF 20. Wackestones y packstone de bioclastos con algas calcáreas y foraminíferos bentónicos
RMF 21. Packstone y floatstone con oncoides
<i>Zonas peritidales</i>
RMF 19, RMF 21
RMF 22. Mudstone, dolomía laminada
RMF 23. Bindstone fenestral
RMF 24. Mudstone o packstone con intraclastos
RMF 25. Bindstone laminado de carbonato-evaporitas
<i>Bancos de arenas</i>
RMF 26. Grainstone bioclástico de grano medio a grueso y packstone con diversos granos esqueléticos bentónicos.
RMF 27. Grainstone y packstone bioclásticos compuestos de pocos granos esqueléticos dominantes (por ejemplo, predominantemente equinodermos o foraminíferos).
RMF 28. Floatstone y rudstone bioclásticos que presentan una fábrica desorganizada
RMF 29. Grainstone con ooides concéntricos densamente empaquetados (común en bancos de arena).
RMF 30. Grainstone y packstone con ooides (común en bancos).

Anexo 2. Muestras colectadas en esta investigación.

Clave de muestra		Análisis realizados	Zona arqueológica	Edificio/ Estructura	Bien Mueble Asociado a Inmueble	Tipo de elemento arquitectónico	Orientación	Localización	Cuadrante	Tipo de roca	Textura	Observaciones
No.	INAH											
M19	19LITKAB	ICP-OES, DRX, FRX	Kabah	E2B1	IMB	FCH	SUR	NV-3		Suelo		Suelo de la zona arqueológica de Kabah. 20°14'56" N 89°38'50"W
M20	20LITKAB	AP, ICP-OES	Kabah	E2C6	MOP	FCH	OES	MUR-6	Núcleo	Caliza	Dismicrita	Roca localizada en el núcleo del mosaico durante la reintegración de mascarones
M21	21LITKAB	AP, LD, ICP-OES, DRX, FRX	Kabah	E2C6	MOP	FCH	OES	MUR-6	E-40	Brecha calcárea	Rudstone	Espiga de apéndice bucal localizada en la plaza (cementerio de espigas), seleccionada para adherirla como espiga a el apéndice E-40 del muro 6. Esta pieza se cortó para adecuar el tamaño y quedó este sobrante para análisis
M22	22LITKAB	AP, ICP-OES, DRX	Kabah	E2C6	MOP	FCH	OES	MUR-1	Núcleo	Brecha calcárea	Floatstone	Recolectado de las rocas de mosaico frente al muro. 20°14'53" N 89°38'50"W
M23	23LITKAB	AP	Kabah	E2C6	MOP	FCH	OES	MUR-1	Núcleo	Brecha calcárea	Packstone	Recolectado de las rocas de mosaico frente al muro. 20°14'53" N 89°38'50"W
M24	24LITKAB	ICP-OES, DRX	Kabah		MOP	FCH	OES	MUR-1	Núcleo	Brecha calcárea	Floatstone	Recolectado de las rocas de mosaico frente al muro. 20°14'53" N 89°38'50"W
M25	25LITKAB	AP	Kabah		MOP	FCH	OES	MUR-2	Núcleo	Caliza	Wackestone	Recolectado de las rocas de mosaico frente al muro. 20°14'53" N 89°38'50"W
M26	26LITKAB	ICP-OES	Kabah		MOP	FCH	OES	MUR-2	Núcleo	Caliza	Mudstone	Recolectado de las rocas de mosaico frente al muro. 20°14'53" N 89°38'50"W
M27	27LITKAB	AP	Kabah		MOP	FCH	OES	MUR-3	Núcleo	Brecha calcárea	Floatstone	Recolectado de las rocas de mosaico frente al muro. 20°14'52" N 89°38'50"W
M28	28LITKAB	AP	Kabah		MOP	FCH	OES	MUR-4	Núcleo	Brecha calcárea	Floatstone	Recolectado de las rocas de mosaico frente al muro. 20°14'52" N 89°38'50"W
M29	29LITKAB	AP	Kabah		MOP	FCH	OES	MUR-4	Núcleo	Caliza	Mudstone	Recolectado de las rocas de mosaico frente al muro. 20°14'52" N 89°38'50"W
M30	30LITKAB	ICP-OES	Kabah		MOP	FCH	OES	MUR-5	Núcleo	Caliza	Mudstone	Recolectado de las rocas de mosaico frente al muro. 20°14'52" N 89°38'50"W
M31	31LITKAB	AP	Kabah		MOP	FCH	OES	MUR-5	Núcleo	Brecha calcárea	Floatstone	Recolectado de las rocas de mosaico frente al muro. 20°14'52" N 89°38'50"W
M32	32LITKAB	AP, LD	Kabah				NOR	MUR-4	Núcleo	Brecha calcárea	Rudstone	Recolectado de las rocas de mosaico frente al muro. 20°14'52" N 89°38'50"W
M40	40LITKAB	AP, ICP-OES, FRX	Kabah					Afloramiento	Montículo	Brecha calcárea	Floatstone	Afloramiento. 20°14'54" N 89°38'45"W
M41	41LITKAB	ICP-OES, DRX	Kabah						Montículo	Sascab		Material utilizado para la elaboración del estuco. 20°14'57" N 89°38'49" W
M42	42LITSAY	AP	Sayil	E2B1	MOP	FRI	SUR	FRI-2	Núcleo	Brecha calcárea	Floatstone	Recolectado del pasillo entre el friso 1 y 2. 20°10'40" N 89°39'07" W
M43	43LITSAY	AP	Sayil	E2B1	MOP	FRI	SUR	FRI-4	Núcleo	Caliza	Mudstone	Recolectado del pasillo entre el friso 3 y 4. 20°10'40" N 89°39'06" W
M44	44LITSAY	ICP-OES, DRX, LD	Sayil	E2B1	MOP	FRI	SUR	FRI-4	Núcleo	Brecha calcárea	Rudstone	Recolectado del pasillo entre el friso 3 y 4. 20°10'40" N 89°39'06" W
M45	45LITSAY	ICP-OES	Sayil					Afloramiento	Montículo	Caliza	Mudstone	Afloramiento. 20°10'42" N 89°39'06"W
M46	46LITSAY	AP	Sayil	E2B1	MOP	FRI	SUR	FRI-2	Núcleo	Brecha calcárea	Floatstone	Recolectado del pasillo entre el friso 1 y 2. 20°10'40" N 89°39'07" W
M47	47LITSAY	ICP-OES, DRX	Sayil					Afloramiento	Montículo	Brecha calcárea	Floatstone	Afloramiento. 20°10'42" N 89°39'04"W
M48	48LITSAY	ICP-OES	Sayil					Afloramiento	Montículo	Caliza	Mudstone	Afloramiento. 20°10'42" N 89°39'04"W
M50	49LITSAY	AP, LD	Sayil	E2B1	MOP	FRI	SUR	FRI-4	Núcleo	Brecha calcárea	Floatstone	Recolectado del pasillo entre el friso 3 y 4. 20°10'40" N 89°39'06" W
M51	50LITSAY	AP, LD	Sayil	E2B1	MOP	FRI	SUR	FRI-4	Núcleo	Caliza	Mudstone	Recolectado del pasillo entre el friso 3 y 4. 20°10'40" N 89°39'06" W
M52	51LITSAY	AP, ICP-OES, DRX, LD	Sayil	E2B1	MOP	FRI	SUR	FRI-4	Núcleo	Caliza	Wackestone	Recolectado del pasillo entre el friso 3 y 4. 20°10'40" N 89°39'06" W
M53	52LITSAY	AP, ICP-OES, LD, FRX	Sayil					Afloramiento	Montículo	Brecha calcárea	Floatstone	Afloramiento. 20°10'41" N 89°39'05"W
M54	53LITSAY	AP	Sayil	E2B1	MOP	FRI	SUR	FRI-4	Núcleo	Caliza	Mudstone	Recolectado del pasillo entre el friso 3 y 4. 20°10'40" N 89°39'06" W
M55	54LITSAY	AP	Sayil	E2B1	MOP	FRI	SUR	FRI-4	Núcleo	Caliza	Mudstone	Recolectado del pasillo entre el friso 3 y 4. 20°10'40" N 89°39'06" W
M59	55LITSAY	ICP-OES	Sayil	E2B1	MOP	FRI	SUR	FRI-2	Núcleo	Brecha calcárea	Floatstone	Recolectado del pasillo entre el friso 1 y 2. 20°10'40" N 89°39'07" W
M60	56LITSAY	LD	Sayil					Afloramiento	Montículo	Brecha calcárea	Floatstone	Afloramiento. 20°10'40" N 89°39'05"W
M61	57LITSAY	ICP-OES, DRX	Sayil					Afloramiento	Montículo	Brecha calcárea	Floatstone	Afloramiento. 20°10'40" N 89°39'05"W
M62	58LITSAY	LD	Sayil					Afloramiento	Montículo	Caliza	Packstone	Afloramiento. 20°10'40" N 89°39'05"W
M66	59LITSAY	ICP-OES, LD	Sayil					Afloramiento	Montículo	Caliza	Mudstone	Afloramiento. 20°10'39" N 89°39'06"W
M67	60LITSAY	ICP-OES	Sayil					Afloramiento	Montículo	Brecha calcárea	Floatstone	Afloramiento. 20°10'40" N 89°39'07"W
M68	61LITSAY	ICP-OES	Sayil					Afloramiento	Montículo	Brecha calcárea	Floatstone	Afloramiento. 20°10'40" N 89°39'08"W
M69	69LITSAE	AP	Santa Elena					Afloramiento	Montículo	Caliza	Mudstone	Afloramiento Santa Elena. 20°19'40" N 89°38'34"W
M70	70LITSAE	ICP-OES, DRX	Santa Elena					Afloramiento	Montículo	Brecha calcárea	Floatstone	Afloramiento Santa Elena. 20°19'40" N 89°38'34"W
M71	71LITSAE	LD	Santa Elena					Afloramiento	Montículo	Brecha calcárea	Floatstone	Afloramiento Santa Elena. 20°19'40" N 89°38'33"W
M72	72LITSAE	AP	Santa Elena					Afloramiento	Montículo	Brecha calcárea	Floatstone	Afloramiento Santa Elena. 20°19'40" N 89°38'33"W
M73	73LITSAE	LD	Santa Elena					Afloramiento	Montículo	Brecha calcárea	Floatstone	Afloramiento Santa Elena. 20°19'40" N 89°38'32"W
M74	74LITSAE	AP	Santa Elena					Afloramiento	Montículo	Brecha calcárea	Floatstone	Afloramiento Santa Elena. 20°19'40" N 89°38'32"W
M75	75LITSAE	ICP-OES, FRX	Santa Elena					Afloramiento	Montículo	Brecha calcárea	Floatstone	Afloramiento Santa Elena. 20°19'40" N 89°38'32"W

AP: análisis petrofísicos/ LD: láminas delgadas/ FRX: fluorescencia de rayos x/ DRX: difracción de rayos x



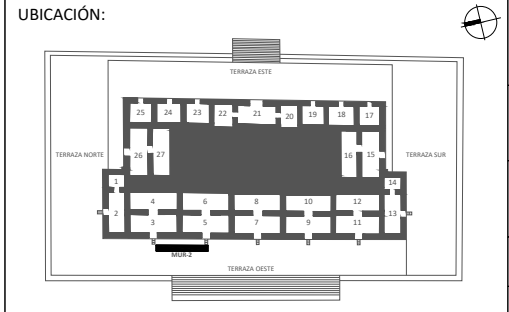
SIMBOLOGÍA DE ESTADO DE CONSERVACIÓN

d) Desprendimientos			
	Oquedades		Disgregación
	Abombamiento		Desp. de estuco
	Pulverulencia		Desp. de piedra
	Otro (especificar)		

e) Pérdida de material			
	Delaminación		Escamas
	Exfoliación		Erosión
	Nodulos de hierro		Vetas
	Nodulos (huecos)		Detritos
	Helicoidal		
	Color		Relieve
	Sección Mosaico		Aplanado
	Juntas		Otro (especificar)

f) Presencia de sales			
	Velos		Concreciones
	Eflorescencias		Subeflorescencias
	Agujas		Polvo
	Cristales		

OBSERVACIONES



Conservación-Restauración Yucatán

Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán

Directoras de Proyecto:
Mtra. Natalia Hernández Tangarife
Mtra. Karla Martínez López

Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda

Registro Estado de Conservación:
Rest. José Manuel Olvera
Rest. Marian García Espejo

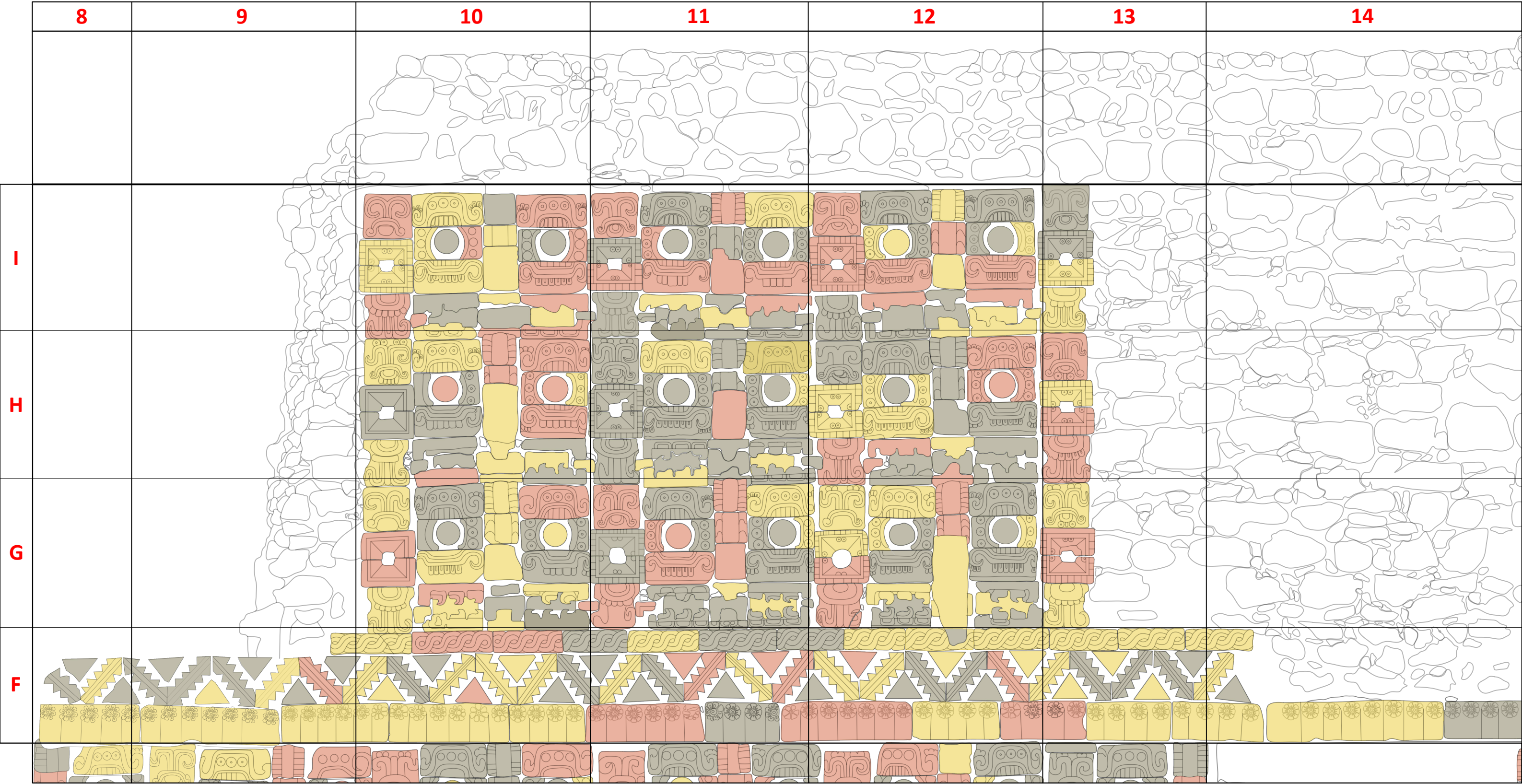
Equipo de Arquitectura:
Jesús A. Muñoz Cinta
Vidaura A. Cardos Ramírez

Registro Estado de Conservación:
Septiembre, 2022

Registro Digital:
Arq. Daniela Vargas / Arq. Kin Durán

Registro Digital:
Febrero, 2024

CLAVE: PUC_0002_KAB_E2C6_MOP_FCH_OES_FRI-2

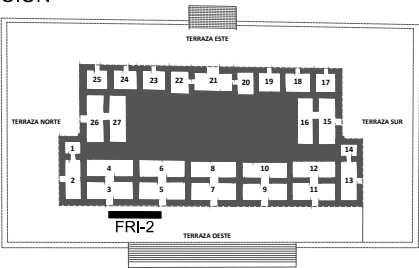


LITOLOGÍA (TEXTURAS CARBONATADAS)

Litología	
Caliza(wackestone)	Núcleo
Brecha calcárea(floatstone)	
Brecha calcárea(rudstone)	

OBSERVACIONES

UBICACIÓN



Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán



Directoras de Proyecto:
Mtra. Natalia Hernández Tangarife
Mtra. Karla Martínez López

Equipo de Arquitectura:
Jesús A. Muñoz Cinta
Vidaura A. Cardos Ramírez

Registro Digital:
Arq. Daniela Vargas/ Arq. Kin Durán

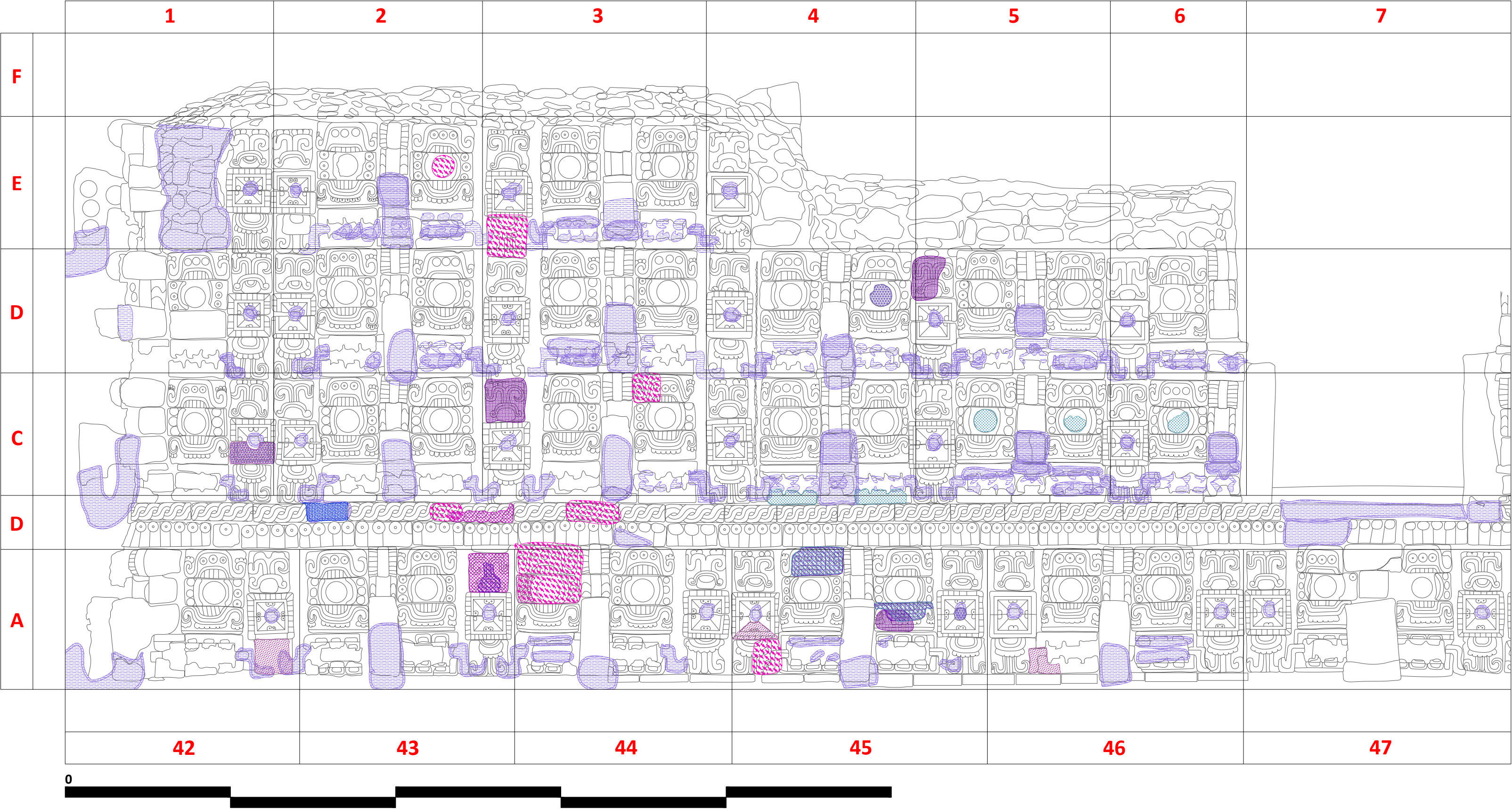
Clave: PUC_0007_KAB_E2C6_MOP_FCH_OES_FRI-2_ELI

Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda Lazo de la Vega

Registro Litológico:
Ing. Osmara A. Coronado Coronado

Registro Litológico:
Junio 2023

Registro Digital:
Marzo 2024



SIMBOLOGÍA DE ESTADO DE CONSERVACIÓN

d) Desprendimientos

	Oquedades		Disgregación
	Abombamiento		Desp. de estuco
	Pulverulencia		Desp. de piedra
	Otro (especificar)		

e) Pérdida de material

	Delaminación		Escamas											
	Exfoliación		Erosión											
	<table><tr><td></td><td>Nodulos de hierro</td><td></td><td>Vetas</td></tr><tr><td></td><td>Nodulos (huecos)</td><td></td><td>Detritos</td></tr><tr><td></td><td>Helicoidal</td><td></td><td></td></tr></table>		Nodulos de hierro		Vetas		Nodulos (huecos)		Detritos		Helicoidal			
	Nodulos de hierro		Vetas											
	Nodulos (huecos)		Detritos											
	Helicoidal													
	<table><tr><td></td><td>Color</td><td></td><td>Relieve</td></tr><tr><td></td><td>Sección Mosaico</td><td></td><td>Aplanado</td></tr><tr><td></td><td>Juntas</td><td></td><td>Otro (especificar)</td></tr></table>		Color		Relieve		Sección Mosaico		Aplanado		Juntas		Otro (especificar)	
	Color		Relieve											
	Sección Mosaico		Aplanado											
	Juntas		Otro (especificar)											

f) Presencia de sales

	Velos		Concreciones
	Eflorescencias		Subeflorescencias
	Agujas		Polvo
	Cristales		

OBSERVACIONES

- Existen desfases de intervenciones anteriores.
- Se observa que la mayoría de las piedras están veteadas.
- Se observa que la mayoría de las representaciones de lengua bífida se encuentran perdidas. Así como las representaciones de piezas dentales.
- La sección del paramento no representa moldura media ni friso.

