



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

**“Mecanismos de descomposición en la roca caliza del
Templo Norte, Zona Arqueológica de Chichén Itzá,
Yucatán”**

T E S I S

Que para obtener el grado de:
Maestra en Ciencias en Geología Aplicada

Presenta:

Lic. Mayela Alejandra López Torres
Becaria CONAHCYT: CVU 1239328

Asesor:

Dr. Rubén Alfonso López Doncel

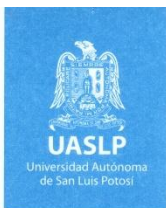
Co-asesora:

Dra. Claudia Araceli García Solís



San Luis Potosí, S. L. P.

Febrero de 2025



19 de septiembre de 2024

**LIC. MAYELA ALEJANDRA LÓPEZ TORRES
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Rubén Alfonso López Doncel y Claudia Araceli García Solís** 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:

**"Mecanismos de descomposición en la roca caliza del Templo Norte,
Zona Arqueológica de Chichén Itzá, Yucatán"**

Introducción

1. Hipótesis, objetivos y justificación de la investigación
2. Descripción, contexto histórico y geológico del Gran Juego de Pelota de Chichén Itzá
3. Materiales y métodos documentales, petrofísicos, petrográficos y geoquímicos para evaluar las rocas calizas del Templo Norte de Chichén Itzá.
4. Resultados del registro litológico, de deterioros y los ensayos experimentales de las rocas calizas del Templo Norte de Chichén Itzá
5. Los efectos de los factores externos y la textura y composición de la roca caliza en la conservación del Templo Norte de Chichén Itzá

Conclusiones y sugerencias

Referencias

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E

DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR

DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

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

Copia. Archivo
*etn.

"UASLP, con profesionistas abiertos al mundo"

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Laura López Torres por su paciencia, motivación, apoyo, consejos y amor incondicional. A Nina, mi gatita, por su compañía durante la redacción de este documento. A Osmara y Diana, mis amigas y compañeras, por su cariño, ánimo, por compartirme de su conocimiento en esta área que fue totalmente nueva para mí y porque muchas veces solo nos teníamos la una a la otra en este proceso.

Al Dr. Rubén López Doncel por su dirección y la oportunidad de llevar a cabo este tema de tesis.

A la Dra. Claudia García Solís, ya que sin su colaboración este proyecto no habría podido llevarse a cabo, por recibirme en Chichén Itzá, por compartirme su conocimiento, por sus recomendaciones, guía y valiosa retroalimentación.

A mis sinodales, el Dr. Yam Zul Ernesto Ocampo Díaz, Dra. María del Carmen Casas Pérez y M.C. Marco Antonio Rojas Beltrán por sus correcciones y comentarios durante estos años.

A todos los profesores y administrativos que formaron parte de mi estancia en la maestría: Dr. Ricardo Saucedo Girón, Dr. Ramón Torres Hernández, Dra. María Elena García Arreola, Dr. Alfredo Aguillón Robles, Dr. Rafael Barboza Gudiño, Dr. José Juan Francisco Rivera y el Dr. Luis Ángel Rodríguez Sedano. Gracias a Maura Andrea Zavala Zavala de la biblioteca por su amable apoyo. También a Efrén Román Guerrero y Juan Carlos Guel Casillas por estar al pendiente de mi grupo en el Instituto de Geología.

Al Ing. Erasmo Mata Martínez por todo el trabajo de corte de muestras y elaboración de láminas delgadas, gracias por la paciencia y dedicación.

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. A Alondra Mejía Molina por la paciencia de instruirnos en el proceso de digestión de muestras.

A la Mtra. Emma Luz de Velázquez Farfán y E.A.O. Mauricio López Mejía por su explicación y colaboración en los experimentos de compresión uniaxial.

A la L.Q. Claudia Hernández Galván y M.M.I.M. Rosa Lina Tovar Tovar del Instituto de Metalurgia por los exámenes de Difracción de Rayos X y por su amable orientación y enseñanzas.

Al Dr. Roberto Briones Gallardo por la realización de los exámenes de Fluorescencia de Rayos X.

A la L.Q. Izanami López Acosta por su guía en la disolución de carbonatos para análisis de DRX.

Al CONAHCYT por permitirme ser becaria durante estos años (CVU 1239328).