UBICACIÓN:

Directoras de Proyecto:
Mtra. Natalia Hernández Tangarife
Mtra. Karla Martínez López

Equipo de Arquitectura:
Jesús A. Muñoz Cinta
Vidaura A. Cardos Ramírez

Registro Digital:
Arq. Daniela Vargas / Arq. Kin Durán

Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda

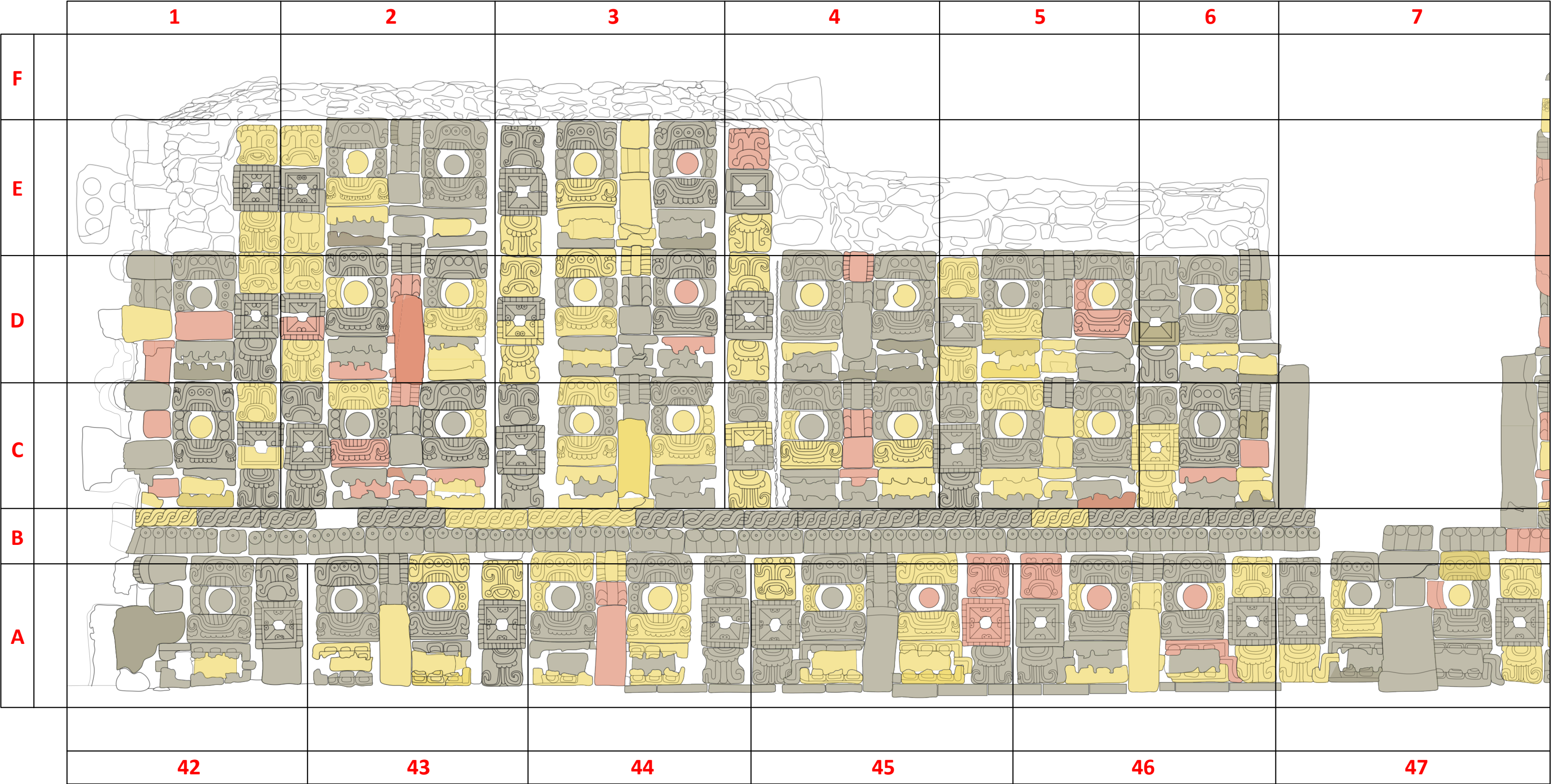
Registro Estado de Conservación:
Rest. José Manuel Olvera
Rest. Marian García Espejo

Registro Estado de Conservación:
Septiembre, 2022

Registro Digital:
Febrero, 2024

CLAVE: PUC_0001_KAB_E2C6_MOP_FCH_OES_MUR-1_

Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán

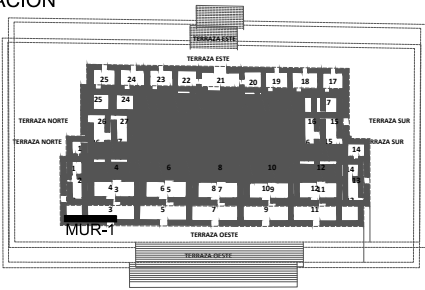


LITOLOGÍA (TEXTURAS CARBONATADAS)

Litología	
Caliza(wackestone)	Núcleo
Brecha calcárea(floatstone)	
Brecha calcárea(rudstone)	

OBSERVACIONES

UBICACIÓN



Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán



Directoras de Proyecto:
Mtra. Natalia Hernández Tangarife
Mtra. Karla Martínez López

Equipo de Arquitectura:
Jesús A. Muñoz Cinta
Vidaura A. Cardos Ramírez

Registro Digital:
Arq. Daniela Vargas/ Arq. Kin Durán

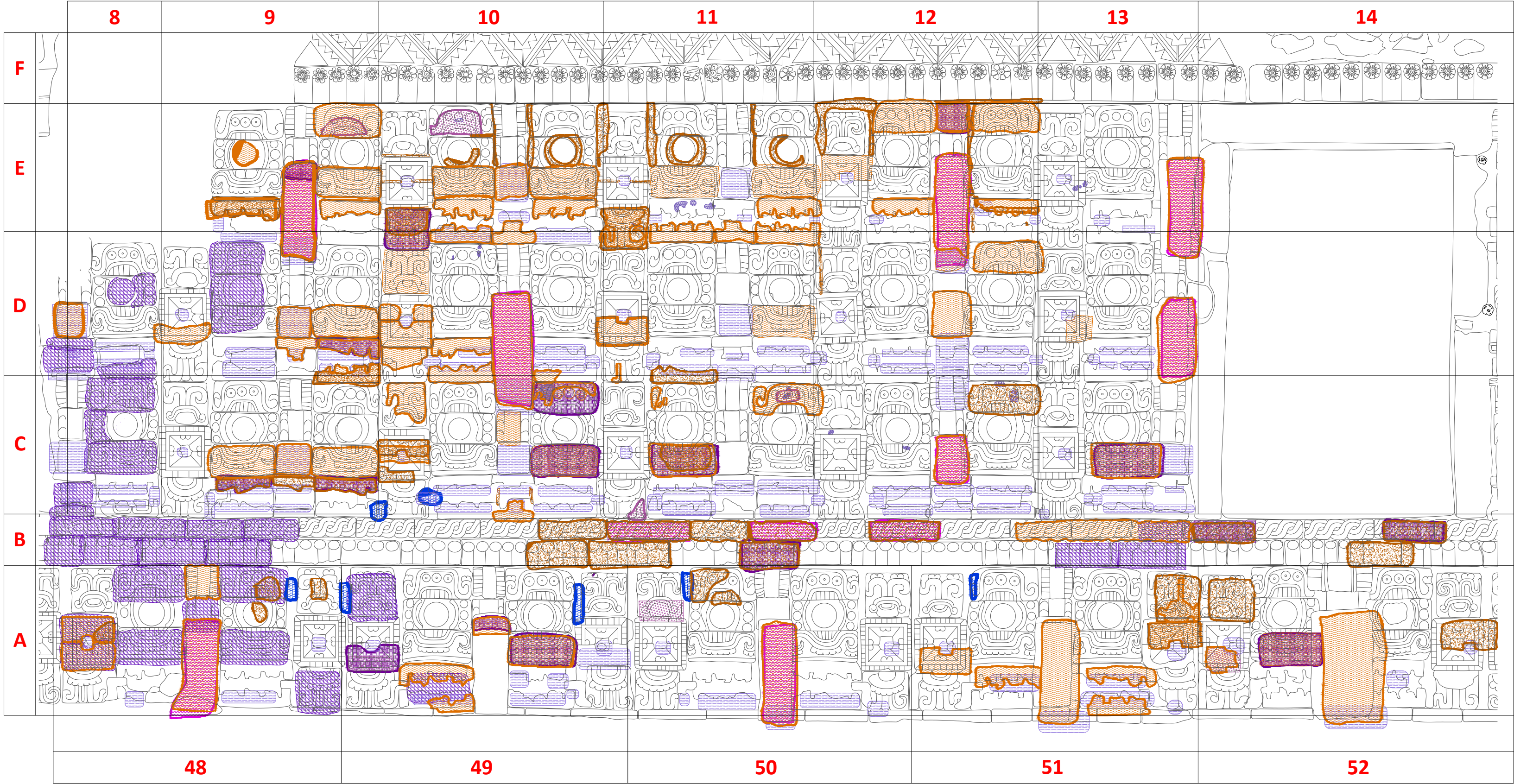
Clave: PUC_0001_KAB_E2C6_MOP_FCH_OES_MUR-1_ELI

Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda Lazo de la Vega

Registro Litológico:
Ing. Osmara A. Coronado Coronado

Registro Litológico:
Junio 2023

Registro Digital:
Marzo 2024



SIMBOLOGÍA DE ESTADO DE CONSERVACIÓN

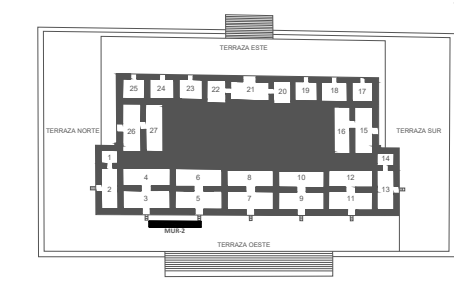
d) Desprendimientos			
	Oquedades		Disgregación
	Abombamiento		Desp. de estuco
	Pulverulencia		Desp. de piedra
	Otro (especificar)		

e) Pérdida de material			
	Delaminación		Escamas
	Exfoliación		Erosión
Pérdida diferencial			Nódulos de hierro
			Nódulos (huecos)
			Helicoidal
			Vetas
			Detritos
Pérdida de elementos:			Color
			Sección Mosaico
			Juntas
			Relieve
			Aplanado
			Otro (especificar)

f) Presencia de sales			
	Velos		Concreciones
	Eflorescencias		Subeflorescencias
	Agujas		Polvo
	Cristales		

OBSERVACIONES

UBICACIÓN:



Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán

Directoras de Proyecto:
Mtra. Natalia Hernández Tangarife
Mtra. Karla Martínez López

Equipo de Arquitectura:
Jesús A. Muñoz Cinta
Vidaura A. Cardos Ramírez

Registro Digital:
Arq. Daniela Vargas / Arq. Kin Durán

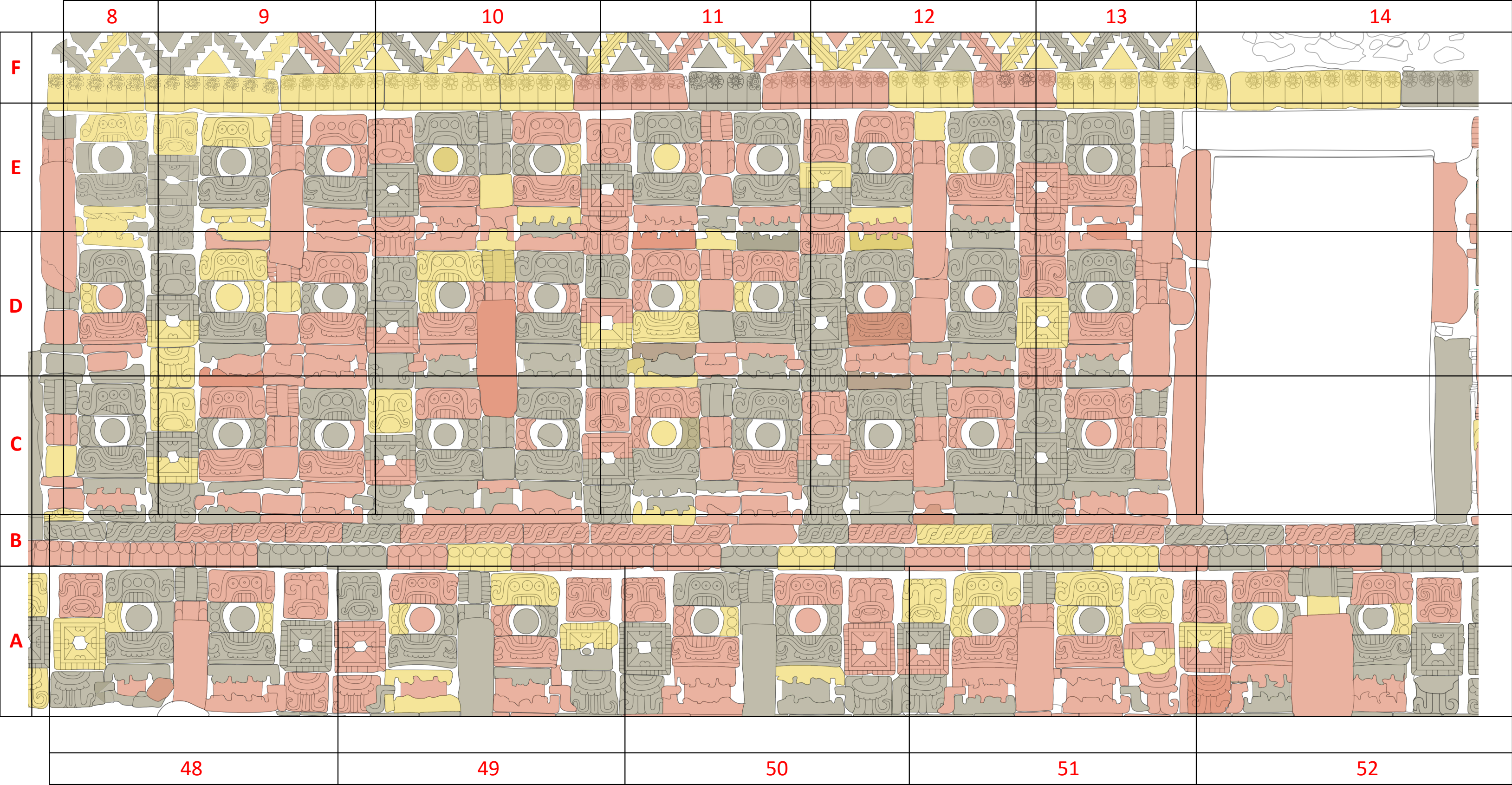
CLAVE: PUC_0002_KAB_E2C6_MOP_FCH_OES_MUR-2_

Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda

Registro Estado de Conservación:
Rest. José Manuel Olvera
Rest. Marian García Espejo

Registro Estado de Conservación:
Septiembre, 2022

Registro Digital:
Febrero, 2024

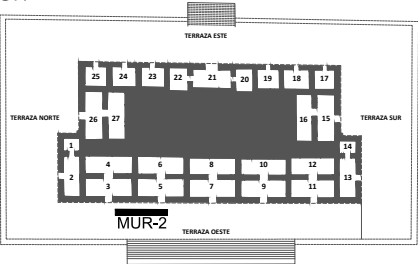


LITOLOGÍA (TEXTURAS CARBONATADAS)

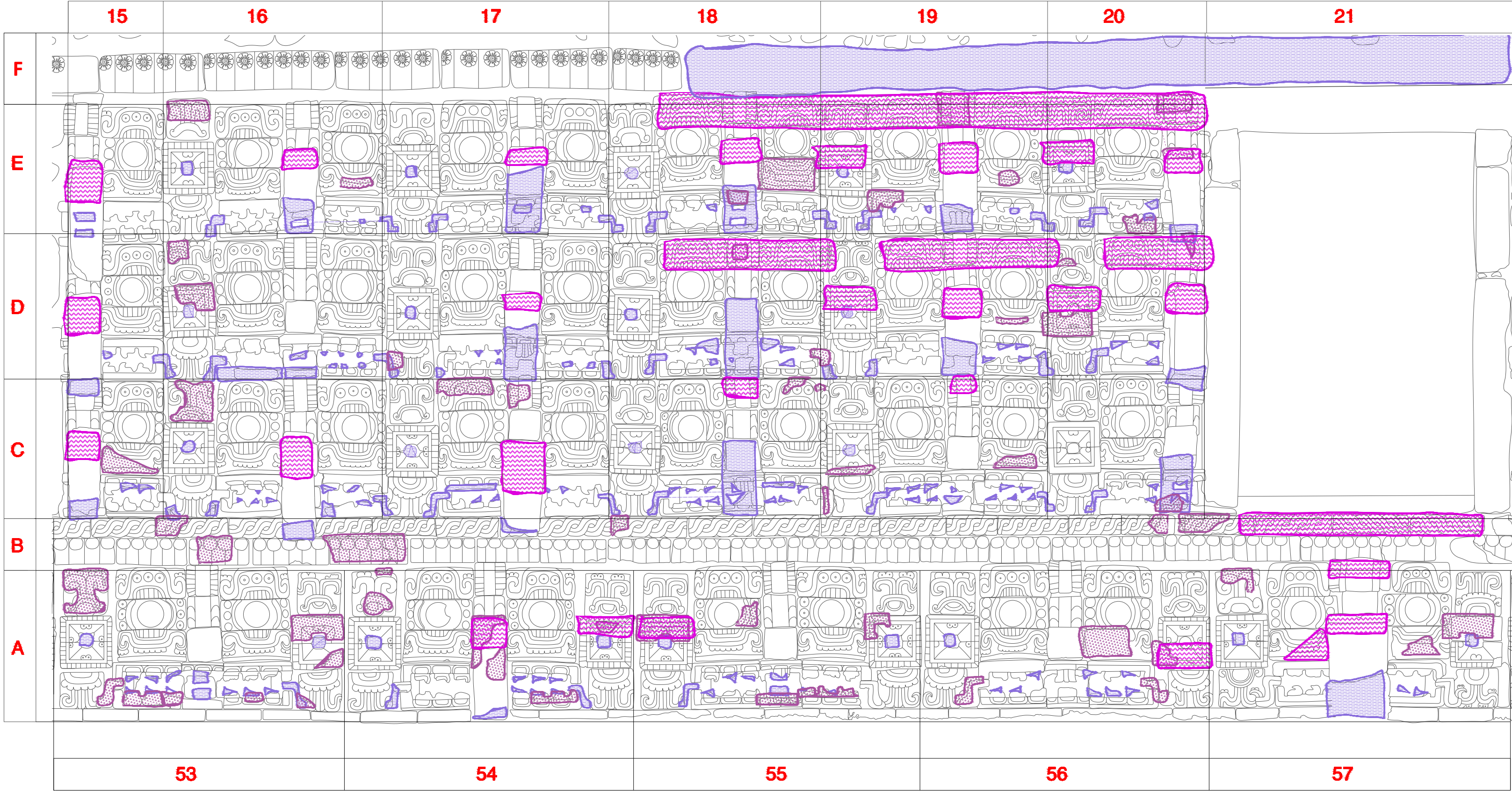
Litología	
Caliza (wackestone)	Núcleo
Brecha calcárea (floatstone)	
Brecha calcárea (rudstone)	

OBSERVACIONES

UBICACIÓN



 INAH Conservación-Restauración Yucatán		Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán		 CONSERVACIÓN RUTA PUUC
Directoras de Proyecto: Mtra. Natalia Hernández Tangarife Mtra. Karla Martínez López		Registro Fotogramétrico: Benjamín Esqueda Lazo de la Vega		
Equipo de Arquitectura: Jesús A. Muñoz Cinta Vidaura A. Cardos Ramírez		Registro Litológico: Ing. Osmara A. Coronado Coronado		
Registro Digital: Arq. Daniela Vargas/ Arq. Kin Durán		Registro Litológico: Diciembre 2022		
		Registro Digital: Marzo 2024		
Clave: PUC_0002_KAB_E2C6_MOP_FCH_OES_MUR-2_ELI				



SIMBOLOGÍA DE ESTADO DE CONSERVACIÓN

d) Desprendimientos

	Oquedades		Disgregación
	Abombamiento		Desp. de estuco
	Pulverulencia		Desp. de piedra
	Otro (especificar)		

e) Pérdida de material

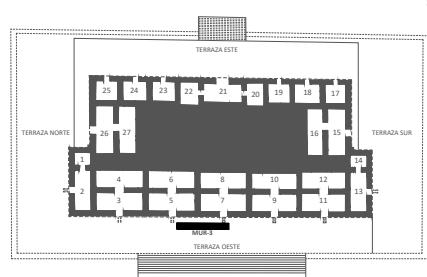
	Delaminación		Escamas
	Exfoliación		Erosión
	Nódulos de hierro		Vetas
	Nódulos (huecos)		Detritos
	Helicoidal		
	Color		Relieve
	Sección Mosaico		Aplanado
	Juntas		Otro (especificar)

f) Presencia de sales

	Velos		Concreciones
	Eflorescencias		Subeflorescencias
	Agujas		Polvo
	Cristales		

OBSERVACIONES

UBICACIÓN:



Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán



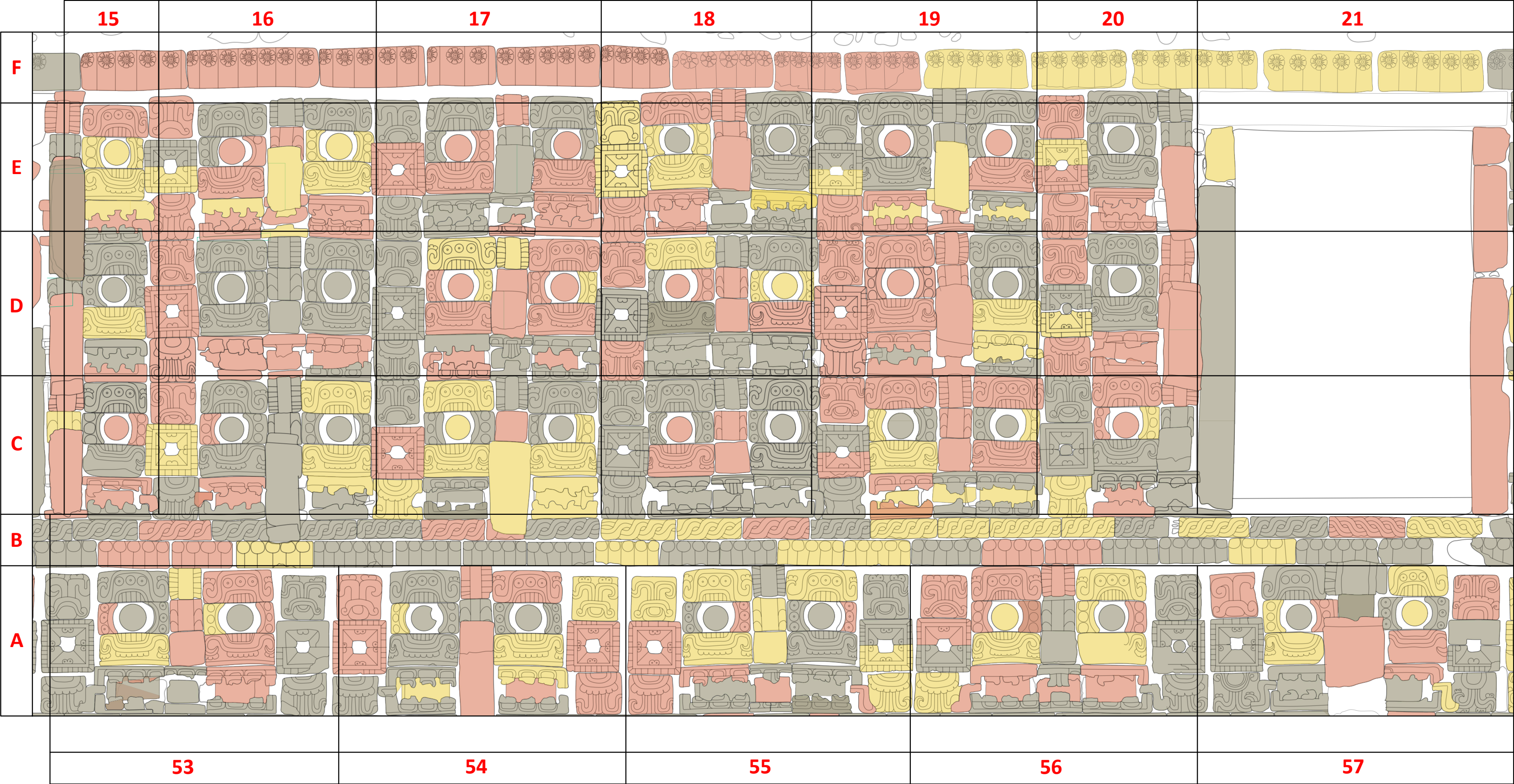
Directoras de Proyecto:
Mtra. Natalia Hernández Tangarife
Mtra. Karla Martínez López

Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda
Registro Estado de Conservación:
Rest. José Manuel Olvera
Rest. Marian García Espejo

Equipo de Arquitectura:
Jesús A. Muñoz Cinta
Vidaura A. Cardos Ramírez

Registro Estado de Conservación:
Septiembre, 2022
Registro Digital:
Febrero, 2024

Registro Digital:
Arq. Daniela Vargas / Arq. Kin Durán
Clave: PUUC_0003_KAB_E2C6_MOP_FCH_OES_MUR-3

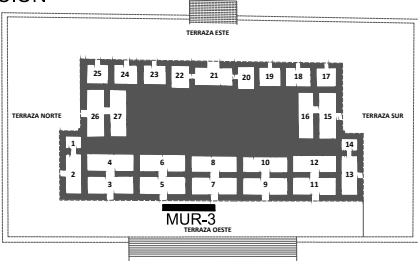


LITOLOGÍA (TEXTURAS CARBONATADAS)

Litología	
Caliza (wackestone)	Núcleo
Brecha calcárea (floatstone)	
Brecha calcárea (rudstone)	

OBSERVACIONES

UBICACIÓN



Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán

Directoras de Proyecto:
Mtra. Natalia Hernández Tangarife
Mtra. Karla Martínez López

Equipo de Arquitectura:
Jesús A. Muñoz Cinta
Vidaura A. Cardos Ramírez

Registro Digital:
Arq. Daniela Vargas/ Arq. Kin Durán

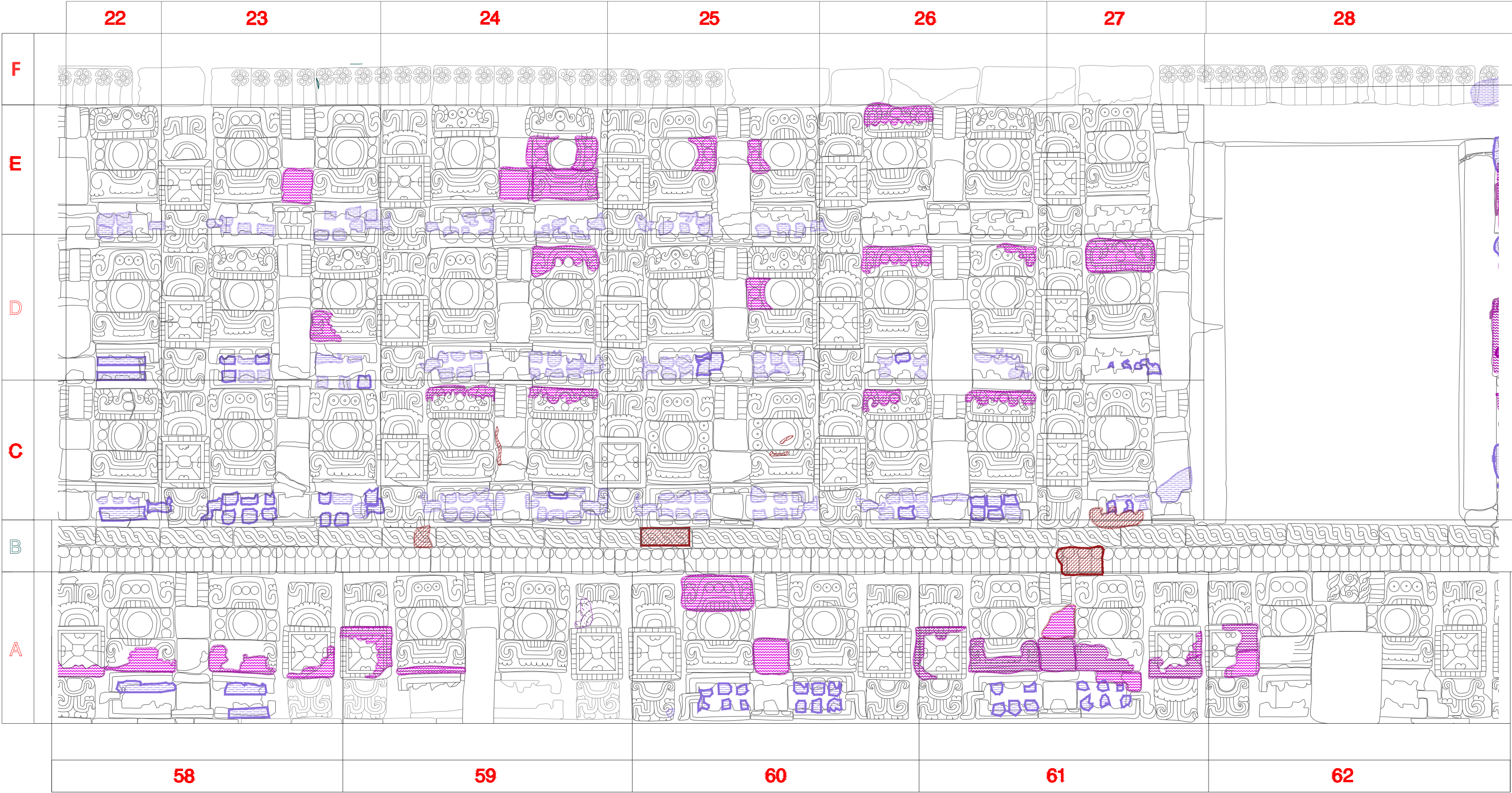
Clave: PUC_0003_KAB_E2C6_MOP_FCH_OES_MUR-3_ELI

Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda Lazo de la Vega

Registro Litológico:
Ing. Osmara A. Coronado Coronado

Registro Litológico:
Diciembre 2022

Registro Digital:
Marzo 2024



SIMBOLOGÍA DE ESTADO DE CONSERVACIÓN

d) Desprendimientos	
	Oquedades
	Abombamiento
	Pulverulencia
	Otro (especificar)

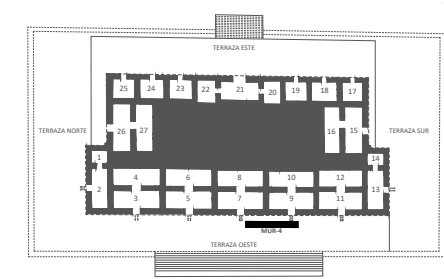
e) Pérdida de material	
	Delaminación
	Exfoliación
	Escamas
	Erosión
	Nódulos de hierro
	Nódulos (huecos)
	Helicoidal
	Vetas
	Detritos
	Color
	Sección Mosaico
	Juntas
	Relieve
	Aplanado
	Otro (especificar)

f) Presencia de sales	
	Velos
	Eflorescencias
	Agujas
	Cristales
	Concreciones
	Subeflorescencias
	Polvo

OBSERVACIONES

LOS NÓDULOS, VETAS Y DETRITOS ESTÁN MARCADOS SEGÚN LA FORMA QUE SE PRESENTAN EN LAS PIEDRAS LABRADAS

UBICACIÓN:



Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán



Directoras de Proyecto:
Mtra. Natalia Hernández Tangarife
Mtra. Karla Martínez López

Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda

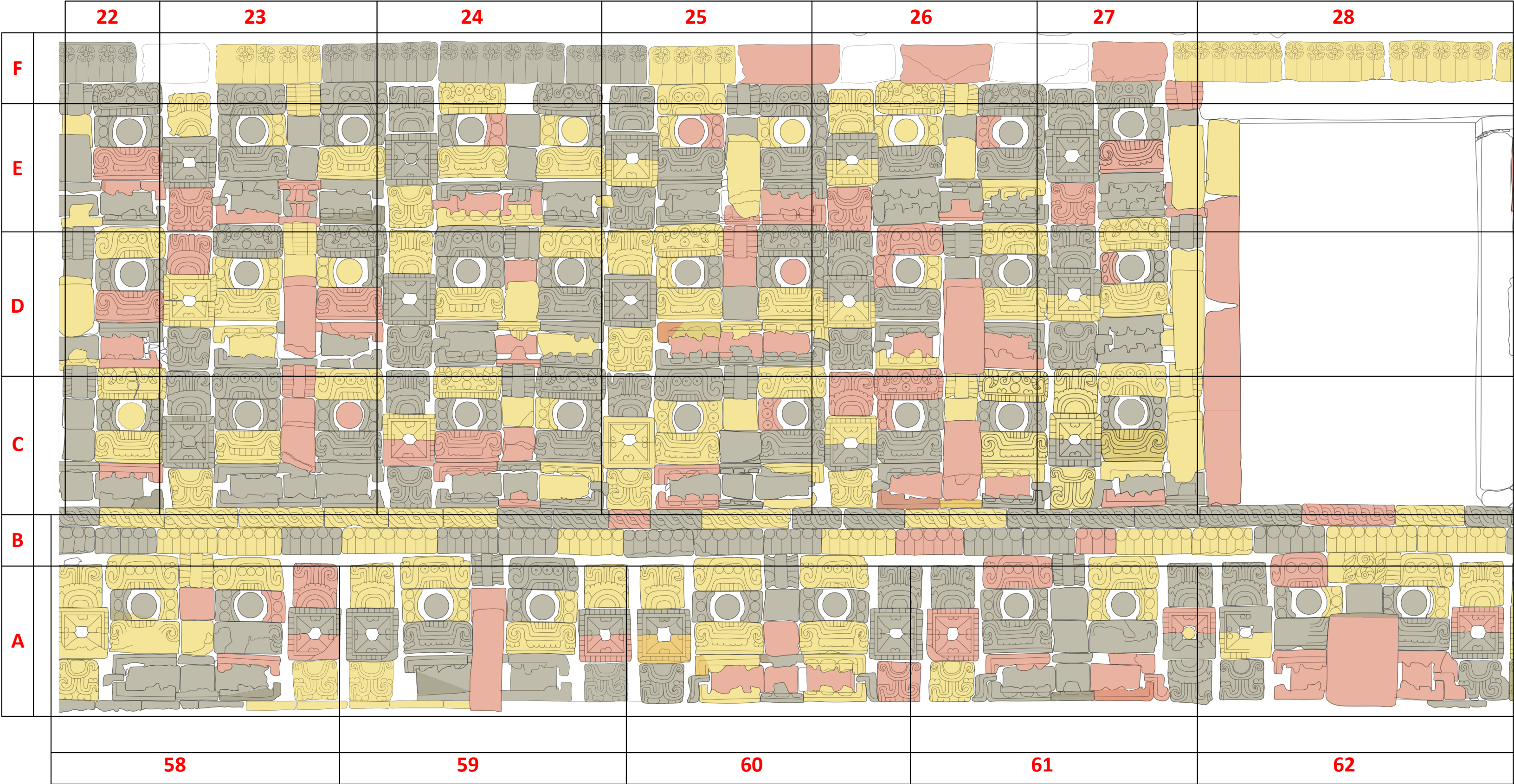
Equipo de Arquitectura:
Jesús A. Muñoz Cinta
Vidaura A. Cardos Ramírez

Registro Estado de Conservación:
Rest. C17 Ariadna Rivera Cardona
Rest/Técnica. C08 Sofía Catalina García

Registro Digital:
Arq. Kin Durán / Arq. Frida Cruz

Registro Estado de Conservación:
Septiembre, 2022
Registro Digital:
Marzo, 2024

Clave: PUUC_0004_KAB_E2C6_MOP_FCH_OES_EEC_B_MUR-4

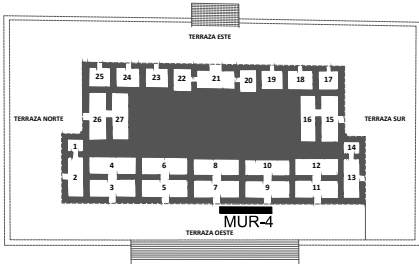


LITOLOGÍA (TEXTURAS CARBONATADAS)

Litología	
Caliza (wackestone)	Núcleo
Brecha calcárea (floatstone)	
Brecha calcárea (rudstone)	

OBSERVACIONES

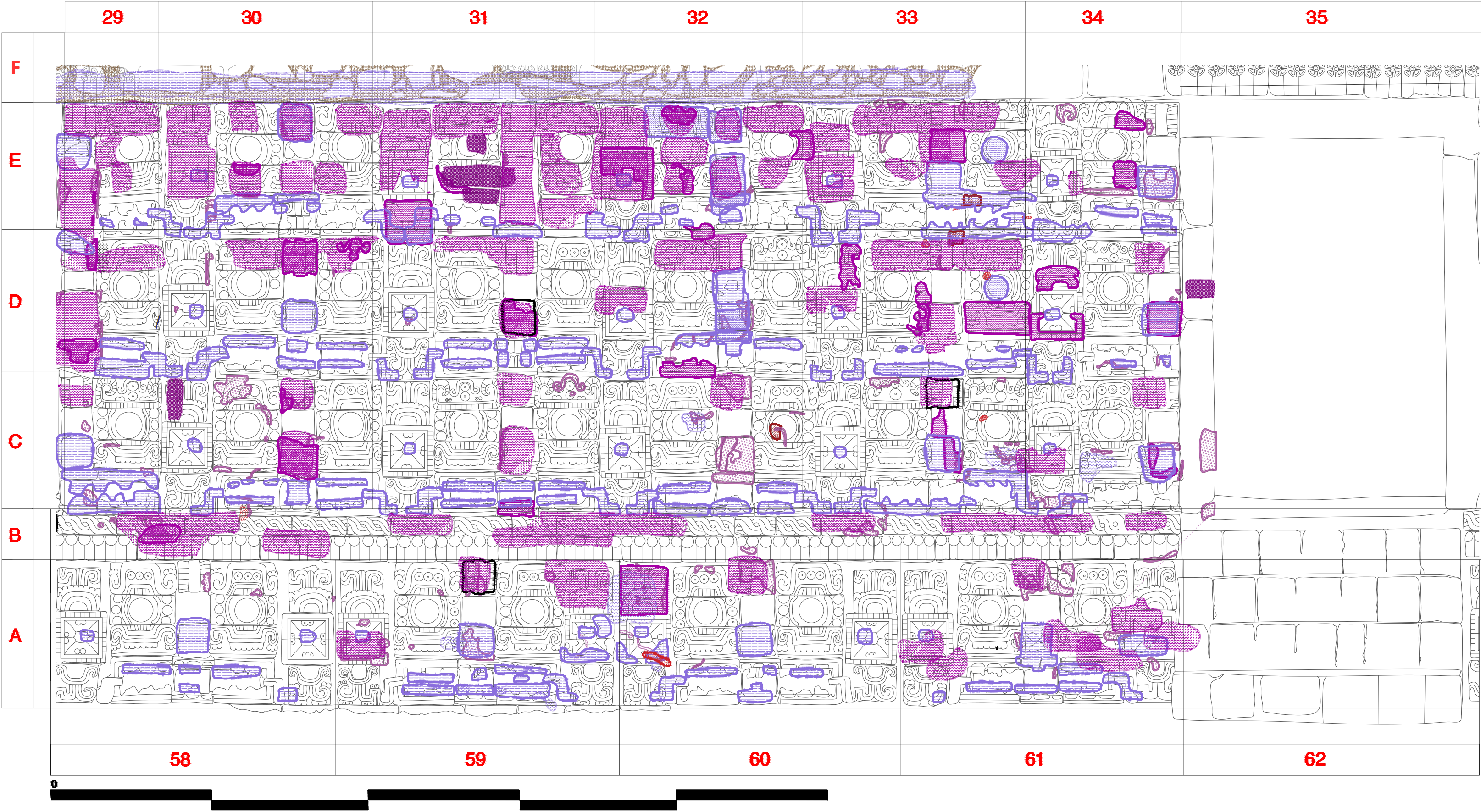
UBICACIÓN



Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán



Directoras de Proyecto: Mtra. Natalia Hernández Tangarife Mtra. Karla Martínez López	Registro Fotogramétrico: Benjamín Esqueda Lazo de la Vega
Equipo de Arquitectura: Jesús A. Muñoz Cinta Vidaura A. Cardos Ramírez	Registro Litológico: Ing. Osmara A. Coronado Coronado
Registro Digital: Arq. Daniela Vargas/ Arq. Kin Durán	Registro Litológico: Febrero 2023
Clave: PUC_0004_KAB_E2C6_MOP_FCH_OES_MUR-4_ELI	Registro Digital: Marzo 2024



SIMBOLOGÍA DE ESTADO DE CONSERVACIÓN

d) Desprendimientos

- Oquedades
- Abombamiento
- Pulverulencia
- Otro (especificar)

e) Pérdida de material

- Disgregación
- Desp. de estuco
- Desp. de piedra

f) Presencia de sales

- Velos
- Eflorescencias
- Agujas
- Cristales
- Concreciones
- Subeflorescencias
- Polvo

Pérdida diferencial

- Delaminación
- Exfoliación
- Escamas
- Erosión

Pérdida de elementos

- Nodulos de hierro
- Nodulos (huecos)
- Helicoidal
- Vetas
- Detritos
- Color
- Sección Mosaico
- Juntas
- Relieve
- Aplanado
- Otro (especificar)

OBSERVACIONES

UBICACIÓN:

Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán

Directoras de Proyecto:
Mtra. Natalia Hernández Tangarife
Mtra. Karla Martínez López

Equipo de Arquitectura:
Jesús A. Muñoz Cinta
Vidaura A. Cardos Ramírez

Registro Digital:
Arq. Kin Durán / Arq. Frida Cruz

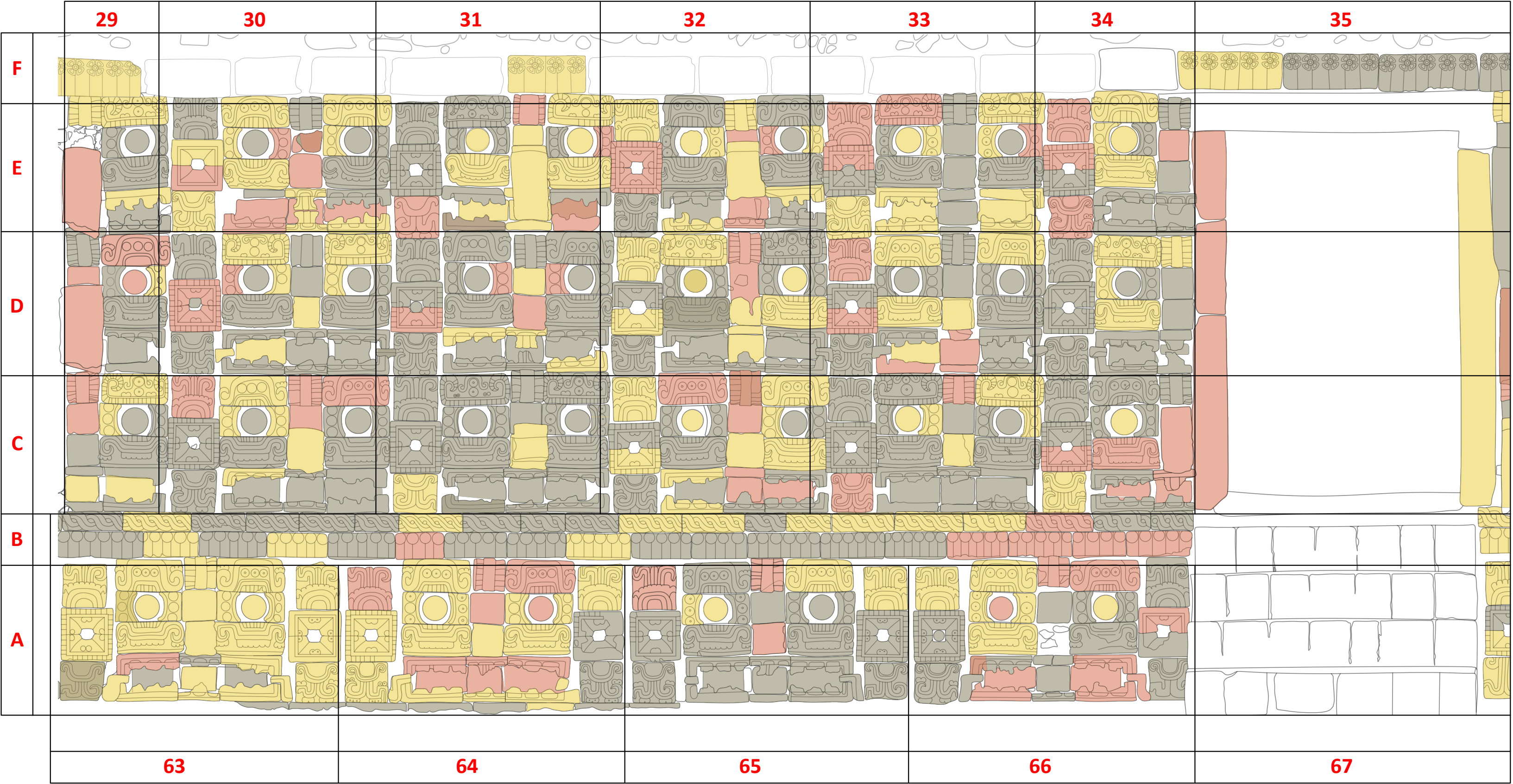
Clave: PUUC_0004_KAB_E2C6_MOP_FCH_OES_EEC_B_MUR-5

Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda

Registro Estado de Conservación:
Rest. José Manuel Olvera
Rest. Marian García Espejo

Registro Estado de Conservación:
Septiembre, 2022

Registro Digital:
Marzo, 2024

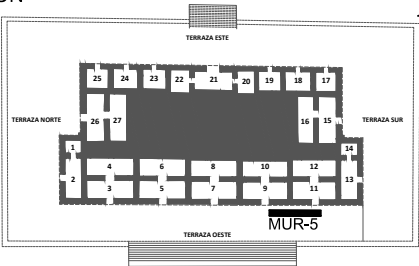


LITOLOGÍA (TEXTURAS CARBONATADAS)

Litología	
Caliza (wackestone)	Núcleo
Brecha calcárea (floatstone)	
Brecha calcárea (rudstone)	

OBSERVACIONES

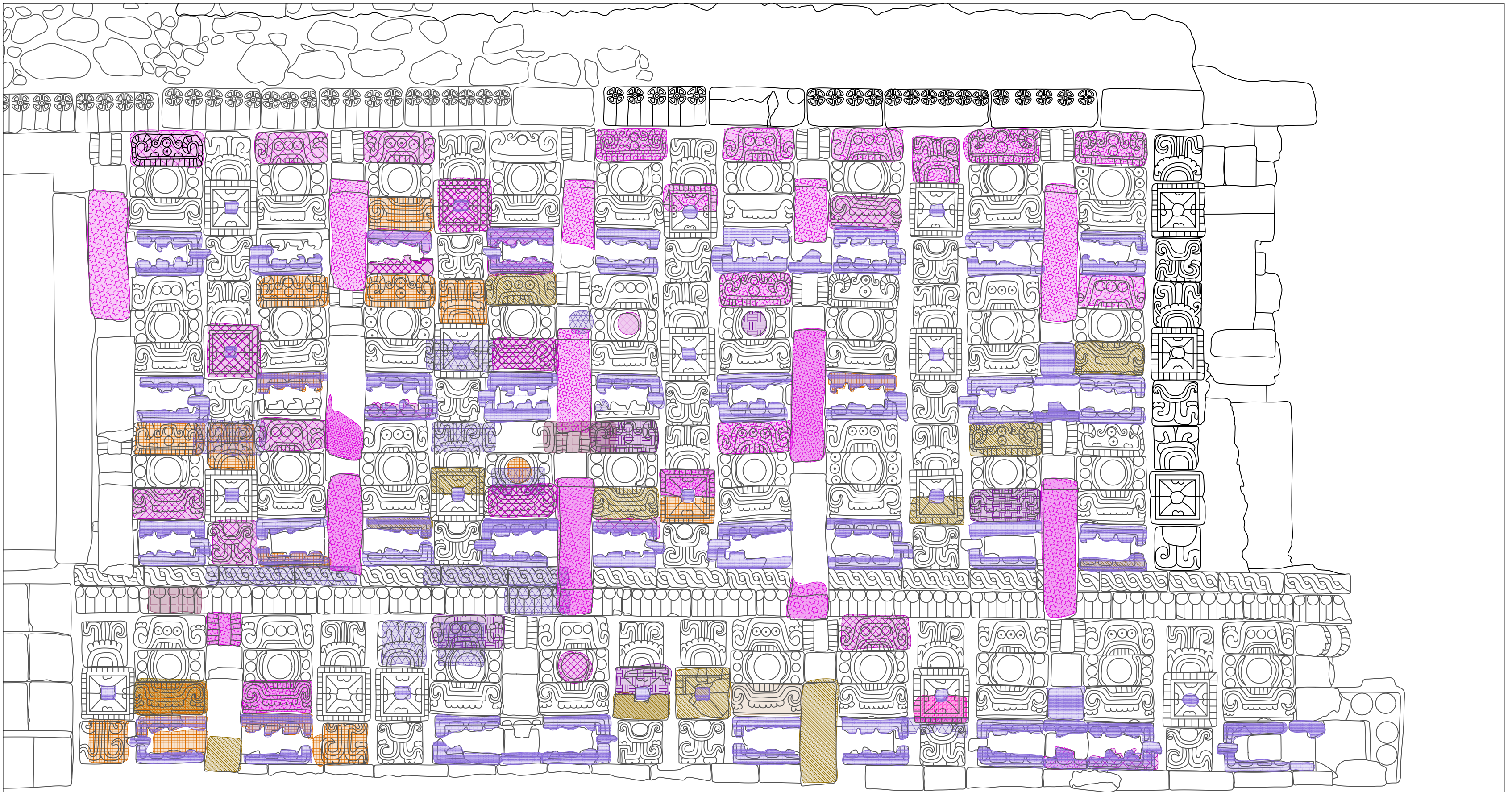
UBICACIÓN



Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán



Directoras de Proyecto: Mtra. Natalia Hernández Tangarife Mtra. Karla Martínez López	Registro Fotogramétrico: Benjamín Esqueda Lazo de la Vega
Equipo de Arquitectura: Jesús A. Muñoz Cinta Vidaura A. Cardos Ramírez	Registro Litológico: Ing. Osmara A. Coronado Coronado
Registro Digital: Arq. Daniela Vargas/ Arq. Kin Durán	Registro Litológico: Febrero 2023
	Registro Digital: Marzo 2024
Clave: PUC_0005_KAB_E2C6_MOP_FCH_OES_MUR-5_ELI	



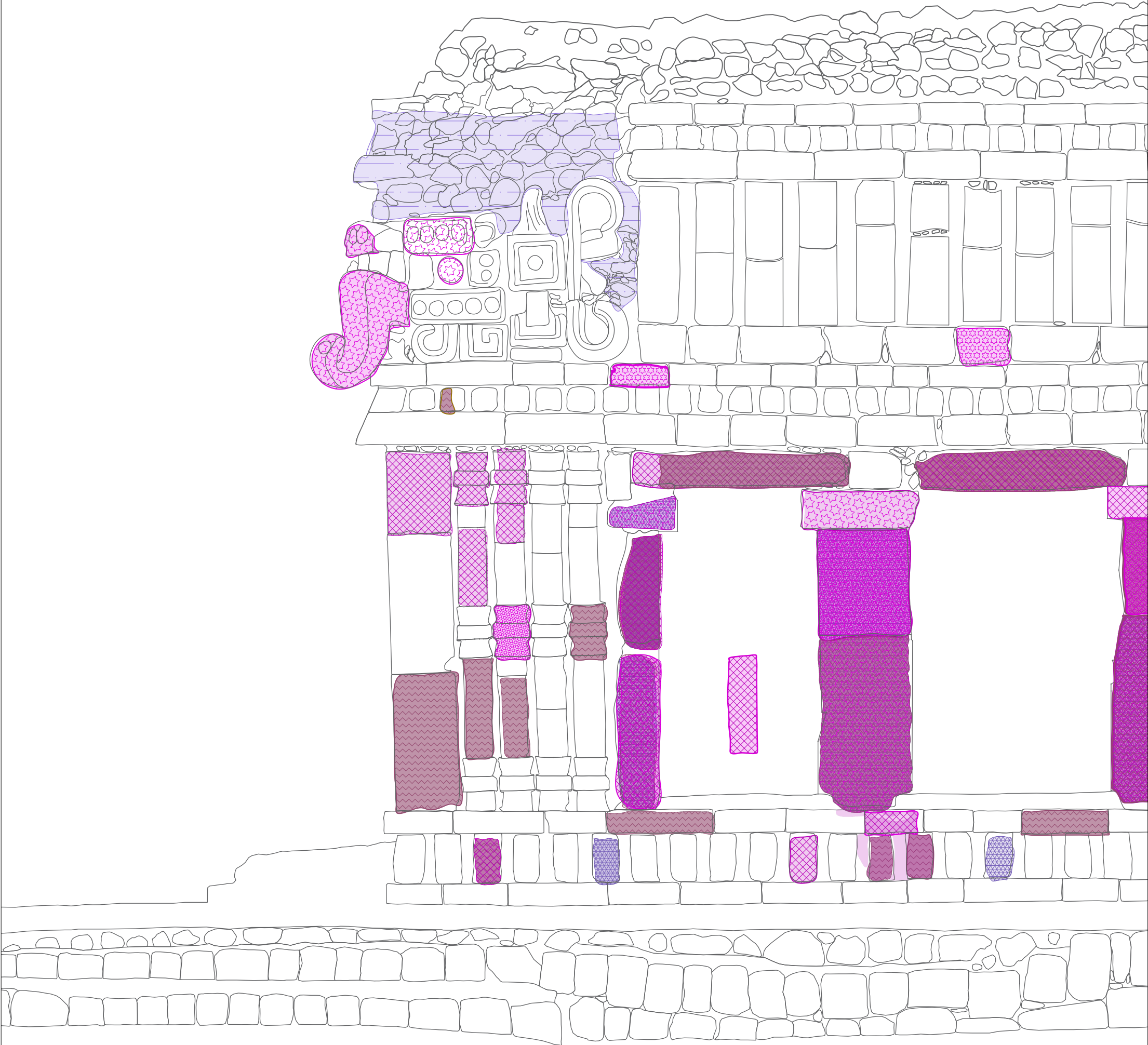
SIMBOLOGÍA DE ESTADO DE CONSERVACIÓN

a) Presencia biológica		b) Fuentes de humedad		e) Pérdida de material		f) Presencia de sales		h) Daños antropogénicos	
Microorganismos (activos/inactivos)		c) Fracturas en piedra y aplanado		Pérdida diferencial		g) Intervenciones anteriores		i) Alteración cromática	
Liquen	Lichen costroso	Mancha humedad	Filtraciones	Delaminación	Escamas	Velos	Concreciones	Golpes	Incisiones
Musgo	Hongos	Condensación	Capilaridad	Exfoliación	Erosión	Eflorescencias	Subeflorescencias	Graffiti	Marcado
Biopelícula verde	Biopelícula negra	Ecurrimientos	Otro (especificar)	Nodulos de hierro	Vetas	Agujas	Polvo	Abrasión	Esgrafiado
Algas	Algas naranjas	Desfases	Grietas	Nodulos Mosaico	Detritos	Cristales			
Flora		Fisuras	Fracturas	Pérdida de elementos		h) Intervenciones anteriores		i) Alteración cromática	
Planta superior	Planta inferior	Craqueladuras	Otro (especificar)	Color Mosaico	Relieve	Recubrimiento y/o agregado sintético	Cemento	Coloración	Decoloración
Marcas de raíces		d) Desprendimientos	Disgregación	Mosaico Juntas	Aplanado	Resanes: Cal	Cemento	Otro (especificar)	
Fauna		Oquedades	Desp. de estuco	Reintegración volumétrica	Restos de estuco og	Reintegración cromática	Restos de aplanado		
Vertebrados	Invertebrados	Abombamiento	Desp. de piedra	Reintegración cromática	Piso	Manchas	Resanes Sacrificio		
Excretas y deyecciones	Nidos	Pulverulencia		Impermeabilización		Otro (especificar)			
Otro (arácnido)		Otro (especificar)						CLAVE: PUC_0006_KAB_E2C6_MOP_FCH_OES_MUR-6_EEC-I	



Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda
Registro Digital:
Jesús Muñoz / Vidaura Cardos
Registro Estado de Conservación:

Fecha: Marzo, 2025

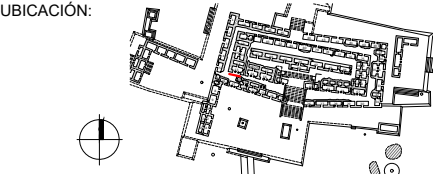


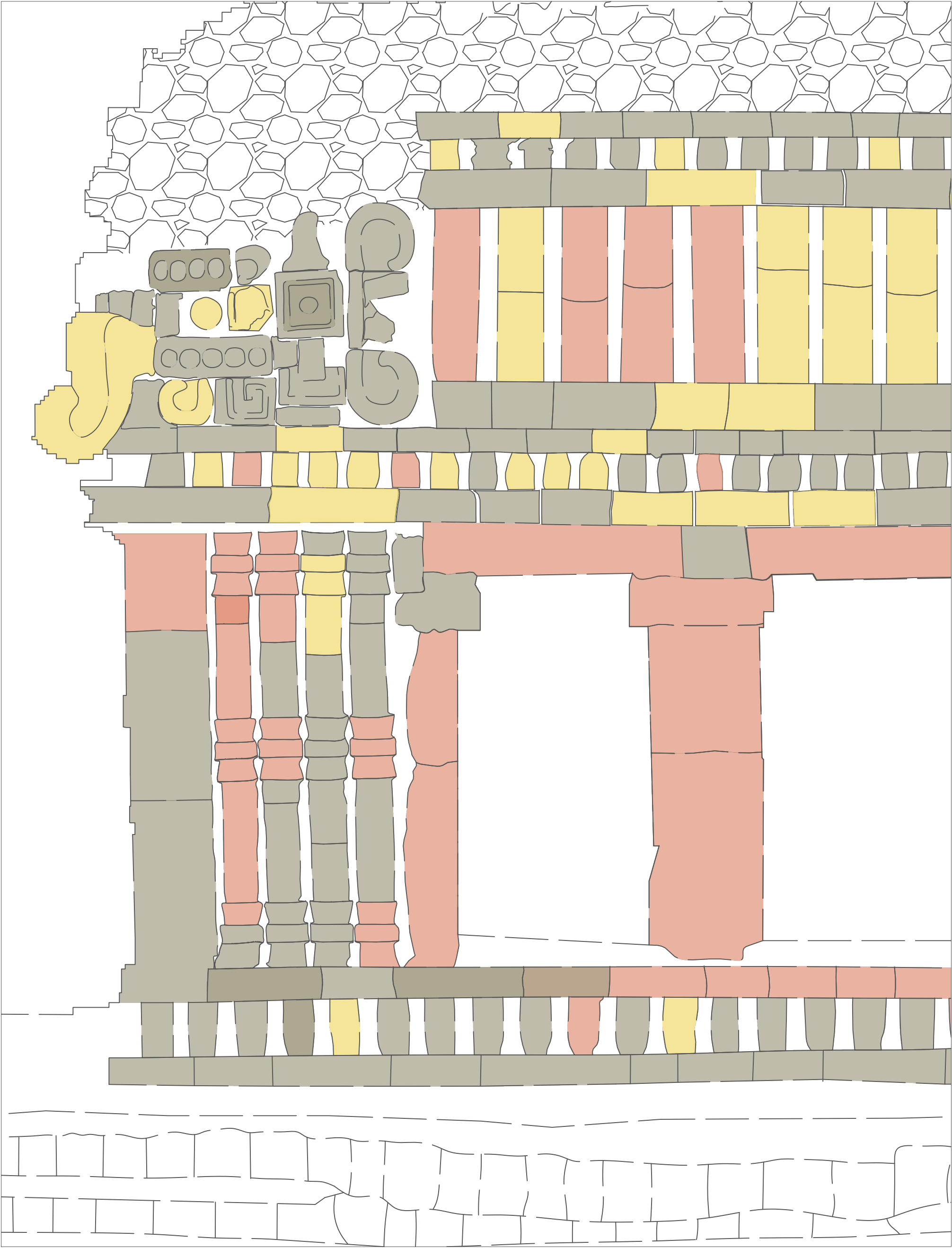
SIMBOLOGÍA DE ESTADO DE CONSERVACIÓN

e) Pérdida de material				
Pérdida diferencial		Delaminación		Escamas
		Exfoliación		Erosión
		Nódulos de hierro		Vetas
		Nódulos (huecos)		Detritos
		Helicoidal		
Pérdida de elementos:		Color		Relieve
		Mosaico		Aplanado
		Juntas		Piedra



Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda Lazo de la Vega
Registro estado de Conservación:
Luz Fabiola González
Registro Digital: Melissa Vázquez
Fecha: Marzo, 2024
Dirección de Proyecto: Natalia Hernández Tangarife
CLAVE: PUC_0076_SAY_E2B1-N2_MOP_FCH_SUR_FRI-1





LITOLOGÍA (TEXTURAS CARBONATADAS)

Litología	
Caliza (wackestone)	Núcleo
Brecha calcárea (floatstone)	
Brecha calcárea (rudstone)	

OBSERVACIONES

UBICACIÓN





Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán

Directoras del Proyecto:
Mtra. Natalia Hernández Tangarife
Mtra. Karla Martínez López

Equipo de Arquitectura:
Jesús A. Muñoz Cinta
Vidaura A. Cardos Ramírez

Registro Litológico:
Marzo 2023

Registro Digital:
Ricardo Luján

Clave: PUUC_0076_SAY_E2B1-N2_MOP_FCH_SUR_FRI-1_ELI

Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda Lazo de la Vega

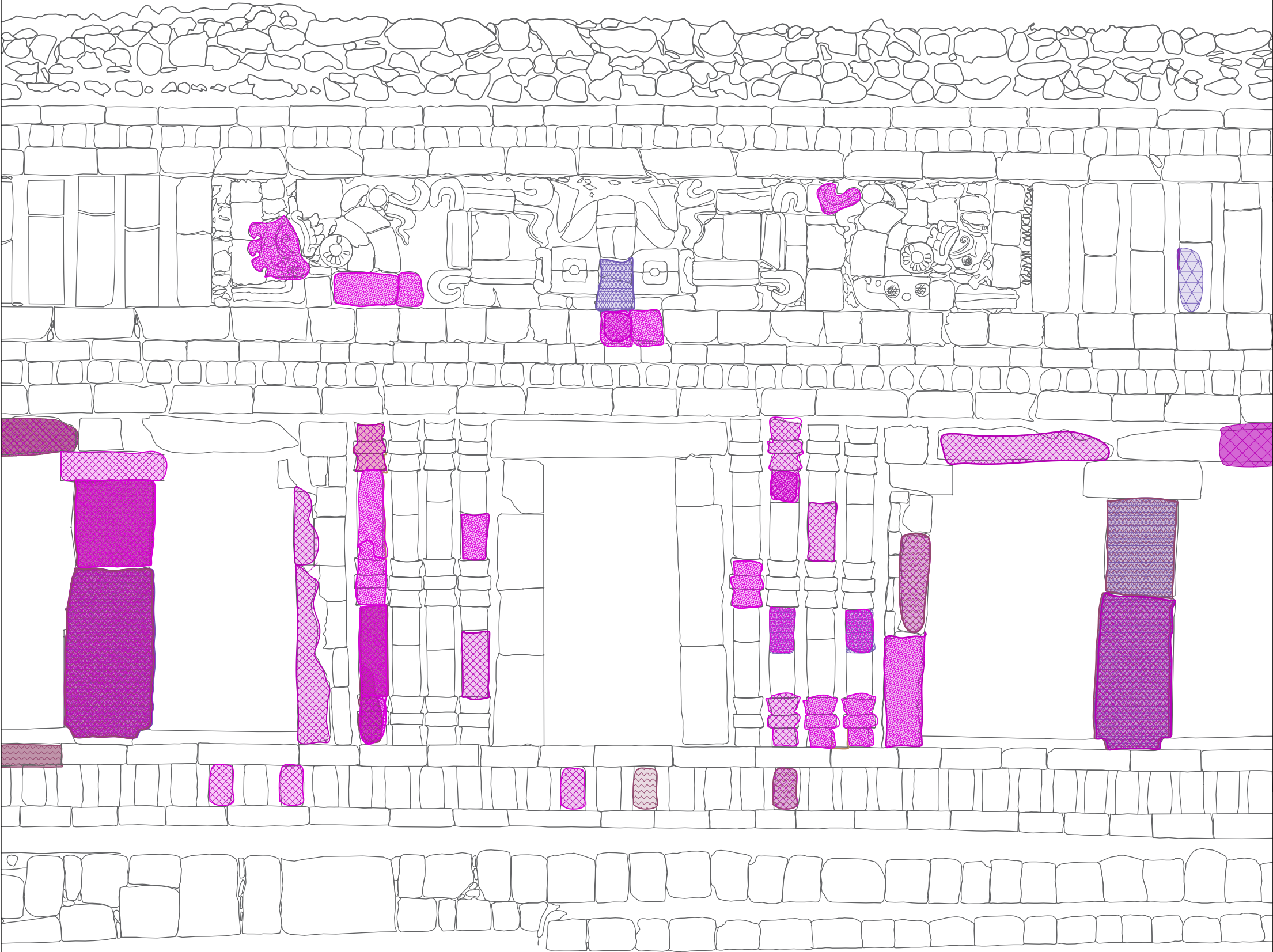
Registro Litológico:
Ing. Osmara A. Coronado Coronado

Registro Litológico:
Marzo 2023

Registro Digital:
Marzo 2024



CONSERVACIÓN
RUTA PUUC



SIMBOLOGÍA DE ESTADO DE CONSERVACIÓN

e) Pérdida de material				
Pérdida diferencial		Delaminación		Escamas
		Exfoliación		Erosión
		Nódulos de hierro		Vetas
		Nódulos (huecos)		Detritos
		Helicoidal		
Pérdida de elementos:		Color		Relieve
		Mosaico		Aplanado
		Juntas		Piedra



INAH
Conservación - Restauración
Yucatán



CONSERVACIÓN
RUTA PUUC

Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda Lazo de la Vega

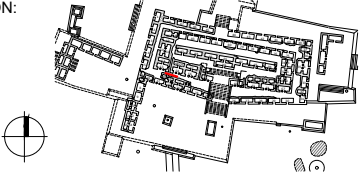
Registro estado de Conservación:
Luz Fabiola González