ÍNDICE

Resumen.....	8
Abstract.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
1. HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	11
1.1 Hipótesis	11
1.2 Justificación.....	11
1.2.1 Impacto social	11
1.3 Objetivo general.....	11
1.4 Objetivos específicos	11
2. DESCRIPCIÓN, CONTEXTO HISTÓRICO Y GEOLÓGICO DEL GRAN JUEGO DE PELOTA DE CHICHÉN ITZÁ.....	13
2.1 Descripción general del Templo Norte del Gran Juego de Pelota.....	13
2.2 Marco histórico de Chichén Itzá	14
2.3.1 Distribución de la ciudad y estilo arquitectónico	16
2.3.2 El Gran Juego de Pelota	17
2.3 Marco geológico de la zona arqueológica de Chichén Itzá	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS DOCUMENTALES, PETROFÍSICOS, PETROGRÁFICOS Y GEOQUÍMICOS PARA EVALUAR LAS ROCAS CALIZAS DEL TEMPLO NORTE DE CHICHÉN ITZÁ	25
3.1 Documentación	25
3.2 Registro en campo	25
3.2.1 Toma de muestras.....	26
3.3 Técnicas analíticas	32
3.3.1 Registro termo-higrométrico in situ.....	32
3.3.2 Valores petrofísicos.....	32
3.3.3 Geoquímica de roca total	36
3.3.3 Petrografía	39
4. RESULTADOS DEL REGISTRO LITOLÓGICO, DE DETERIOROS Y LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES DE LAS ROCAS CALIZAS DEL TEMPLO NORTE DE CHICHÉN ITZÁ.....	41
4.1 Mapeo litológico del Templo Norte de Chichén Itzá.....	41
4.2 Mapeo de deterioros del interior del Templo Norte de Chichén Itzá.....	49

4.3	Registro termo-higrométrico <i>in situ</i>	57
4.4	Valores petrofísicos	60
4.4.1	<i>Porosidad efectiva, densidad aparente y de matriz y absorción de agua al vacío</i>	60
4.4.2	<i>Expansión hídrica y térmica</i>	63
4.4.3	<i>Absorción capilar</i>	67
4.4.4	<i>Prueba de envejecimiento por explosión salina</i>	68
4.4.5	<i>Resistencia a la compresión uniaxial</i>	69
4.5	Geoquímica de roca total	70
4.5.1	<i>Análisis por ICP-OES</i>	70
4.5.2	<i>Fluorescencia de Rayos X</i>	79
4.5.3	<i>Difracción de Rayos X (DRX)</i>	83
4.6	Petrografía y análisis de microfacies	88
5.	LOS EFECTOS DE LOS FACTORES EXTERNOS Y LA TEXTURA Y COMPOSICIÓN DE LA ROCA CALIZA EN LA CONSERVACIÓN DEL TEMPLO NORTE DE CHICHÉN ITZÁ	100
5.1	Humedad, porosidad y permeabilidad	100
5.2	Erosión y su relación con las características de sedimentación	102
5.3	Cambios de temperatura, luz del sol y expansión térmica	103
5.4	Composición geoquímica de las muestras de calizas y brechas	105
5.5	Actividad biológica	106
	CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	113
	REFERENCIAS	115
	ANEXOS	120

Índice de imágenes

Figura 1. Plataforma de la Gran Nivelación. Modificado del ‘Plano General de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá’ por Alberto R. Balam del Proyecto de Conservación Integral de Chichén Itzá, INAH (2023).	13
Figura 2. Diagrama de descripción formal del Templo Norte de Chichén Itzá.	14
Figura 3. Templo Norte antes de su reconstrucción (ca. 1928). Fotografía recuperada de la Mediateca INAH (INAH, s/f).	15
Figura 4. Bajorrelieves del muro norte (al centro) del Templo Norte, dibujo por Linda Schele recuperado de la Fundación para el avance de estudios mesoamericanos. Bajorrelieves de los muros oeste y este (a los lados) dibujos por Linnea Wren en Schele y Mathews (1999-245-255) . ..	19
Figura 5. Mapa de ubicación de extracción de muestras de caliza y brecha calcárea en la zona arqueológica de Chichén Itzá, obtenida de Google Earth™.	31
Figura 6. ICP-OES Thermo Scientific iCap serie 7000.	36
Figura 7. Difractómetro de Rayos X Bruker® D8 Advance.	38
Figura 8. Mapa litológico del muro norte del Templo Norte de Chichén Itzá.	42
Figura 9. Mapa litológico del muro este del Templo Norte de Chichén Itzá.	43
Figura 10. Mapa litológico del muro oeste del Templo Norte de Chichén Itzá.	44
Figura 11. Mapa litológico de la fachada sur del Templo Norte de Chichén Itzá.	45
Figura 12. Mapa litológico de la fachada norte del Templo Norte de Chichén Itzá.	46
Figura 13. Mapa litológico de la fachada este del Templo Norte de Chichén Itzá.	47
Figura 14. Mapa litológico de la fachada oeste del Templo Norte de Chichén Itzá.	48
Figura 15. A) Alveolización en roca caliza, B) Erosión diferencial de caliza y brecha calcárea con clastos, C) Alveolo con velo salino a su alrededor y D) Perforaciones de avispas.	50
Figura 16. A) Rocas agregadas en la reconstrucción, B) Parte inferior de dintel de varillas de hierro, C) Grieta que atraviesa un sillar del muro este y D) Mancha oscura en un sillar del muro norte.	51
Figura 17. A) Escurrimiento con biopelícula color gris oscuro en la bóveda, B) Biopelícula vista en una lupa de 30 aumentos, se observan agujeros milimétricos en las zonas donde se han desprendido los microorganismos, C) Plantas superiores en las juntas de la bóveda, D) Panal de avispas incrustado en el muro norte.	52
Figura 18. Mapa de deterioros del muro norte del Templo Norte de Chichén Itzá.	54
Figura 19. Mapa de deterioros del muro este del Templo Norte de Chichén Itzá.	55
Figura 20. Mapa de deterioros del muro oeste del Templo Norte de Chichén Itzá.	56
Figura 21. Promedios de registro de temperatura in situ.	58
Figura 22. Promedios de registro de humedad in situ.	58
Figura 23. Diagrama de luz del sol y sombras proyectadas en el Templo Norte de Chichén Itzá durante la toma de datos termo-higrométricos.	59
Figura 24. Gráfica de Absorción de agua al vacío vs porosidad efectiva de muestras de brecha calcárea y calizas.	63
Figura 25. Gráfica de expansión hídrica de muestras de brecha y caliza.	64
Figura 26. Gráficas de expansión térmica para muestras de calizas (izquierda) y brechas (derecha).	65

Figura 27. Gráficas de expansión térmica para muestras de calizas (izquierda) y brechas (derecha).	66
Figura 28. Gráficas de absorción por capilaridad de muestras de caliza y brechas.	67
Figura 29. Ensayo de cristalización de sales en muestra de brecha (BRE-06).	68
Figura 30. Ensayo de cristalización de sales en muestra de caliza (CAL-10).	69
Figura 31. Resistencia a la compresión uniaxial de muestras de caliza y brecha.	69
Figura 32. Gráfica de concentración de CaO por ICP-OES en muestras de calizas.	73
Figura 33. Gráfica de concentración de elementos mayores por ICP-OES en muestras de calizas (sin CaO).	74
Figura 34. Gráfica de concentración de elementos mayores por ICP-OES en muestras de brecha (sin CaO).	75
Figura 35. Gráfica de concentración de elementos traza por ICP-OES en muestras de caliza.	76
Figura 36. Concentración de elementos traza por ICP-OES en muestras de brecha.	77
Figura 37. Concentración de elementos mayores por ICP-OES en sal del Templo Norte.	78
Figura 38. Concentración de elementos traza por ICP-OES en sal del Templo Norte.	78
Figura 39. Concentración de elementos mayores por FRX en muestras de brecha y caliza.	80
Figura 40. Concentración de elementos traza por FRX en muestras de brecha y caliza (parte 1).	81
Figura 41. Concentración de elementos traza por FRX en muestras de brecha y caliza (parte 2).	82
Figura 42. Difractogramas de muestras de rocas calizas.	84
Figura 43. Difractogramas de muestras de brechas calcáreas.	85
Figura 44. Difractogramas de brechas calcáreas con ataque de HCl.	86
Figura 45. Difractogramas de muestras de sales del Templo Norte.	87
Figura 46. A) Orbitolina en muestra CAL-04; B) Foraminífero miliólido en muestra CAL-01; C) Foraminífero uniserial y foraminífero miliólido en muestra CAL-01; D) Foraminíferos biserials en muestra CAL-02; E) Grainstone de foraminíferos (CAL-04); F) Birdeye en muestra CAL-21.	89
Figura 47. A) Mineral rojo rodeado de calcita en muestra BRE-02; B) Resto de bivalvo en muestra BRE-03; C) Fragmento de gasterópodo en muestra BRE-04; D) Intraclasto de mudstone con un foraminífero uniserial dentro en muestra BRE-03; E) Ooide en muestra BRE-02; F) Intraclasto de grainstone en muestra BRE-11.	90
Figura 48. Cinturones de facies estándar de las láminas delgadas de roca de la zona arqueológica de Chichén Itzá, modificados de Flügel (2010:721-722).	91
Figura 49. A) Porosidad fenestral en muestra BRE-06, B) Porosidad intercrystalina en muestra BRE-04, C) Poros interpartícula reducidos por cementación en muestra BRE-02 y D) 'Vug' ocasionado por disolución en muestra CAL-03.	94
Figura 50. Temperaturas de las fachadas del Templo Norte durante el día.	104

Resumen

La ciudad prehispánica de Chichén Itzá es uno de los sitios arqueológicos más importantes de México y ha sido reconocida por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) como Patrimonio Cultural Mundial desde 1988, también en 2007 fue considerada como una de las Nuevas Siete Maravillas del Mundo. Se le concedió un valor universal excepcional por sus cualidades arquitectónicas y la iconografía integrada en sus fachadas, con extraordinarias representaciones en relieve y esculturas adosadas. Ambos atributos están hechos con calizas y brechas, las cuales abundan en la región debido a su localización dentro de la Plataforma Carbonatada de Yucatán. La exposición al clima húmedo subtropical ha causado que los edificios de mampostería experimenten pérdida de material, debilitamiento estructural y alteraciones estéticas.