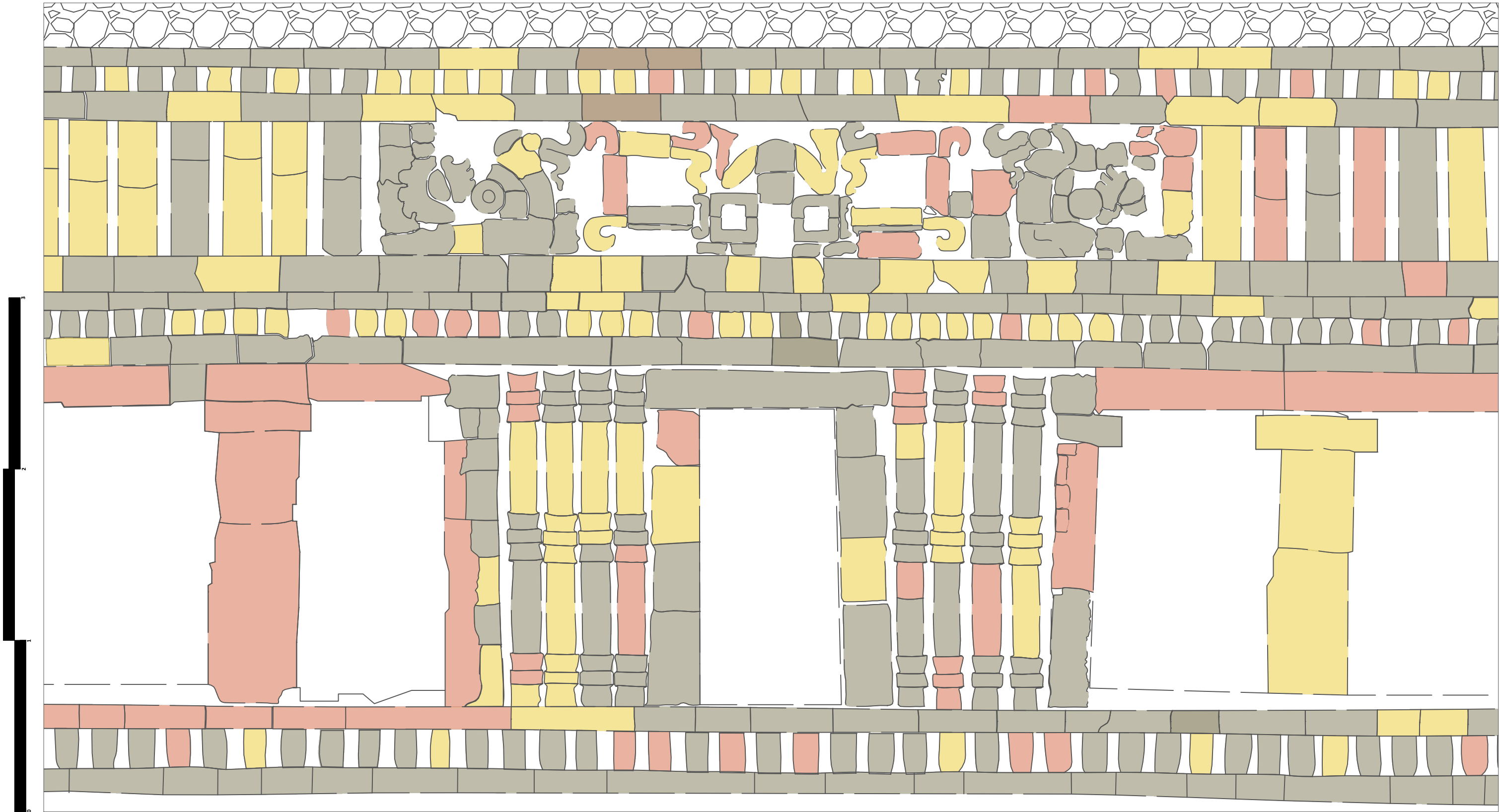
Registro Digital: Melissa Vázquez	Fecha: Marzo, 2024
---	---------------------------

Dirección de Proyecto:
Natalia Hernández Tangarife

CLAVE: PUC_0077_SAY_E2B1-N2_MOP_FCH_SUR_FRI-2

UBICACIÓN:





LITOLOGÍA (TEXTURAS CARBONATADAS)

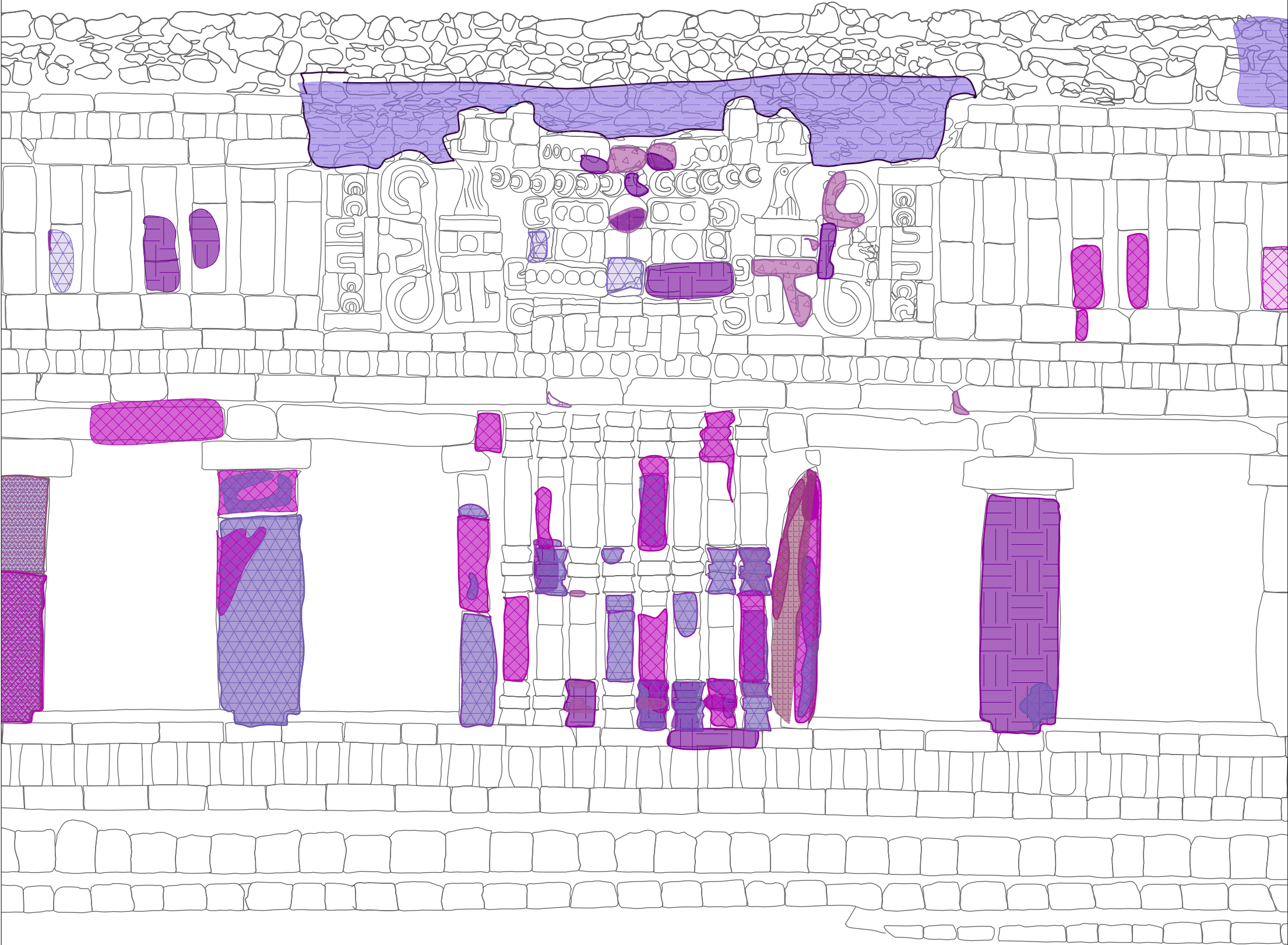
Litología	
 Caliza (wackestone)	 Núcleo
 Brecha calcárea (floatstone)	
 Brecha calcárea (rudstone)	

OBSERVACIONES

UBICACIÓN



 INAH Conservación-Restauración Yucatán	Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolónchén y Santa Elena, Yucatán	
Directoras del Proyecto: Mtra. Natalia Hernández Tangarife Mtra. Karla Martínez López		Registro Fotogramétrico: Benjamín Esqueda Lazo de la Vega
Equipo de Arquitectura: Jesús A. Muñoz Cinta Vidaura A. Cardos Ramírez		Registro Litológico: Ing. Osmara A. Coronado Coronado
Registro Digital: Ricardo Luján		Registro Litológico: Marzo 2023 Registro Digital: Marzo 2024
Clave: PUUC_0077_SAY_E2B1-N2_MOP_FCH_SUR_FRI-2_ELI		

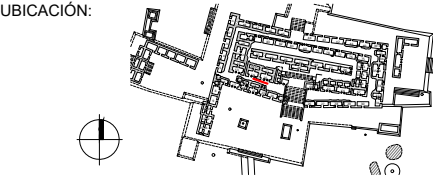


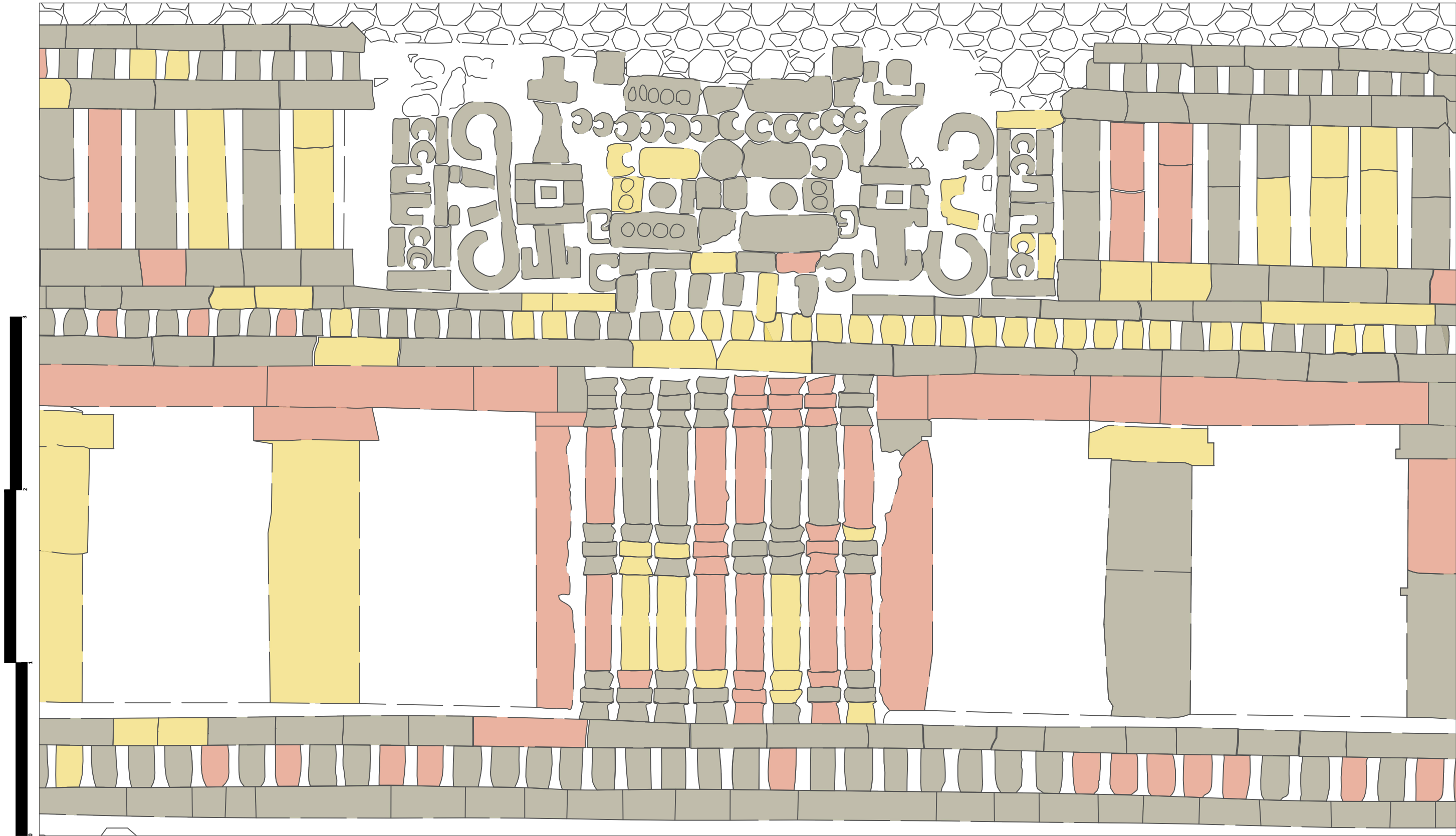
SIMBOLOGÍA DE ESTADO DE CONSERVACIÓN

e) Pérdida de material				
Pérdida diferencial		Delaminación		Escamas
		Exfoliación		Erosión
		Nódulos de hierro		Vetas
		Nódulos (huecos)		Detritos
		Helicoidal		
Pérdida de elementos:		Color		Relieve
		Mosaico		Aplanado
		Juntas		Piedra



Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda Lazo de la Vega
Registro estado de Conservación:
Luz Fabiola González
Registro Digital: Melissa Vázquez
Fecha: Marzo, 2024
Dirección de Proyecto: Natalia Hernández Tangarife
CLAVE: PUC_0078_SAY_E2B1-N2_MOP_FCH_SUR_FRI-3





LITOLOGÍA (TEXTURAS CARBONATADAS)

Litología		OBSERVACIONES	UBICACIÓN		Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolonchén y Santa Elena, Yucatán				
	Caliza (wackestone)								
	Brecha calcárea (floatstone)								
	Brecha calcárea (rudstone)								
	Núcleo								



Directoras del Proyecto:
Mtra. Natalia Hernández Tangarife
Mtra. Karla Martínez López

Equipo de Arquitectura:
Jesús A. Muñoz Cinta
Vidaura A. Cardos Ramírez

Registro Digital:
Ricardo Luján

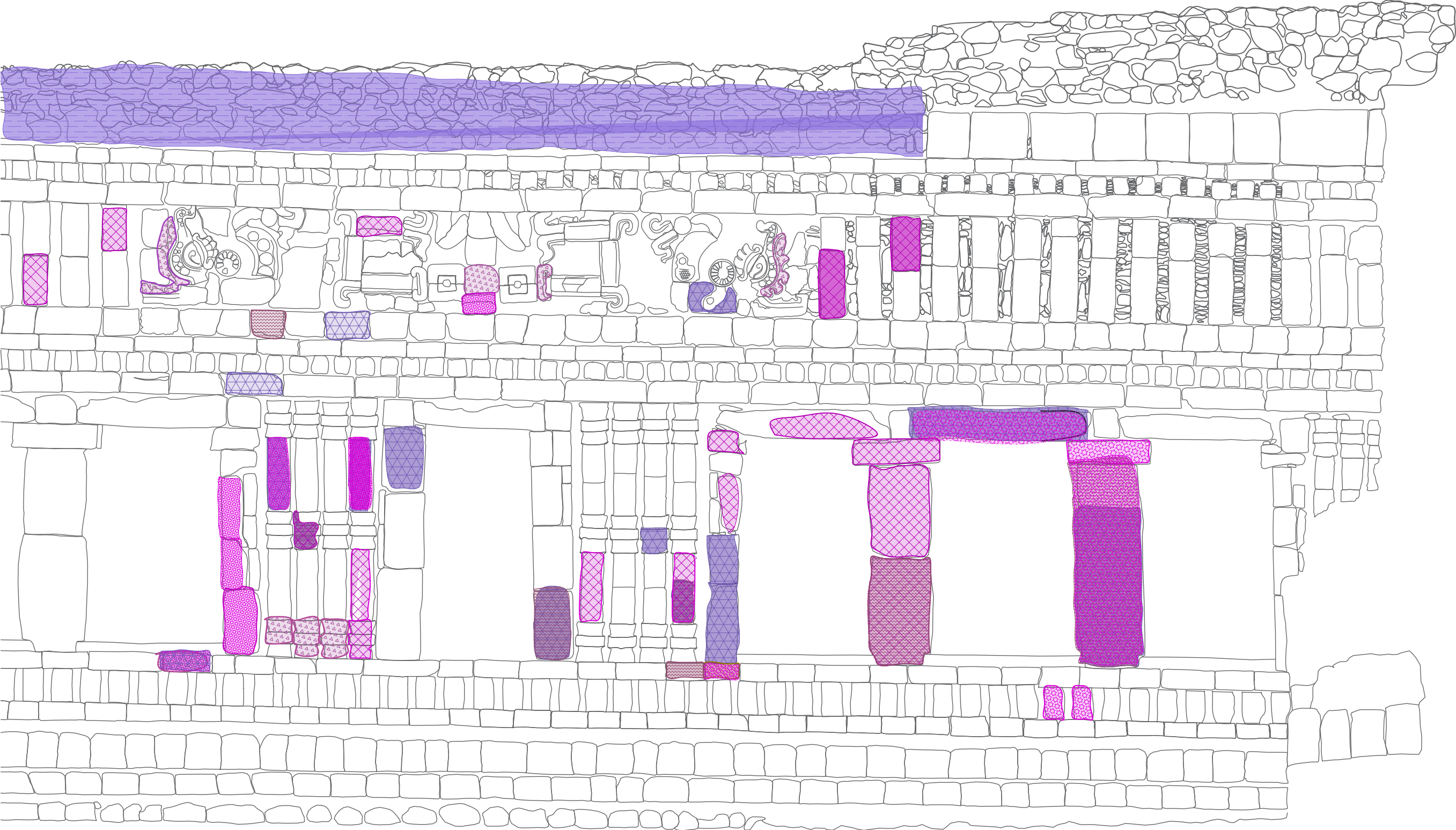
Clave: PUUC_0078_SAY_E2B1-N2_MOP_FCH_SUR_FRI-3_ELI

Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda Lazo de la Vega

Registro Litológico:
Ing. Osmara A. Coronado Coronado

Registro Litológico:
Marzo 2023

Registro Digital:
Marzo 2024



SIMBOLOGÍA DE ESTADO DE CONSERVACIÓN

e) Pérdida de material				
Pérdida diferencial		Delaminación		Escamas
		Exfoliación		Erosión
		Nódulos de hierro		Vetas
		Nódulos (huecos)		Detritos
		Helicoidal		
Pérdida de elementos:		Color		Relieve
		Mosaico		Aplanado
		Juntas		Piedra

UBICACIÓN:

INAH
Conservación - Restauración
Yucatán

CONSERVACIÓN
RUTA PUUC

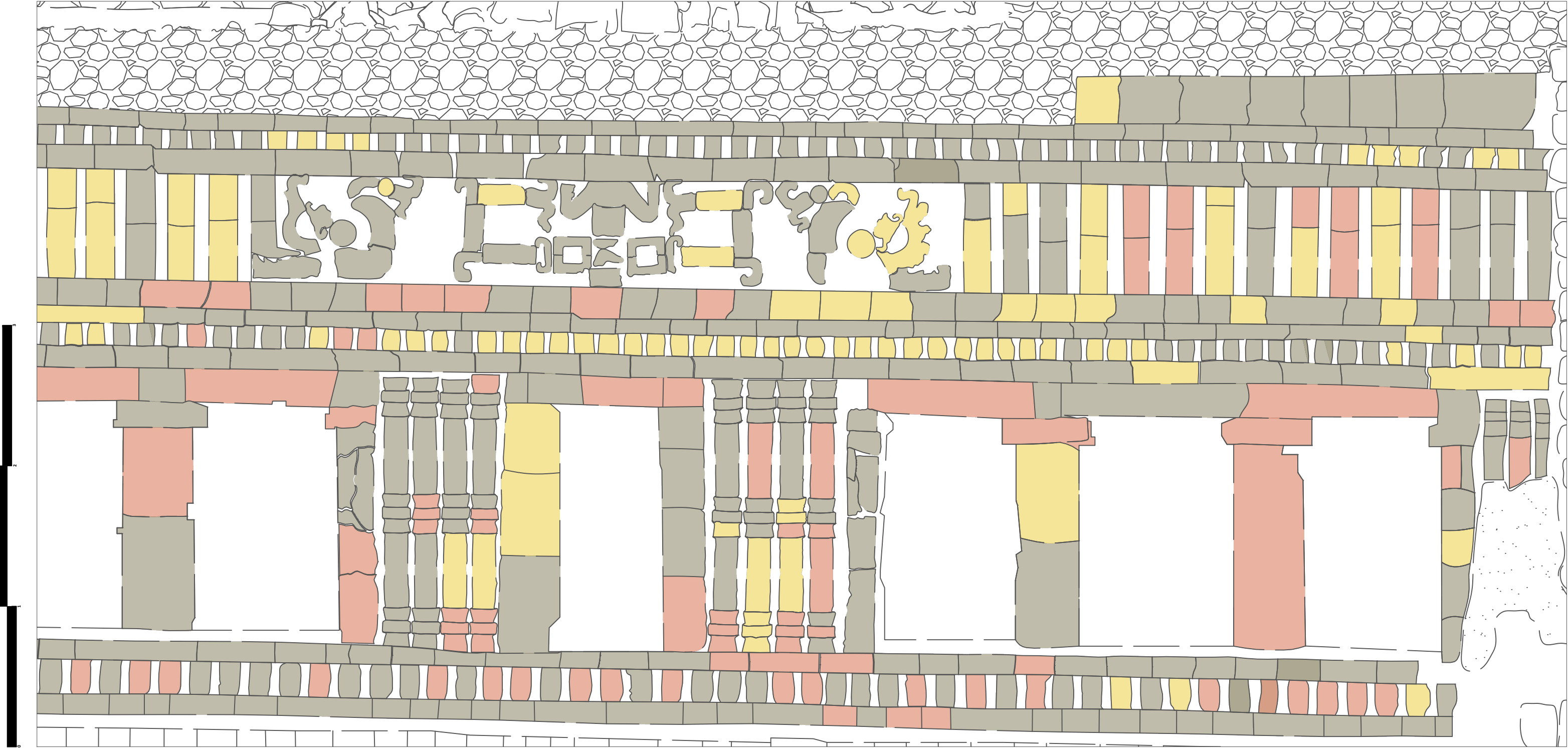
Registro Fotogramétrico:
Benjamín Esqueda Lazo de la Vega

Registro Estado de Conservación:
Luz Fabiola González

Registro Digital: **Fecha:**
Melissa Vázquez | Diciembre, 2024

Dirección de proyecto
Natalia Hernández Tangarife

CLAVE:PUC_0079_SAY_E2B1-N2_MOP_FCH_SUR_FRI-4



LITOLOGÍA (TEXTURAS CARBONATADAS)

Litología	
 Caliza (wackestone)	 Núcleo
 Brecha calcárea (floatstone)	
 Brecha calcárea (rudstone)	

OBSERVACIONES

UBICACIÓN



 INAH Conservación-Restauración Yucatán	Proyecto de Conservación y Restauración de la piedra labrada y acabados de estuco de la arquitectura Puuc del Distrito de Bolónchén y Santa Elena, Yucatán	
Directoras del Proyecto: Mtra. Natalia Hernández Tangarife Mtra. Karla Martínez López		Registro Fotogramétrico: Benjamín Esqueda Lazo de la Vega
Equipo de Arquitectura: Jesús A. Muñoz Cinta Vidaura A. Cardos Ramírez		Registro Litológico: Ing. Osmara A. Coronado Coronado
Registro Digital: Ricardo Luján		Registro Litológico: Marzo 2023 Registro Digital: Marzo 2024
Clave: PUUC_0079_SAY_E2B1-N2_MOP_FCH_SUR_FRI-4_ELI		

Anexo 4. Descripción petrográfica de las rocas carbonatadas.

KABAH

Muestra 20

En muestra de mano la roca presenta un color rosa grisáceo (5R8/2) de grano muy fino y compacto, con poros mayores a 1 mm en la matriz. En lámina delgada, se observaron relictos de la matriz micrítica (zonas oscuras) por lo que posiblemente fue un mudstone antes de ser diagenetizada.

Contiene cristales en mosaico de calcita recrystalizada, la textura de los cristales es subhedral a anhedral con fábrica equigranular específicamente hipidiotópica (hypidiotopic). Además, se identificaron birdeyes (cavidades rellenas por esparita de escala milimétrica) exhibiendo formas irregulares, típicos de ambientes intermareales (Lámina 1).

Dunham: Textura original no reconocible: carbonatos cristalinos. / Folk: Dismicrita

Muestra 21

La roca en muestra de mano presenta un color gris amarillento (5Y 8/1) en los clastos, mientras que la matriz posee un rosa moderado a anaranjado (5Y 8/4). Presenta clastos angulares a subangulares, mal clasificados que van desde 1 mm a 1.5 cm (Lámina 1).