El análisis de la piedra caliza utilizada en el Templo Norte del Gran Juego de Pelota ha proporcionado información sobre los procesos de erosión de la roca en Chichén Itzá. Este edificio originalmente presentaba importantes escenas iconográficas en todos sus muros interiores, el deterioro de sus sustratos es evidente después de un siglo de su restauración.

Esta investigación mostrará los hallazgos de los análisis realizados a las brechas y calizas, incluyendo información petrofísica, petrográfica y geoquímica. Adicionalmente, se tomaron datos termohigrométricos *in situ* para entender la relación entre deterioro, textura y composición de la roca junto a factores ambientales extrínsecos. La alteración y pérdida material observadas se atribuye tanto a las condiciones materiales intrínsecas como a la influencia del clima regional, incluyendo la exposición a la luz solar, fluctuaciones de temperatura y cambios de humedad durante el día.

Las brechas son más susceptibles a la pérdida de material debido a sus mayores porcentajes de porosidad y absorción de agua en comparación con las calizas. Esto da como resultado un mayor ingreso de humedad a la roca, lo que lleva a la lixiviación mineral, disolución y disminución de cohesión en la matriz de las brechas. A medida que las brechas se debilitan, los clastos dentro de la matriz también se desprenden, lo que lleva a la formación de huecos y fracturas que aceleran la erosión.

Por otro lado, la calcita se expande fácilmente con el aumento de la temperatura y comienza a deformarse alrededor de los 40°C. Cuando se enfrían y se contraen no vuelven a sus dimensiones originales. Esto genera tensiones internas en la roca, lo que lleva a la formación de grietas y fisuras. Estas tensiones se ven agravadas por la presencia de cemento y hierro, que tienen mayores coeficientes de expansión que las rocas sedimentarias.

En conclusión, es necesario dirigir acciones de conservación, especialmente hacia las brechas, las cuales son las más vulnerables a las condiciones de exposición que enfrentan. Además, los materiales de restauración deben ser compatibles con ambas litologías para evitar tensiones internas.

Abstract

The pre-Hispanic city of Chichén Itzá is one of the most important archaeological sites in Mexico and has been recognized by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) as a World Heritage Site since 1988, also in 2007 it was considered one of the New Seven Wonders of the World. It was granted exceptional universal value for its architectural qualities and the iconography integrated into its façades, featuring extraordinary relief representations and attached sculptures. Both attributes are made from limestone and breccias, which are abundant in the region due to their location within the Yucatán Carbonate Platform. Exposure to the humid subtropical climate has caused masonry buildings to experience material loss, structural weakening, and aesthetic damage.

Analysis of the limestone used in the North Temple of the Great Ball Court has provided insights into stone weathering processes in Chichén Itzá. This building originally featured significant iconographic scenes on all its interior walls, the deterioration of its substrates is apparent a century after its restoration.

This investigation will show the findings from the analysis of breccias and limestones, including petrophysical, petrographic, and geochemical data. Additionally, *in situ* thermohygrometric data was collected to understand the relationship between weathering, texture, and composition of the rocks with external environmental factors. The alteration and material loss observed is attributed to both intrinsic material conditions and the influence of regional climate, including sunlight exposure, temperature fluctuations, and humidity changes throughout the day.

Breccias are more prone to material loss due to their higher porosity and water absorption percentages compared to limestones. This results in increased moisture entering the rock, leading to mineral leaching, dissolution, and reduced cohesion in the matrix of the breccias. As the breccias weaken, the clasts within the matrix also detach, leading to the formation of voids and fractures, which accelerates erosion.

On the other hand, calcites expand easily with rising temperatures, starting to deform at around 40°C. When they cool and contract, they do not return to their original dimensions. This creates internal stress in the rock, leading to the formation of cracks and fissures. These stresses are made worse by the presence of cement and iron, which have greater expansion coefficients than sedimentary rocks.

In conclusion, it is necessary to direct conservation actions, especially towards breccias, which are the most vulnerable to the exposure conditions they face. Furthermore, restoration materials must be compatible with both lithologies to avoid internal stress.

INTRODUCCIÓN

La ciudad prehispánica de Chichén Itzá es uno de los sitios arqueológicos más importantes de México, representa uno de los vestigios más significativos de la civilización maya y es patrimonio cultural de la nación. Tras años después de su abandono, redescubrimiento y restauración, se observa que los edificios de mampostería han cedido al paso del tiempo, la vegetación y las condiciones ambientales del clima subtropical de la región. Las rocas con la que se encuentran contruidos los inmuebles del sitio son calizas y brechas calcáreas, abundantes en la zona, debido a que se encuentra ubicado en la Plataforma Carbonatada de Yucatán.