En lámina delgada se observaron las siguientes características:

21a: matriz micrítica oxidada (30%) con intraclastos como componentes no esqueléticos mayores a 2 mm (65%) y componentes esqueléticos (5%) como foraminíferos bentónicos y fragmentos de braquiópodos con endopuntata, la fábrica es grano soportado.

Embry y Klovan: Rudstone / Folk: Intrabiomicrudita / Ambiente de depósito: Rampa media.

RMF 9

21b: matriz micrítica (75%) con componentes (15%) como foraminíferos bentónicos, pellets y fragmentos de bivalvos (rotalínidos), la fábrica es lodo soportado. Contiene porosidad primaria, la cual es de mayor a 18%.

Dunham: Wackestone / Folk: Biomicrita / Ambiente de depósito: Rampa media. RMF 9

Muestra 22

La roca en muestra de mano exhibe un color gris amarillento (5Y 8/1) en los clastos, mientras que la matriz posee un naranja rojizo (10R 6/6). Los clastos son subangulares y se encuentran mal clasificados (Lámina 1).

La roca estaba siendo diagenetizada por lo que se observan dos texturas predominantes en lámina delgada:

22b: matriz micrítica (95%) con intraclastos como componentes (5%), además presenta porosidad primaria que oscila en rangos de 10 a 18%.

Dunham: Mudstone / Folk: Micrita / Ambiente de depósito: Rampa media. RMF 2, 5

22d: matriz micrítica (85%) con intraclastos como componentes (15%) los cuales se encuentran dolomitizados y éstos presentan una textura grainstone. La fábrica es lodo soportados y son mayores a 2 mm.

Embry y Klovan: Floatstone / Folk: Intramicrudita/ Ambiente de depósito: Rampa media.

RMF 9

Muestra 23

La roca se caracteriza por un color gris amarillento (5Y 8/1) en los clastos, mientras que la matriz posee un naranja rojizo (10R 6/6). Predominan los clastos subangulares y se encuentran mal clasificados.

En lámina delgada, presenta una matriz micrita-arcillosa (85%) y con intraclastos oxidados como componentes (15%) menores a 2 mm, la fábrica es lodo soportado. Se observó gran espacio poroso (20%) y cavidades circulares producto de la desecación y formación de gas en el sedimento (Lámina 2).

Dunham: Packstone/ Folk: Intramicrita/ Ambiente de depósito: Rampa media. RMF 9

Muestra 25

La roca muestra un color gris amarillento (5Y 8/1), predominan los clastos subangulares de grano fino a medio, mal clasificados.

En lámina delgada, presenta matriz micrítica (85%) con componentes esqueléticos y no esqueléticos (15%) como foraminíferos bentónicos de conchas evolutas, pellets, ooides y cortoides e intraclastos menores a 2 mm, los cuales se encuentran oxidados. Presenta porosidad primaria de 18% y relictos de burbujas de gas en el sedimento, la fábrica es lodo soportada (Lámina 2).

*Dunham: Wackestone / Folk: Intrabiopelomicrita/ Ambiente de depósito: Rampa media.
RMF 9*

Muestra 29

La roca en muestra de mano presenta un color gris amarillento (5Y8/1) de grano muy fino y compacto. En lámina delgada, la matriz es micrita-arcillosa (95%), con intraclastos como componentes (5%), sin presencia de biógenos, la fábrica es lodo soportado. Presenta porosidad primaria (17%), los cuales se comienzan a rellenar por esparita (Lámina 2).

Dunham: Mudstone/ Folk: Micrita/ Ambiente de depósito: Rampa profunda. RMF 2,5

Muestra 32

Los clastos de la roca en muestra de mano presentan un color gris amarillento (5Y 8/1), mientras que en la matriz se observa un rosa moderado a anaranjado (5Y 8/4). Los clastos son angulares a subangulares y tienen un rango de tamaño entre 1 mm y mayor a 1.5 cm, se encuentran mal clasificados.

En lámina delgada, la matriz es micrítica (80%) con intraclastos como componentes (20%), los cuales son mayores a 2 mm y se encuentran oxidados, tiene porosidad de 13% y relictos de burbujas en el sedimento, la fábrica es grano soportado (Lámina 2).

*Embry y Klován: Rudstone / Folk: Intramicrudita / Ambiente de depósito: Rampa media.
RMF 9*

Muestra 40

La roca presenta clastos que van desde gris amarillento (5Y 8/1) a rojo claro (5R 6/6), el tamaño de éstos se encuentra entre 1 mm y 5 mm, son angulares a subangulares, mal clasificados.

En lámina delgada presenta una matriz peloidal compuesta por micrita (60%) se encuentra oxidada y existe un segundo cemento que es esparita, alrededor de los clastos y de las cavidades de los poros. Además, tienen intraclastos y ooides como componentes (40%). Es significativamente porosa (8%) y con fábrica grano soportado (Lámina 2).

Dunham: Floatstone / Folk: Intrapelomicrita/ Ambiente de depósito: Rampa media. RMF 8

SAYIL

Muestra 44

La roca presenta clastos distintos: los más abundantes con un color gris amarillento (5Y 8/1) y en menor medida clastos gris claro (N8), por otro lado, la matriz rosa moderado a anaranjado (5Y 8/4). Los clastos son angulares a subangulares, mal clasificados con tamaños desde 1 mm a 2 cm.

En lámina delgada presenta una matriz micrítica oxidada (60%) con intraclastos como componentes (40%), con gran espacio poroso (29%), la fábrica es grano soportado (Lámina 3). *Embry y Klován: Rudstone / Folk: Intramicrudita/ Ambiente de depósito: Rampa media. RMF*

9

Muestra 50

Los clastos de la roca en muestra de mano presentan un color gris amarillento (5Y 8/1), mientras que la matriz posee un naranja rojizo (10R 6/6). Los clastos son angulares a subangulares de 1 mm a 2 cm, mal clasificados.

En lámina delgada presenta una matriz oxidada (85%) con extraclastos como componentes (15%). Dentro de los clastos existe matriz micrítica (25%), con componentes esqueléticos (75%) rellenos por micrita; los biógenos están conformados por foraminíferos bentónicos como orbitolinas con concha de red, de conchas evolutas, miliólidos, pisoides, cortoides y ooides; la fábrica es grano soportado. Además, presenta porosidad intergranular (2.5%) rellena por una segunda cementación de esparita; por lo que estos clastos poseen una textura packstone y probablemente se depositaron en un banco de arena (Lámina 3).

Embry y Klován: Floatstone / Folk: Extrabimicrudita/ Ambiente de depósito: Rampa media.

RMF 9

Muestra 51

La roca en muestra de mano presenta un color gris amarillento (5Y 8/1), de grano muy fino y compacto.

En lámina delgada presenta matriz micrítica (95%), la cual se encuentra disturbada casi erosiva, además, contiene intraclastos como componentes (5%), la fábrica es lodo soportado. Posee abundante porosidad (18%) (Lámina 3).

Dunham: Mudstone / Folk: Micrita / Ambiente de depósito: Rampa profunda. RMF 5

Muestra 52

La roca en muestra de mano exhibe un color gris amarillento (5Y 8/1) de grano muy fino y compacto.

En lámina delgada, presenta matriz micrítica (70%) con componentes esqueléticos (30%), como miliólidos, orbitolinas, así como foraminíferos uniseriales; la fábrica es lodo soportado. Es significativamente porosa (8-9%) (Lámina 3).

Dunham: Wackestone. Wackestone de miliólidos / Folk: Biomicrita/ Ambiente de depósito: Rampa interna (restringida). RMF 16

Muestra 53

Los clastos de la roca en muestra de mano presentan un color gris amarillento (5Y 8/1), mientras que la matriz posee un rojo claro (5R 6/6). Los clastos son angulares a subangulares, moderadamente clasificados, con tamaños de 1 a 5 mm.

En lámina delgada, presenta matriz micrítica oxidada (70%), con componentes (30%) como intraclastos y ooides, los cuales se encuentran fracturados y oxidados, la fábrica es grano soportado (Lámina 4).

Se compone de tres partes:

- 1) Una banda de micrita (100%). Mudstone. RMF 4
- 2) Una zona con matriz micrítica (40%), con componentes (60%) como intraclastos y pellets oxidados, en ocasiones hay esparita rodeando a los clastos. La fábrica es grano soportado. Packstone. RMF 14, mar abierto.
- 3) Una zona con matriz micrítica oxidada (70%) con componentes (30%) principalmente intraclastos y en menor cantidad ooides, la fábrica es lodo soportada. Floatstone.

Embry y Klován: Floatstone / Folk: Intrapelomicrudita/ Ambiente de depósito: Rampa media. RMF 9

Muestra 60

Los clastos de la roca en muestra de mano presentan un color gris amarillento (5Y 8/1), mientras que la matriz tiene un naranja rojizo (10R 6/6). Los clastos son angulares a subangulares, tienen un tamaño de 1 mm a 2 cm y se encuentran mal clasificados.

Se compone de 3 partes:

- 1) Matriz micrítica (70%) parcialmente oxidada, con componentes (30%) principalmente extraclastos, algunos se encuentran oxidados y otros recrystalizados. Componentes mayores a 2 mm, con fábrica lodo soportado. Floatstone. RMF 9- Rampa media a Rampa profunda.
- 2) Matriz micrítica oxidada (40%), con componentes (60%) como extraclastos y pellets. Grano soportado. Packstone.

RMF 9- Rampa media a Rampa profunda

- 3) Matriz micrítica oxidada (80%), con componentes (20%) como miliólidos, e intraclastos. Los intraclastos contienen pellets, miliólidos, y se encuentran grano soportados, por lo que se le denominó packstone. Asimismo, se logró apreciar la presencia de microdolomita (Lámina 4).

Embry y Klován: Floatstone / Folk: Extrabiopelomicrudita/ Ambiente de depósito: Rampa media. RMF 9

Muestra 62

La roca presenta un color gris amarillento (5Y 8/1) a naranja claro (10YR 8/2) de grano muy fino y compacto.

En lámina delgada exhibe una matriz micrítica (70%) con componentes esqueléticos (30%) como miliólidos, foraminíferos trocoides y fragmentos de bivalvos, estos últimos poseen las orillas de las conchas rellenas por esparita; así mismo se observaron granos no esqueléticos como ooides. La fábrica es lodo soportado (Lámina 4).

Dunham: Packstone. Packstone de miliólidos / Folk: Biopelmicrita / Ambiente de depósito: Rampa interna (bancos de arena). RMF 27

Muestra 66

Caliza color gris amarillento (5Y 8/1) de grano muy fino, sin presencia de componentes observables en muestra de mano.

En lámina delgada presenta una matriz micrítica (95%) e intraclastos como componentes (5%), no se observaron fósiles. Los clastos son subangulares, no mayores a 1 mm, se encuentran modernamente clasificados (Lámina 5).

Dunham: Mudstone / Folk: Micrita/ Ambiente de depósito: Rampa profunda. RMF 5

SANTA ELENA

Muestra 71

La roca presenta clastos color gris rosado (5YR 8/1) y una matriz rosa claro a anaranjado (5Y 8/4). Los clastos son angulares a subangulares, mal clasificados de 1 mm a 2 cm.

En lámina delgada, presenta matriz pelodial oxidada (60%) y con componentes no esqueléticos (40%) principalmente pellets y menor cantidad de intraclastos y ooides. La matriz de los clastos es micrita (100%). La fábrica es lodo soportada. Se observa la porosidad abundante (16%) (Lámina 5).

Embry y Klován: Floatstone / Folk: Peloidintramicrudita/ Ambiente de depósito: Rampa media. RMF 9

Muestra 73

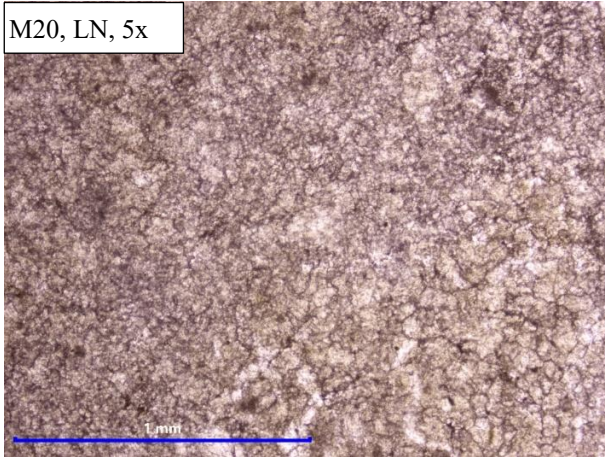
Los clastos de la roca en muestra de mano exhiben un color gris rosado (5YR 8/1) y una matriz rosa claro a anaranjado (5Y 8/4). Los clastos son angulares a subangulares, de tamaño de 1 mm a 1 cm, mal clasificados.

En lámina delgada presenta una matriz micrítica (60%) y componentes dentro de los cuales son intraclastos mayores a 2 mm (30%) y biógenos (10%) como fragmentos de braquiópodos y foraminíferos bentónicos; la fábrica es lodo soportada. Posee una porosidad de 16% (Lámina 5).

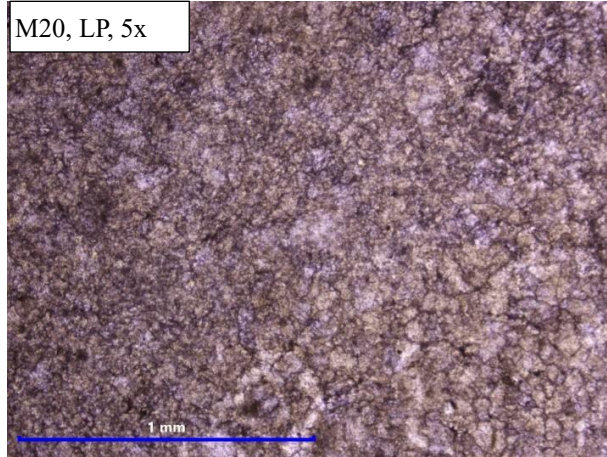
Embry y Klován: Floatstone / Folk: Intrabiomicrudita/ Ambiente de depósito: Rampa media. RMF 9

Lámina 1. Kabah

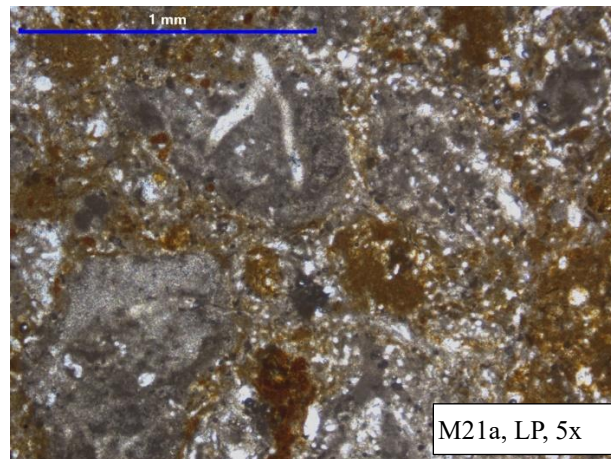
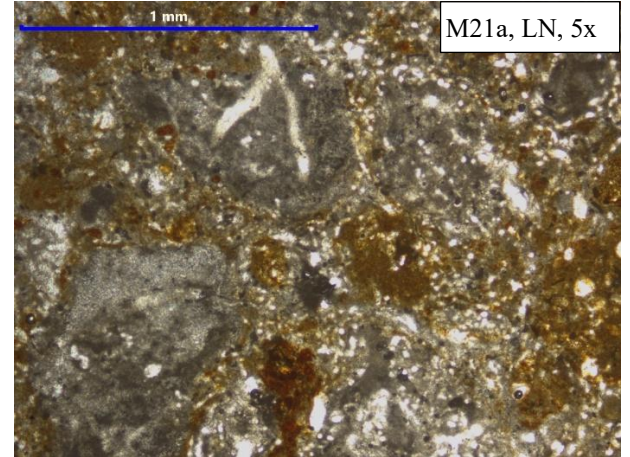
M20, LN, 5x



M20, LP, 5x

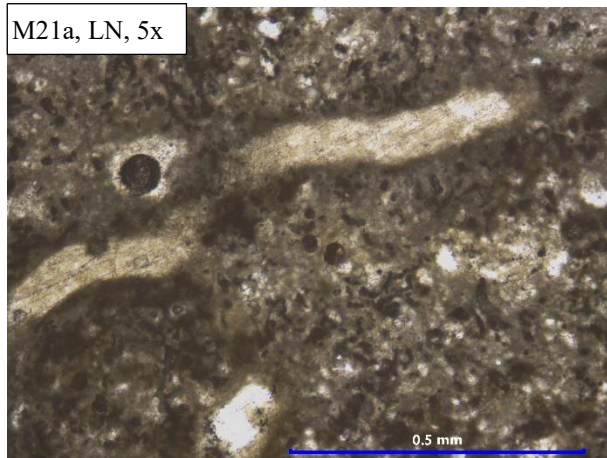


M21a, LN, 5x

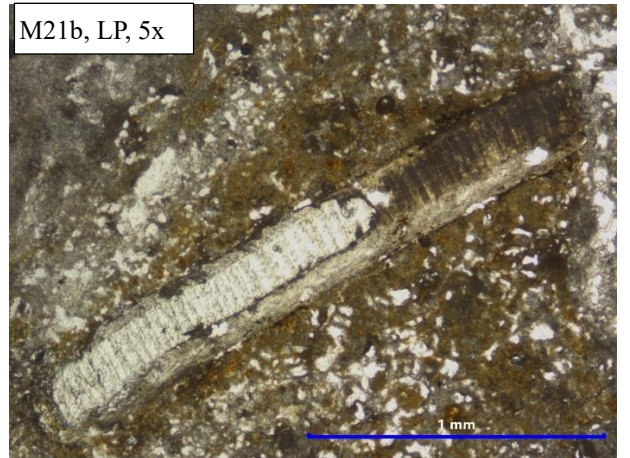


M21a, LP, 5x

M21a, LN, 5x



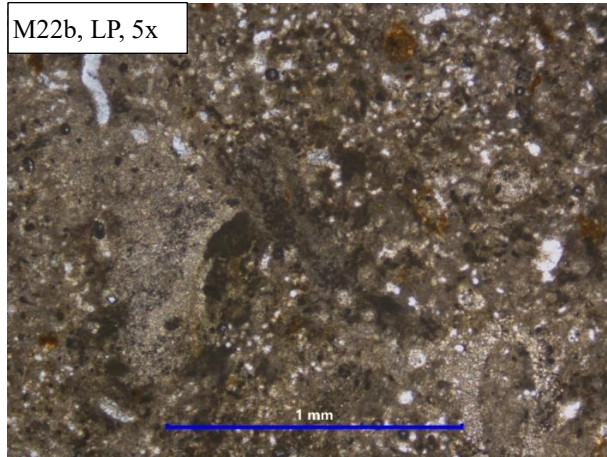
M21b, LP, 5x



M21b, LN, 5x



M22b, LP, 5x



M22d, LP, 5x

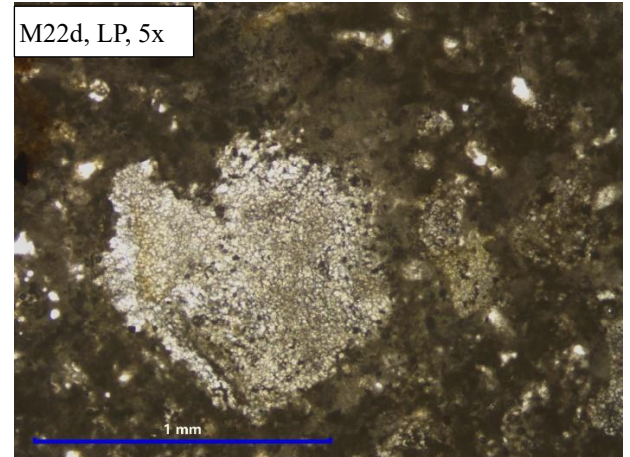
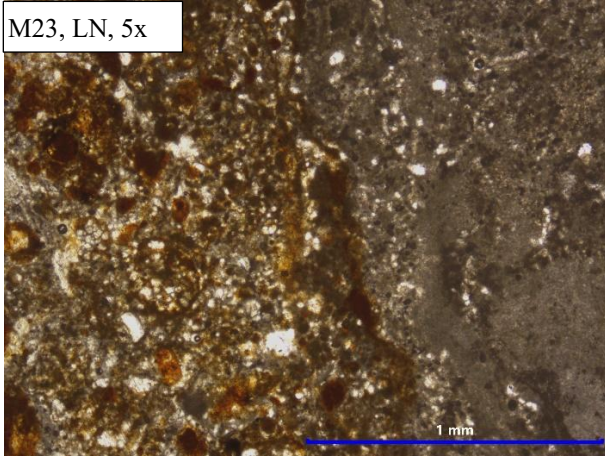
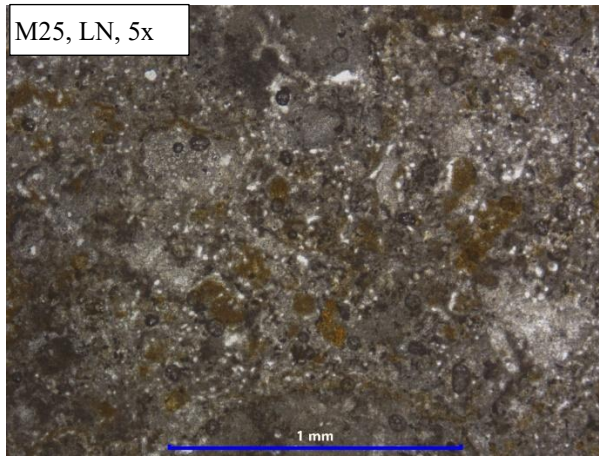