La roca, especialmente la caliza, es un material común empleado en la construcción de monumentos desde hace miles de años, con el paso del tiempo estas se ven afectadas por factores intrínsecos y extrínsecos que condicionan su permanencia en el tiempo. En el ámbito científico se han desarrollado numerosos análisis que asisten en la identificación puntual de las causas que ocasionan el deterioro de un bien en particular con la intención de encontrar las mejores estrategias de conservación y restauración de este patrimonio cultural. En el caso de las rocas, se suelen llevar a cabo estudios para la identificación de minerales y elementos, ensayos de resistencia y durabilidad, observación de muestras al microscopio, pruebas isotópicas, registros fotogramétricos, entre muchos más.

Con el preámbulo anterior, el objetivo de la presente investigación es ahondar en la correlación que existe entre la generación de deterioros, los factores extrínsecos ambientales y la composición petrológica de las litologías que están presentes en el Templo Norte de Chichén Itzá, el objeto de estudio de este proyecto. Dentro de los métodos empleados se llevaron a cabo análisis de sus características petrofísicas, petrográficas y geoquímicas, registros termohigrométricos *in situ*, documentación de deterioros y tipos de roca, complementado con información geológica, histórica y científica.

El propósito es proporcionar información útil para la correcta conservación de este inmueble a largo plazo y así preservar sus cualidades simbólicas, artísticas, históricas y culturales; además, para que así continúe siendo uno de los destinos culturales y turísticos más importantes del país.

1. HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se describen los objetivos e hipótesis de la investigación sobre los mecanismos de deterioro en las rocas de construcción del Templo Norte del Gran Juego de Pelota de Chichén Itzá. Además, se justifica el propósito del presente trabajo y el impacto social que tendrán sus resultados.

1.1 Hipótesis

La roca caliza con la que se construyó el Templo Norte tiene un grado, tipo y ritmo de deterioro que se relaciona con la textura y composición de la roca, en combinación con los factores externos a la que se encuentra expuesta.

1.2 Justificación

Actualmente no se cuentan con estudios que relacionen las propiedades geológicas y el grado de deterioro de las rocas con las que se edificaron los inmuebles de Chichén Itzá, se tomó el Templo Norte como objeto de estudio debido a su alto grado de deterioro en la cámara lo que facilitó la identificación de las texturas resultantes de la erosión. Por lo tanto, el presente trabajo representaría la primera vez que se aplican metodologías geo-arqueológicas a este inmueble. De esta manera, los resultados de esta investigación auxiliarán a valorar y mejorar los tratamientos de restauración que se han aplicado o lo harán en futuras intervenciones.

1.2.1 Impacto social

El conocer la relación entre textura y grado de deterioro ayudará a mejorar las técnicas de rehabilitación del templo, lo que conlleva la correcta preservación de un sitio de gran relevancia para la herencia cultural mexicana. También es necesario resaltar que la zona arqueológica de Chichén Itzá fue reconocida por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en 1988 como Patrimonio Mundial además de ser una de las siete nuevas maravillas del mundo moderno desde 2007. Por lo tanto, el adecuado mantenimiento del sitio contribuirá a que continúe siendo uno de los destinos turísticos más visitados de México y de esta forma prevalezca la generación de ingresos económicos tanto para la región como para el país.

1.3 Objetivo general

Caracterizar las propiedades texturales, petrográficas, mineralógicas, petrofísicas y geoquímicas de las rocas calizas que conforman el Templo Norte, documentar los deterioros que presenta y asociar estos en función de los factores ambientales de la región.

1.4 Objetivos específicos

- Elaborar mapas litológicos y de deterioros del Templo Norte del Gran Juego de Pelota en Chichén Itzá.

- Determinar las características petrofísicas de las calizas como son la porosidad, densidad, absorción y expansión térmica e hídrica.
- Obtener la composición de elementos mayores y traza por medio de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado por Inducción (ICP-MS), Espectrometría de Emisión Óptica (ICP-OES), Fluorescencia inducida por Rayos X (FRX) y Difracción de Rayos X.
- Observar y caracterizar la textura y estructura de las rocas mediante un análisis de facies y microfacies empleando láminas delgadas.
- Correlacionar los resultados analíticos, texturales y de degradación de los sillares.

2. DESCRIPCIÓN, CONTEXTO HISTÓRICO Y GEOLÓGICO DEL GRAN JUEGO DE PELOTA DE CHICHÉN ITZÁ

2.1 Descripción general del Templo Norte del Gran Juego de Pelota

El Templo Norte se localiza en la zona arqueológica de Chichén Itzá, en el municipio de Tinum del estado de Yucatán, México. El inmueble se posiciona en el extremo norte del Gran Juego de Pelota el cual es uno de los de mayor dimensión edificados en Mesoamérica (Figura 1) (Bueno, 2018:48).