Lámina 2. Kabah

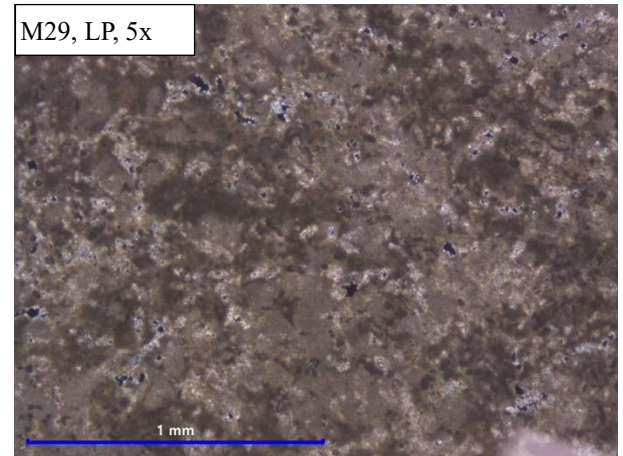
M23, LN, 5x



M25, LN, 5x



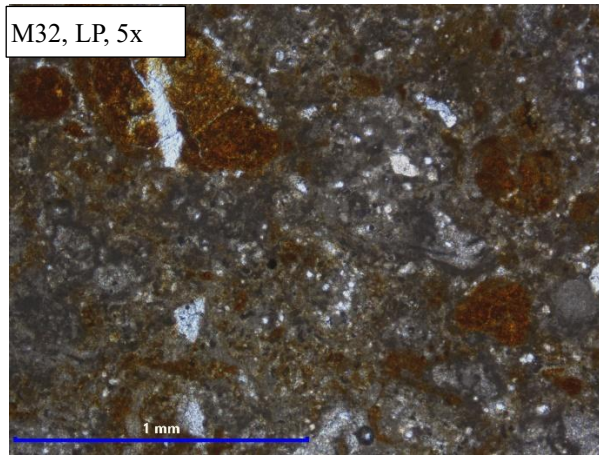
M29, LP, 5x



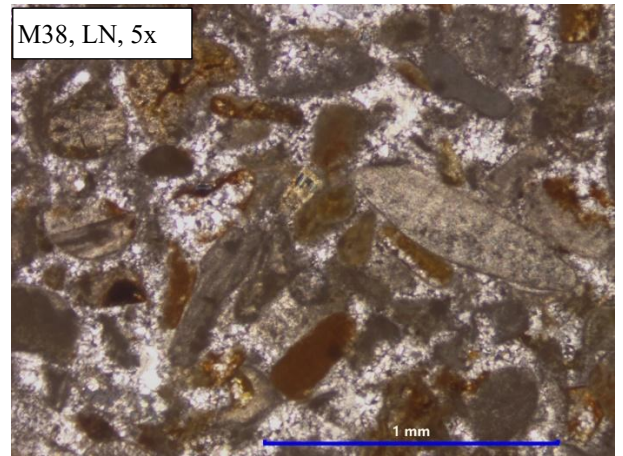
M32, LN, 5x



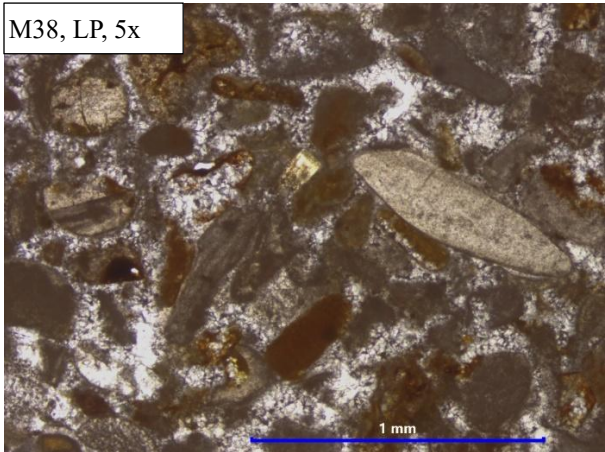
M32, LP, 5x



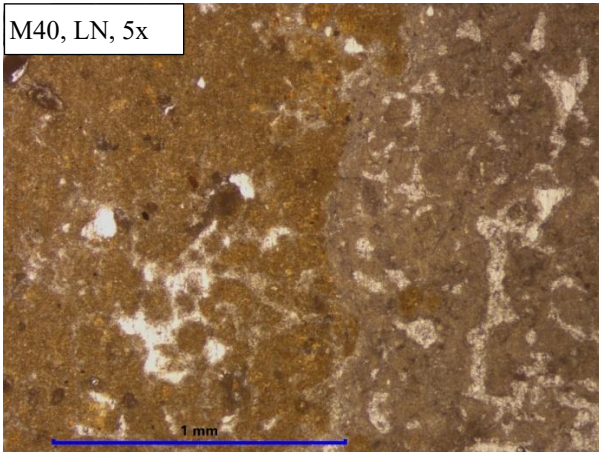
M38, LN, 5x



M38, LP, 5x



M40, LN, 5x



M40, LP, 5x

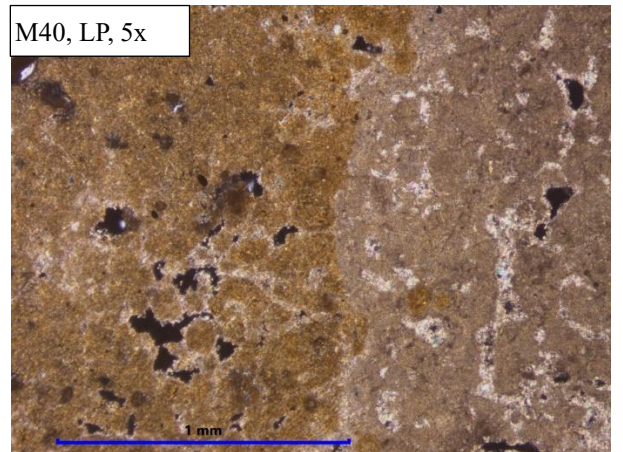
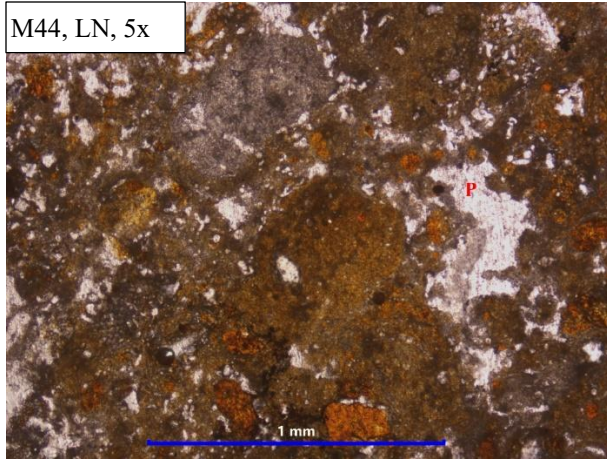
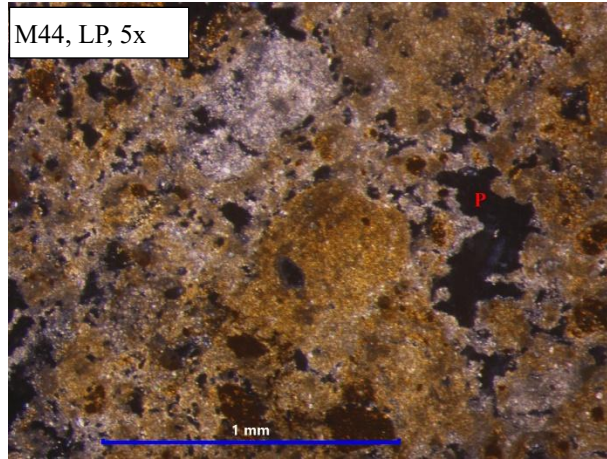


Lámina 3. Sayil

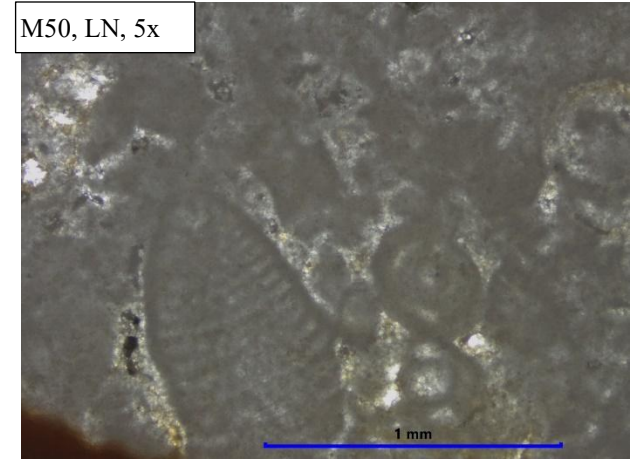
M44, LN, 5x



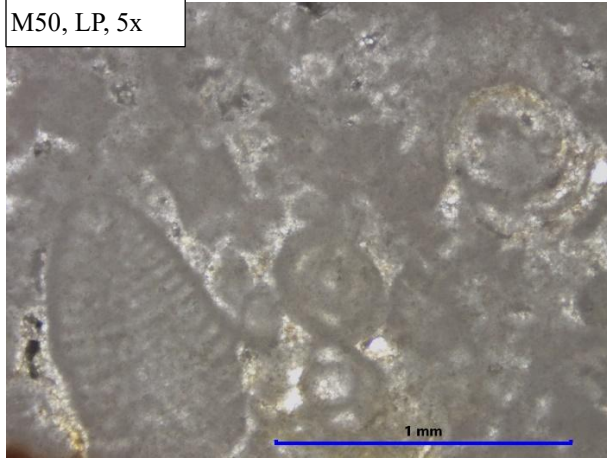
M44, LP, 5x



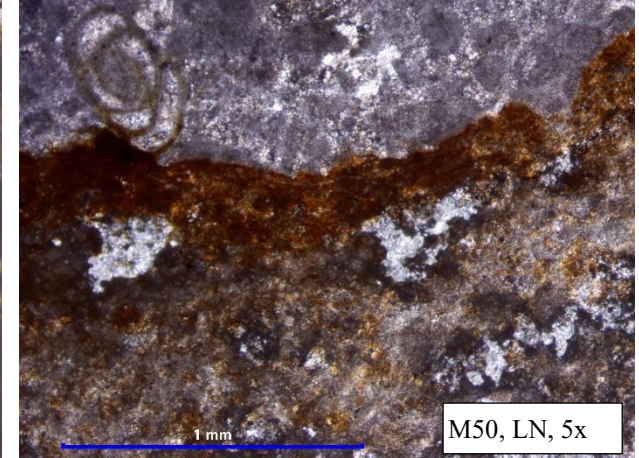
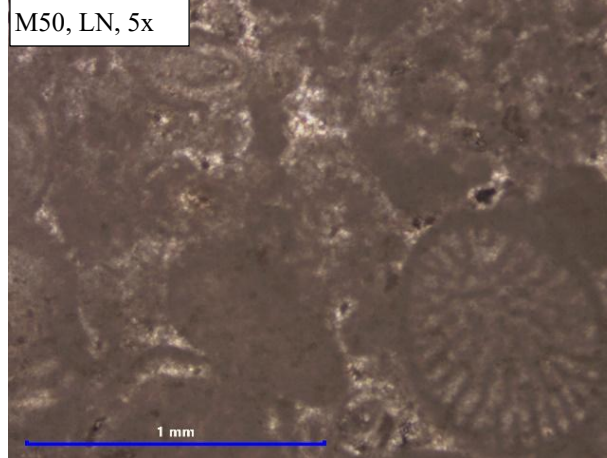
M50, LN, 5x



M50, LP, 5x

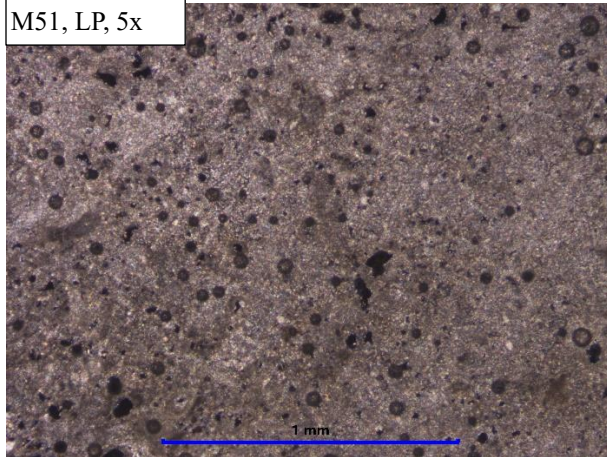


M50, LN, 5x

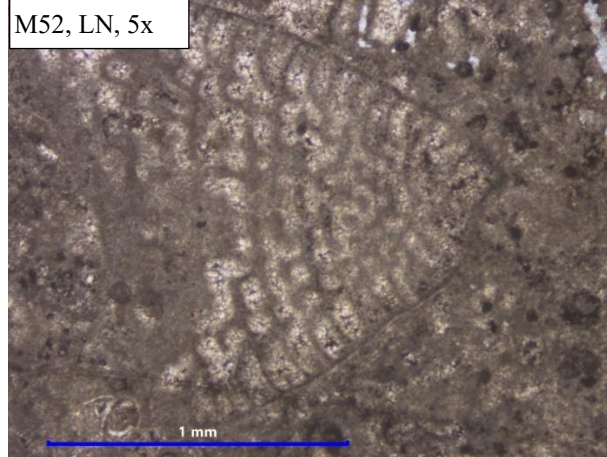


M50, LN, 5x

M51, LP, 5x



M52, LN, 5x



M52, LN, 5x

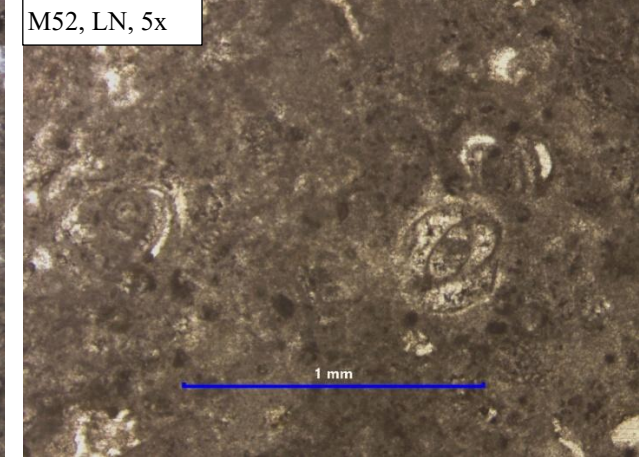
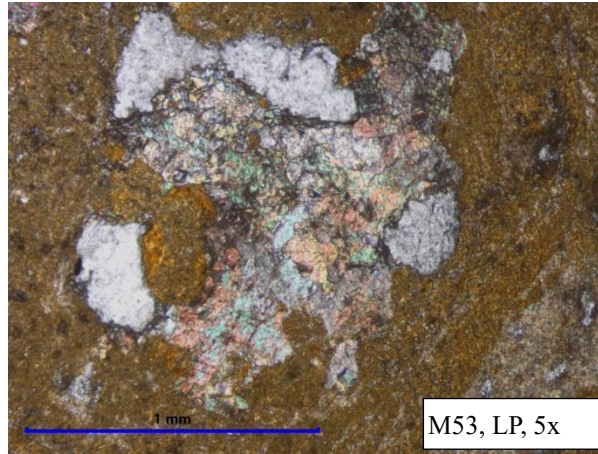
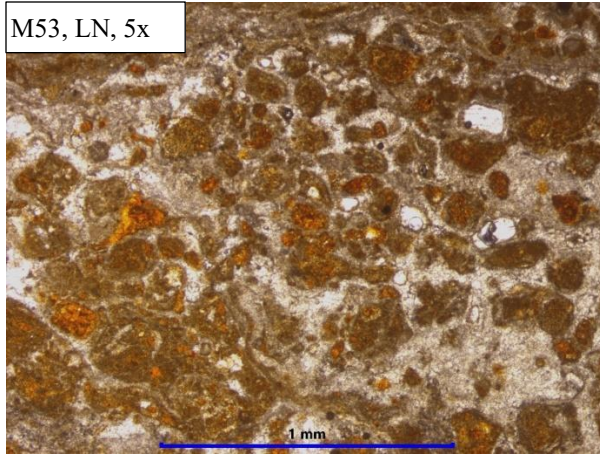
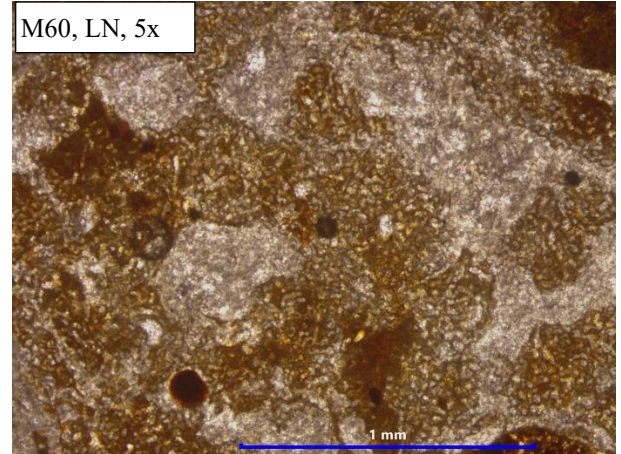


Lámina 4. Sayil

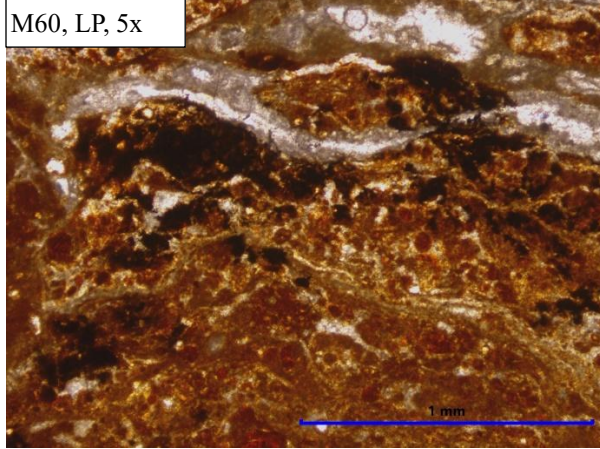
M53, LN, 5x



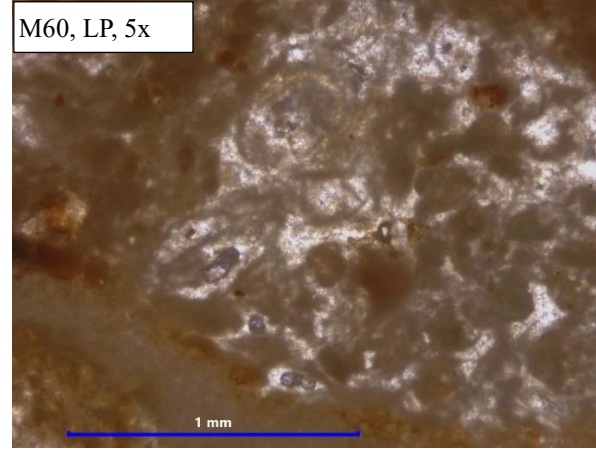
M60, LN, 5x



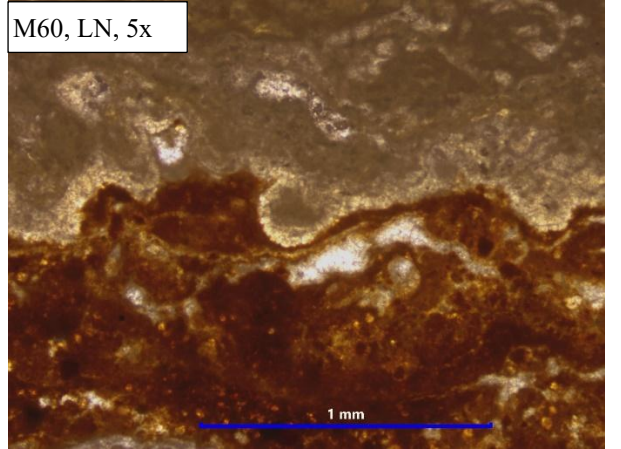
M60, LP, 5x



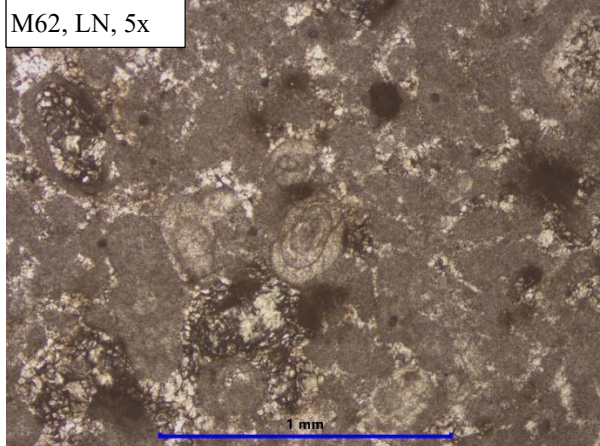
M60, LP, 5x



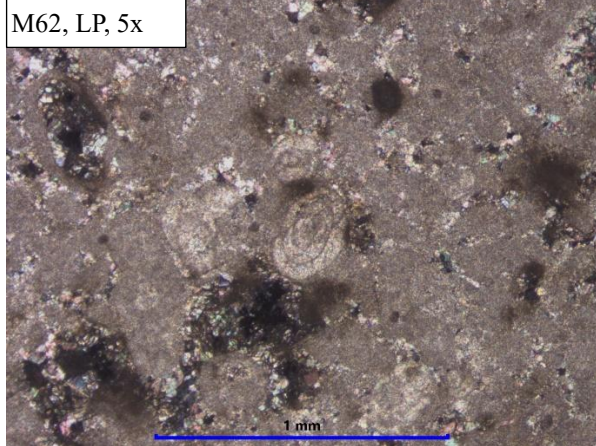
M60, LN, 5x



M62, LN, 5x



M62, LP, 5x



M62, LN, 5x

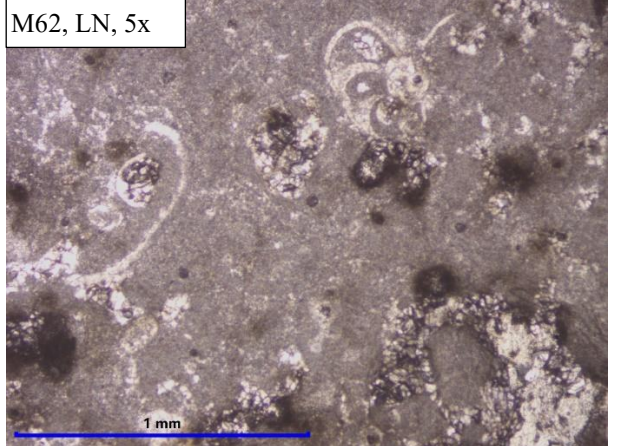
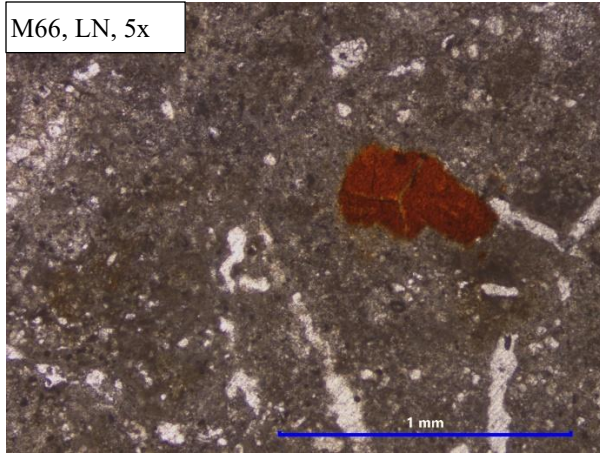
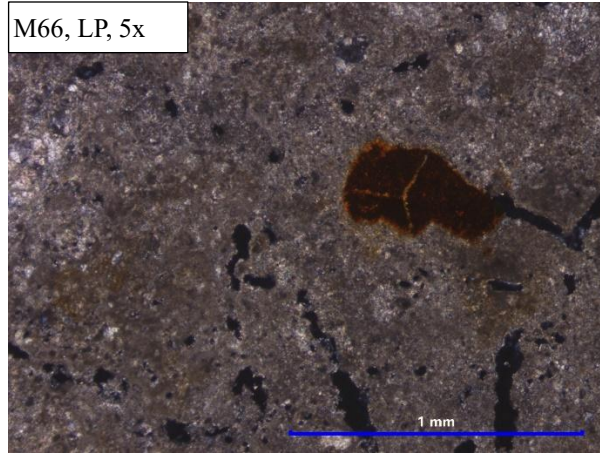