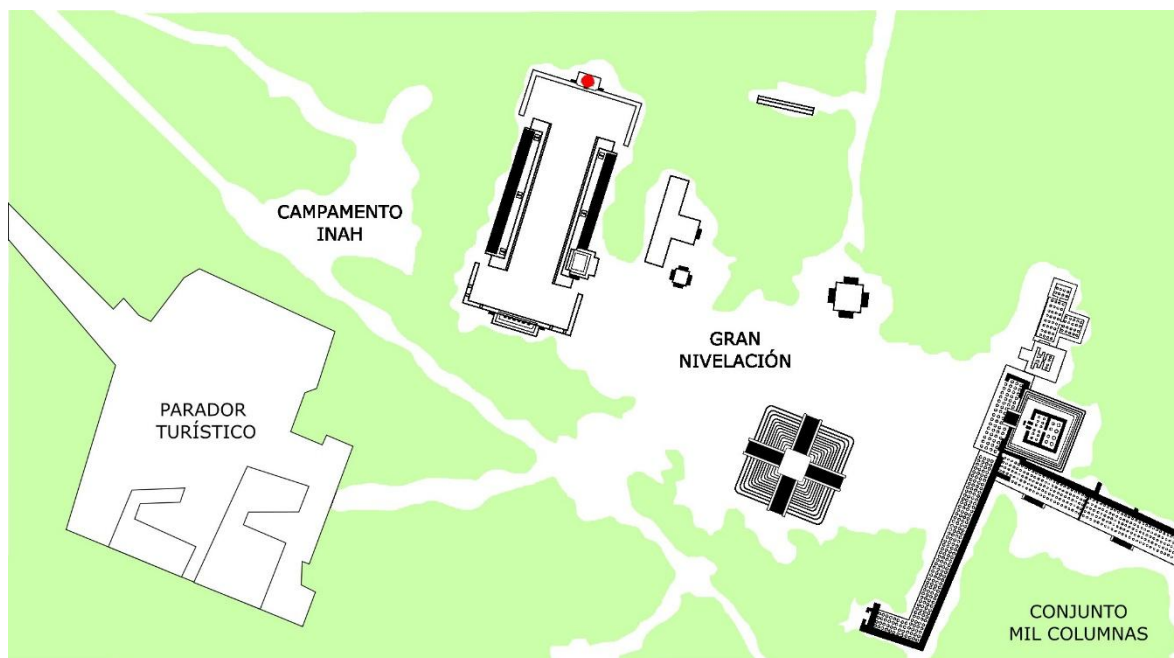


Figura 1. Plataforma de la Gran Nivelación. Modificado del 'Plano General de la Zona Arqueológica de Chichén Itzá' por Alberto R. Balam del Proyecto de Conservación Integral de Chichén Itzá, INAH (2023).

El Gran Juego de Pelota de Chichén Itzá abarca una superficie de 168 por 70 metros ($11,760 \text{ m}^2$), al centro la cancha forma una 'I', de manera que al este y oeste se levantan las tribunas en forma paralela por las que se accede por medio de escalinatas que abarcan sus fachadas exteriores. Al norte y sur del conjunto se encuentran dos templos de planta rectangular en cada extremo (Marquina, 1951:855).

El edificio al norte es el Templo Norte correspondiente a una estructura del Posclásico Temprano (900-1150 d.C.) cuya planta mide 10 metros de largo por 6 metros de ancho. Lo componen un basamento de tres cuerpos y una cámara con techo abovedado, del cual en la actualidad sólo se conserva la mitad norte, pues los sillares faltantes no han sido encontrados. La entrada al recinto se encuentra al sur, se accede por medio de una escalinata central flanqueada por alfardas, en la parte

superior se encuentran dos columnas y al lado de cada una, se integran a los muros dos jambas (Figura 2) (Marquina, 1951:865-869; Piña Chan, 1980:63).

El inmueble tiene un estilo denominado 'Maya-Yucateco', y está ornamentado en bajorrelieve en el muro norte de la cámara, la bóveda, columnas, jambas y alfardas; se representan escenas religiosas, cotidianas y bélicas, en las que se ilustra al dios Kukulcán, sacerdotes, guerreros y nobles (Piña Chan, 1980:63-65). La escena norte que se muestra en la imagen es la que tiene un mayor porcentaje de pérdida (Figura 2).

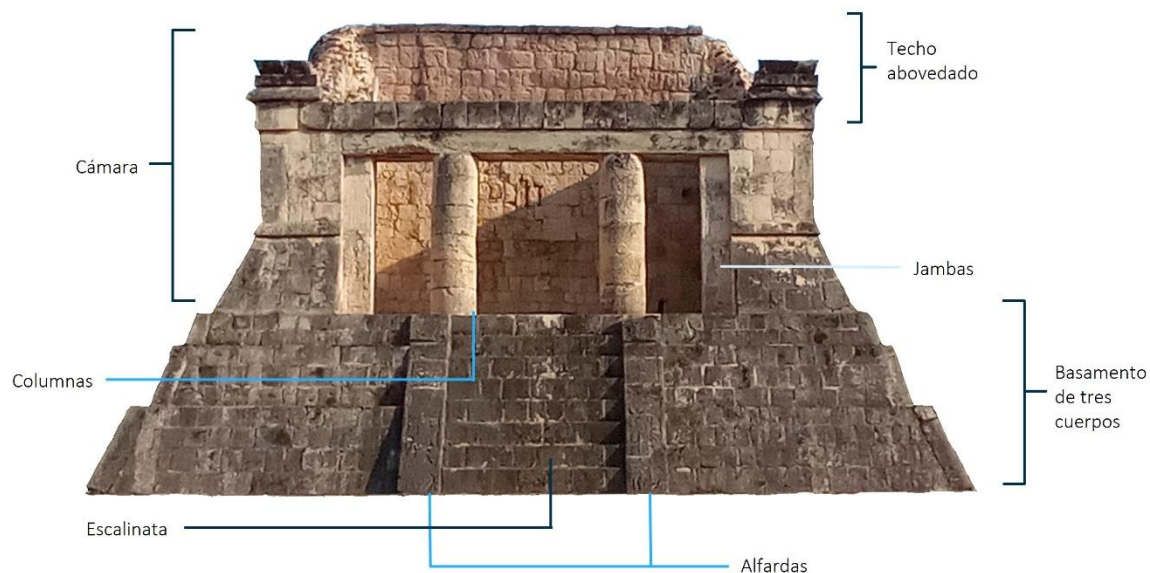


Figura 2. Diagrama de descripción formal del Templo Norte de Chichén Itzá.

2.2 Marco histórico de Chichén Itzá

El estado de Yucatán posee alrededor de 1,800 sitios arqueológicos, en su territorio se ubica casi la totalidad de la zona de las Planicies del Norte del área maya y una parte de la zona Puuc. El desarrollo cultural prehispánico de Yucatán se suele dividir en los siguientes periodos cronológicos: Preclásico (2500 a.C.-250 d.C.), Clásico (250 d.C.- 900 d.C.) y Posclásico (900 d.C.-1519 d.C.). Es durante el Clásico Terminal (800-1000 d.C.) donde se alcanza el mayor auge y ocupación del estado, incluso se identifican influencias económicas e ideológicas de culturas del altiplano central, tales como la relevancia de las actividades militares (Gallareta Negrón, 1999:305-306).

Entre estos sitios arqueológicos se encuentra Chichén Itzá el cual es uno de los más importantes de México, fue un centro de peregrinaje y capital política prehispánica, su nombre significa en lengua maya "boca del pozo de los itzaes" que hace

referencia al Cenote Sagrado localizado en su territorio, se creía que este era una entrada al inframundo y albergaba a los dioses de la lluvia (Barrera Rubio, 1999:312; Vela, 2008).

Chichén Itzá tuvo dos apogeos, el primero durante el Clásico Terminal (800 d.C. a 950 d.C.) del cual datan los edificios de estilo Puuc, al finalizar este periodo ocurre un acontecimiento significativo que es la llegada de un grupo proveniente del centro de México, el cual tuvo fuertes influencias ideológicas en la región. Se construyó un gran número de edificios con un nuevo estilo arquitectónico, se rindió un mayor culto a Kukulcán, aumentó la importancia de los guerreros y comerciantes, se abrieron nuevas relaciones locales y foráneas y se obtuvo un fuerte vínculo con el Altiplano Central, particularmente con Tula (Volta y Braswell 2014, Gallareta Negrón, 1999:306; Millet Cámara, 1999; Vela, 2008).

El segundo auge ocurrió en el Posclásico Temprano (900-1150 d.C.) cuando la ciudad se consolida como la más importante de Yucatán. En el postclásico medio y tardío Chichén Itzá declinó, pero continuó siendo un sitio de peregrinaciones y rituales incluso hasta la época de la conquista (Gallareta Negrón, 1999:306; Vela, 2008).

Durante el siglo XIX e inicios del XX se llevaron a cabo varias exploraciones en el estado de Yucatán, muchos de ellos por extranjeros, con la finalidad de descubrir vestigios arqueológicos. En el periodo que comprende de 1839 a 1841 John Lloyd Stephens y Frederick Catherwood visitan en dos ocasiones la zona de Chichén Itzá y detallan su viaje en escritos y grabados. Posteriormente otros arqueólogos, artistas y fotógrafos se aventurarían al sitio creando una gran cantidad de informes, entre ellos destacan Charnay, Julius y Plongeon (1875), Maudslay, Maler, Holmes (1895) y Breton. Más adelante, a inicios del siglo XX, continuarían con las exploraciones Thompson (1900), Seler y Tozzer. Más tarde, Marquina, Piña Chan y Erosa Peniche, profundizarían en la investigación de temas como la historia,



Figura 3. Templo Norte antes de su reconstrucción (ca. 1928). Fotografía recuperada de la Mediateca INAH (INAH, s/f).

arquitectura e iconografía del sitio (Barrera Rubio, 1999:309; Marquina, 1951:834; Vela, 2008).