Lámina 5. Sayil y Santa Elena

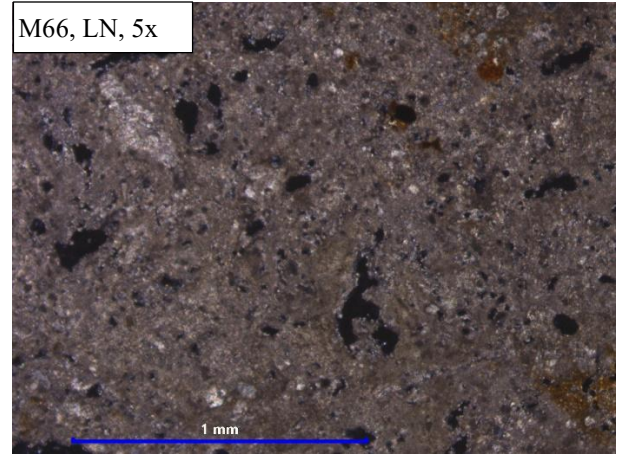
M66, LN, 5x



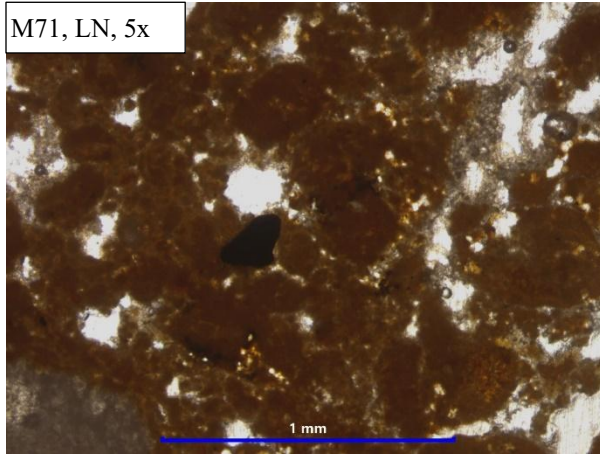
M66, LP, 5x



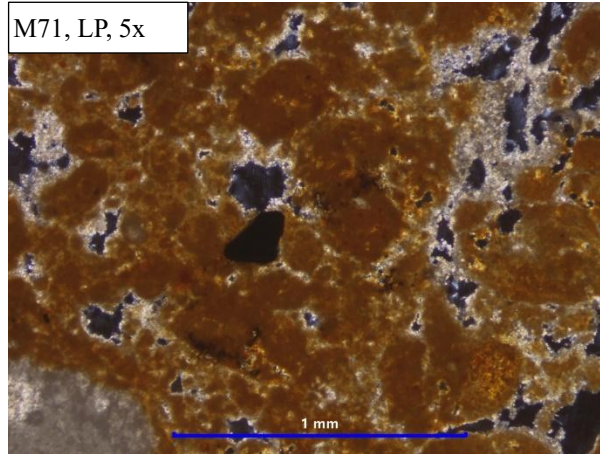
M66, LN, 5x



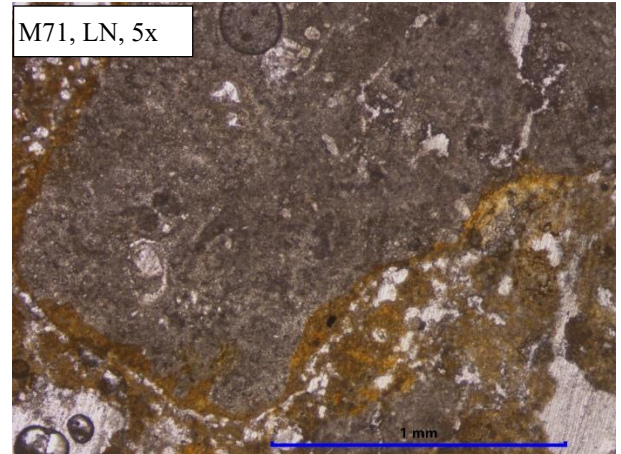
M71, LN, 5x



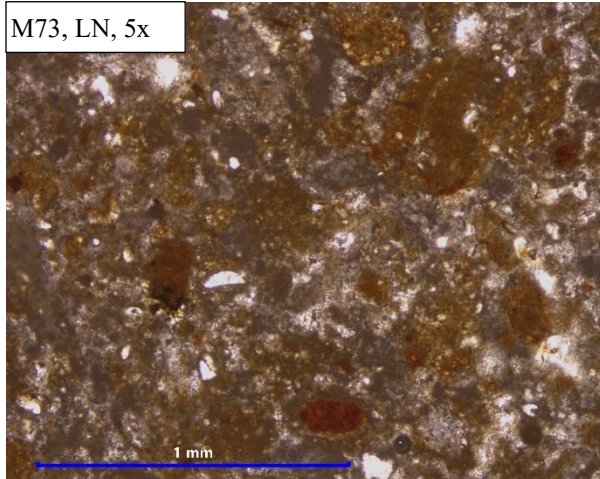
M71, LP, 5x



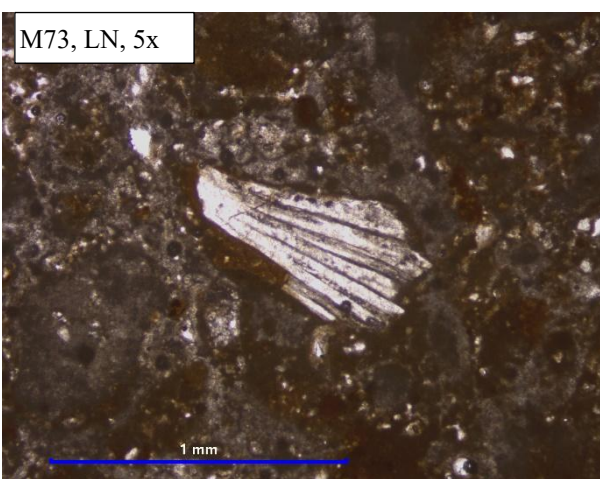
M71, LN, 5x



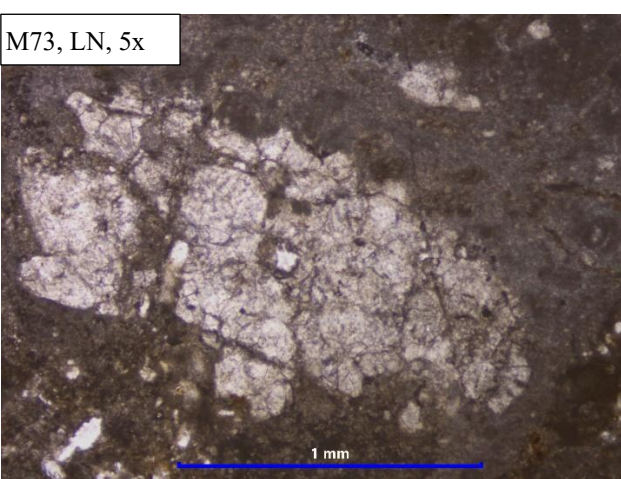
M73, LN, 5x



M73, LN, 5x



M73, LN, 5x



Anexo 5. Resultados de los análisis geoquímicos

5.1 Concentración de los óxidos mayores por ICP-OES.

		ÓXIDOS MAYORES % EN PESO											
	Clave	Tipo de roca	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total
Kabah (E2C6)	M19	Suelo (Kancab)	3.97	2.50	64.13	22.49	0.45	1.52	3.17	0.15	1.51	0.10	100
	M20	Caliza cristalina	0.43	0.02	0.71	0.35	0.01	1.74	96.71	-	0.03	0.00	100
	M21	Brecha (rudstone)	0.97	0.10	2.82	0.95	0.03	1.60	93.06	0.27	0.20	-	100
	M22	Brecha (floatstone)	0.41	-	1.11	0.05	0.00	1.50	96.86	0.05	0.02	-	100
	M24	Brecha (floatstone)	1.01	0.16	6.28	1.96	0.04	0.68	89.37	0.17	0.28	0.05	100
	M26	Caliza (mudstone)	-	-	0.03	-	0.01	0.26	99.43	0.27	-	-	100
	M30	Caliza (mudstone)	0.90	0.00	0.19	0.41	0.01	1.66	96.74	0.06	0.02	-	100
	M40	Brecha (floatstone)	0.87	0.21	8.97	2.72	0.04	1.16	85.57	0.01	0.38	0.07	100
	M41	Sascab	0.77	0.09	3.64	0.55	0.03	13.03	81.76	-	0.14	-	100
Sayil (E2B1)	M44	Brecha (rudstone)	1.18	0.04	5.88	1.37	0.05	1.08	90.02	0.05	0.29	0.04	100
	M45	Caliza (mudstone)	0.88	0.25	9.08	2.39	0.06	0.63	86.26	-	0.41	0.04	100
	M47	Brecha (floatstone)	0.98	0.06	2.69	0.75	0.04	0.25	95.20	-	0.01	-	100
	M48	Caliza (mudstone)	0.05	-	-	-	0.03	0.32	99.57	0.02	0.01	-	100
	M52	Caliza (wackestone)	-	-	-	-	0.03	0.24	99.72	-	-	0.01	100
	M53	Brecha (floatstone)	0.67	0.26	9.87	2.71	0.06	0.53	85.23	0.23	0.44	-	100
	M59	Brecha (floatstone)	0.58	0.05	0.46	0.02	-	1.06	97.62	-	0.18	0.03	100
	M61	Brecha (floatstone)	-	1.00	49.96	14.80	1.31	1.53	28.99	0.09	2.32	-	100
	M66	Caliza (mudstone)	1.09	0.14	5.25	1.34	0.06	0.68	91.17	-	0.23	0.04	100
	M67	Brecha (floatstone)	1.09	0.19	6.18	1.52	0.07	1.05	89.43	0.13	0.30	0.04	100
	M68	Brecha (floatstone)	0.67	0.06	1.95	0.48	0.04	0.79	95.87	-	0.09	0.05	100
Santa Elena	M70	Brecha (floatstone)	0.61	0.04	0.44	0.24	0.01	8.77	89.72	-	0.14	0.03	100
	M75	Brecha (floatstone)	0.71	0.14	6.20	2.14	0.04	1.63	88.80	-	0.30	0.03	100

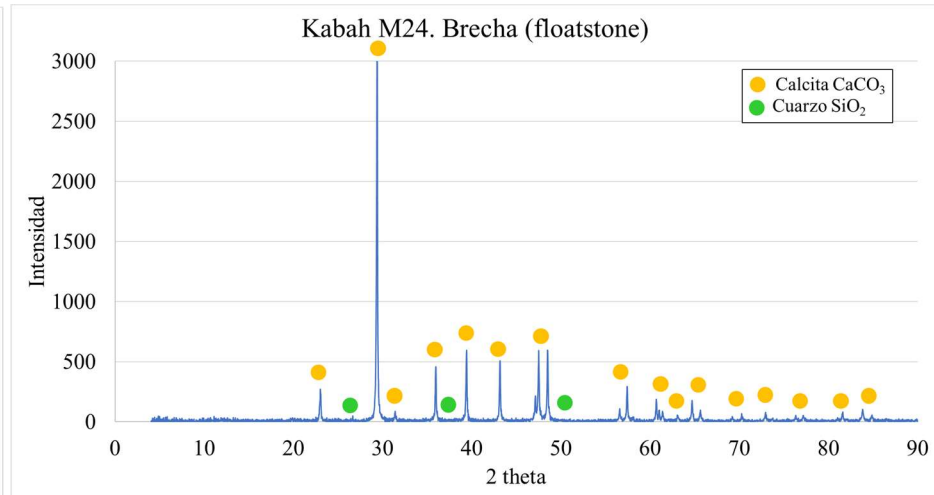
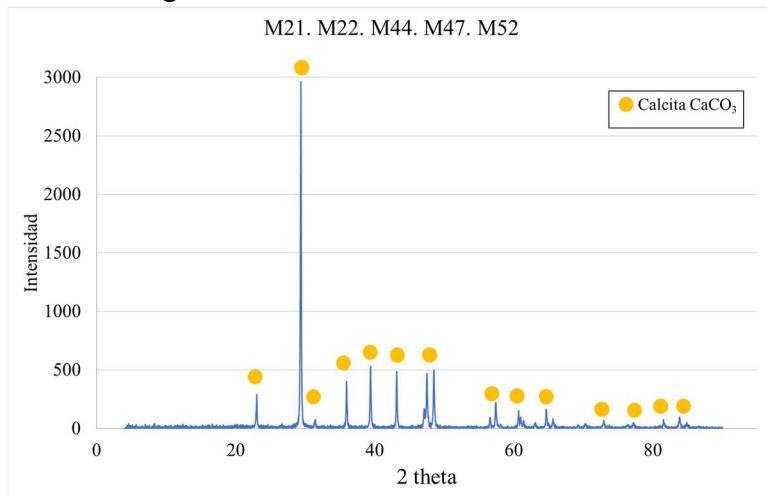
5.2 Concentración de elementos traza por ICP-OES.

		ELEMENTOS TRAZA PPM											
	Clave	Tipo de roca	Mo	S	Sr	As	Pb	Cd	Zn	Cu	Ni	Cr	Ba
Kabab (E2C6)	M19	Suelo (Kancab)	1.85	286.95	-	-	-	-	109.39	-	89.25	270.43	157.76
	M20	Caliza cristalina	-	57.06	-	-	-	-	-	82.68	-	83.77	-
	M21	Brecha (rudstone)	-	711.32	-	-	-	-	-	-	-	-	27.93
	M22	Brecha (floatstone)	-	347.36	-	5.23	-	4.90	-	-	-	-	24.53
	M24	Brecha (floatstone)	-	514.18	-	-	-	-	4.34	86.59	-	-	33.99
	M26	Caliza (mudstone)	-	226.85	-	-	-	4.09	2.53	-	199.56	-	-
	M30	Caliza (mudstone)	-	1064.50	-	15.41	-	-	4.52	-	-	-	38.88
	M40	Brecha (floatstone)	-	388.69	-	-	15.87	-	6.85	67.74	211.20	-	29.40
	M41	Sascab	-	387.69	127.56	4.03	-	-	6.90	-	280.43	-	36.31
Sayil (E2B1)	M44	Brecha (rudstone)	-	1222.30	-	-	67.08	6.80	8.37	46.83	209.95	-	81.34
	M45	Caliza (mudstone)	-	594.82	-	-	-	-	14.66	-	424.03	-	42.79
	M47	Brecha (floatstone)	-	109.93	-	-	-	1.54	-	-	-	-	18.48
	M48	Caliza (mudstone)	-	268.46	167.68	-	-	-	-	-	341.63	-	-
	M52	Caliza (wackestone)	-	242.89	100.18	0.81	-	-	-	-	-	-	-
	M53	Brecha (floatstone)	-	575.06	-	-	-	1.22	10.59	18.41	-	-	38.41
	M59	Brecha (floatstone)	-	823.55	61.83	-	-	-	-	-	146.68	-	23.08
	M61	Brecha (floatstone)	-	987.08	-	-	-	-	-	-	352.37	-	64.24
	M66	Caliza (mudstone)	-	770.90	14.26	-	-	-	-	32.98	-	-	35.97
	M67	Brecha (floatstone)	-	1013.04	114.13	-	-	-	12.97	-	-	-	56.43
	M68	Brecha (floatstone)	-	934.98	38.48	-	-	-	-	51.99	98.72	-	32.54
Santa Elena	M70	Brecha (floatstone)	-	813.99	-	6.93	-	0.91	-	-	-	-	46.14
	M75	Brecha (floatstone)	-	558.50	-	-	22.84	3.13	-	-	524.32	-	31.91

5.3 Concentración de óxidos mayores y traza por FRX.

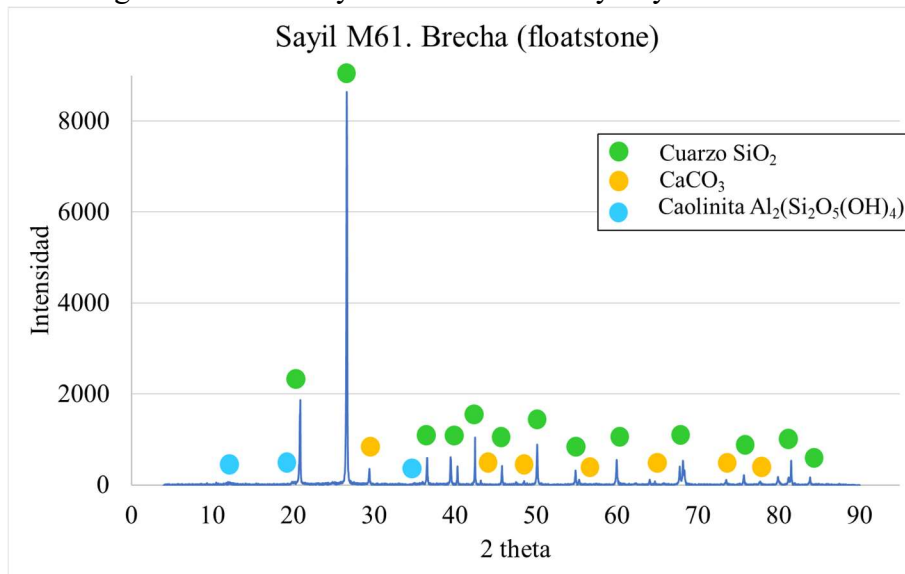
ÓXIDOS MAYORES % EN PESO					
Clave	M21	M40	M53	M75	M19
Tipo de roca	Brecha (rudstone)	Brecha (floatstone)	Brecha (floatstone)	Brecha (floatstone)	Suelo (kancab)
SiO ₂	2.23	3.35	3.49	2.67	28.71
TiO ₂					2.63
Al ₂ O ₃					12.27
Fe ₂ O ₃	1.27	4.26	4.25	3.06	48.60
MnO				0.02	0.72
MgO					
CaO	96.50	92.22	92.03	94.26	5.42
Na ₂ O					
K ₂ O		0.18	0.23		1.64
P ₂ O ₅					
Total	100	100	100	100	100
ELEMENTOS TRAZA PPM					
Zn					0.009
As					0.004
Rb		0.001	0.001		0.006
Sr	0.013	0.005	0.005	0.005	0.003
Y		0.002	0.002	0.001	0.011
Zr	0.002	0.007	0.006	0.004	0.046
Nb					0.007
Mo		0.001			0.002
Pd		0.003	0.001		0.056
Ta					0.025
Pb					0.006
Th		0.002			0.009

5.4 Difractogramas realizados alas muestras de las fachadas

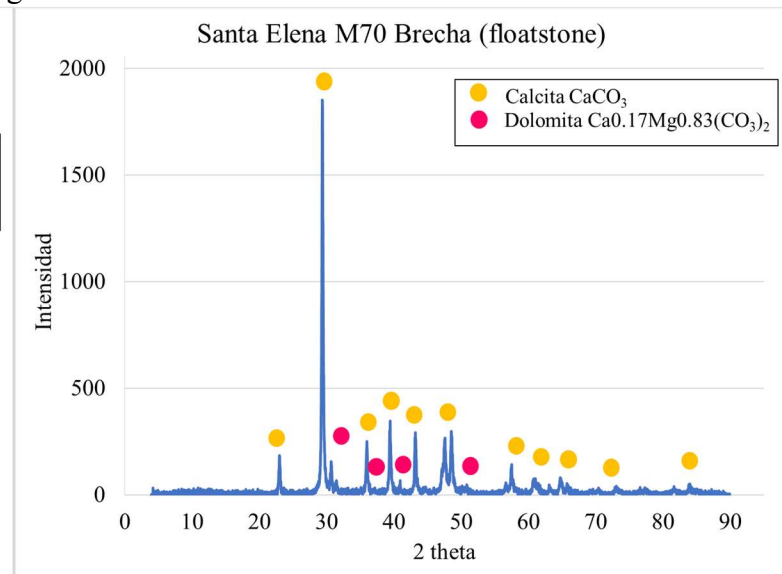


Difractograma de calizas y brechas de Kabah y Sayil.

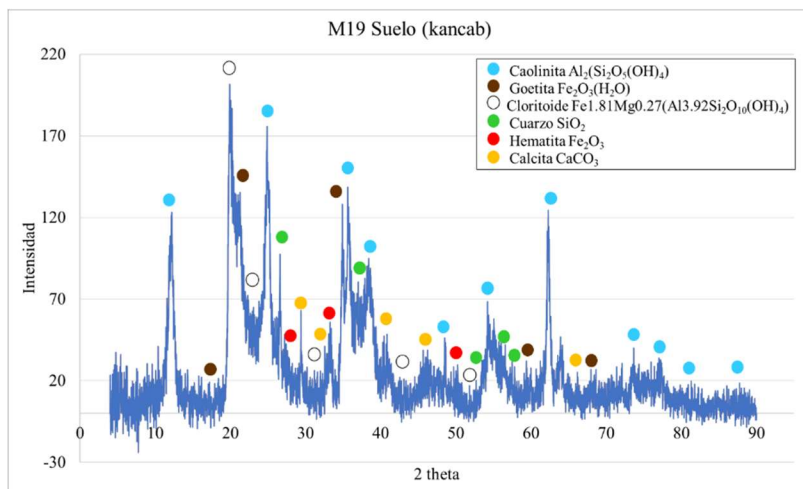
Difractograma de brecha de Kabah.



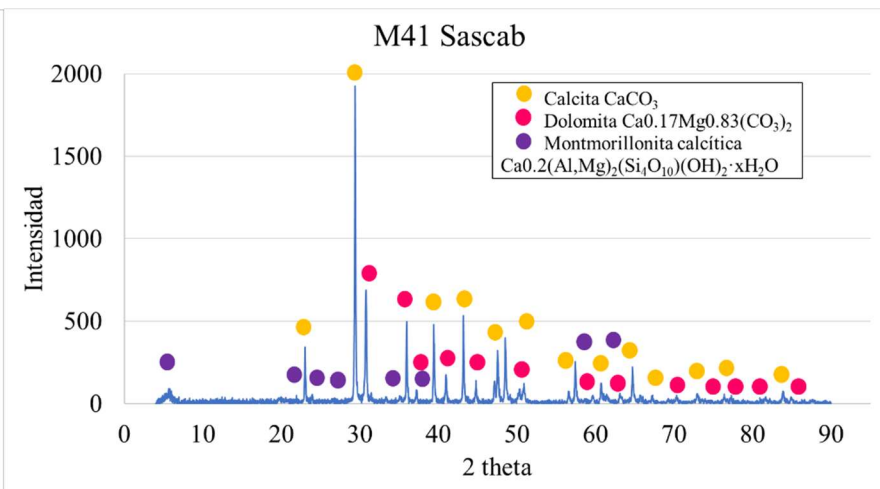
Difractograma de brecha de Sayil.



Difractograma de brecha del afloramiento de Santa Elena.



Difractograma del suelo (kancab).



Difractograma del sascab.