Por medio de la Dirección de Antropología y la Institución Carnegie de Washington se llevaron a cabo labores de excavación y restauración de 1923 a 1936 (Figura 3), de donde se obtuvo nueva y valiosa información sobre arquitectura, pintura e inscripciones (Barrera Rubio, 1999: 309; Marquina, 1951:834-836; Vela, 2008). Cobos (2008) refiere también que se llevaron a cabo estas labores de reconstrucción, sin embargo, menciona que estos se extendieron hasta 1951, ya por parte del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH).

En 1980, el arqueólogo Schmidt hizo el rescate de la Gran Nivelación y restauró las fachadas faltantes del Castillo, además de preparar la nominación de Chichén Itzá para la lista de patrimonio mundial (INAH, 2011). El 9 de diciembre de 1988 la zona arqueológica es inscrita en la lista de patrimonio mundial como bien cultural por parte de la UNESCO bajo los criterios i, ii y iii al considerarla una obra maestra del genio creativo humano, atestiguar un intercambio de valores humanos considerable y testimonio único sobre una tradición cultural (UNESCO).

En la década de 1990, Schmidt se encontró al frente de un proyecto de investigación en Chichén Itzá, también se restauraron conjuntos como el Osario y el Grupo de la Serie Inicial (Vela, 2008).

Los proyectos de conservación en Chichén Itzá iniciaron varias décadas después de la restauración de los edificios desde la década de los noventa, con la realización de varios diagnósticos e intervenciones aisladas en las subestructuras de la Gran Nivelación, tales como la Subestructura de Guerreros, la del Templo de los Guerreros y El Castillo, además de la intervención de la pintura mural del Templo Superior de Jaguares (INAH, 2011). A partir del 2005, bajo la coordinación de la restauradora Claudia García, se han venido realizando proyectos dedicados a la conservación de los bienes asociados a la arquitectura, con la reintervención de los contextos pictóricos de las subestructuras y la atención a las escenas de relieve en piedra integradas a las fachadas del área de visita. Durante 2023 se llevaron a cabo nuevos proyectos de conservación, uno de los inmuebles restaurados fue el Templo Norte, donde se retiraron juntas de cemento, se eliminaron biopelículas y se aplicaron nuevos resanes con un mortero de sascab.

2.3.1 Distribución de la ciudad y estilo arquitectónico

Chichén Itzá cubre alrededor de 15 km², se presenta en grupos arquitectónicos monumentales y centrales rodeados por murallas, fuera de estos se edificaron otros conjuntos medianos y en la periferia habitaba la población común en estructuras pequeñas de materiales perecederos. Todo se encontraba conectado por sacbés

(calzadas o caminos) que al año de 1999 se habían descubierto 75 (Schmidt, 1999; Vela, 2008).

Los inmuebles monumentales se distribuyen en tres plazas:

- Complejo de las Monjas- el Caracol-Templo de los Tableros-Akab Dzib-Casa Colorada
- Grupo del Osario-Casa de los Metates-Casa de las Columnas
- Grupo de la Gran Nivelación- Plataforma del norte o Gran Nivelación: El Castillo, Juego de Pelota, Templo de los Guerreros, Grupo de las Mil Columnas, El Tzompantli, el Templo de las Águilas y Templo de Venus

Arquitectónicamente, sus muros se encuentran constituidos de roca, las de relleno son irregulares y la de los revestimientos están cortadas con más precisión. Los techos son de tipo “bóveda maya”. Como se mencionó con anterioridad, se pueden distinguir dos estilos principales el Puuc y uno con influencias de foráneas (Centro de México, costa del Golfo y Oaxaca); este último se identifica por elementos como pirámides escalonadas, muros inclinados, cuartos amplios con columnas o pilastras que sostienen los techos y pórticos semiabiertos, plataformas con escaleras en sus cuatro lados y juegos de pelota con banqueta angosta (Vela, 2008). Los muros estaban decorados con relieves, estuco y policromía, entre algunos de los motivos decorativos se encuentran figuras zoomorfas (serpientes, jaguares, águilas), mitológicas (serpientes emplumadas, hombres águila-serpiente-jaguar, cargadores del cielo, árboles con animales) y escenas de la vida pública (guerreros, dignatarios, sacrificios) (Vela, 2008).

2.3.2 El Gran Juego de Pelota

El Gran Juego de Pelota se ubica al extremo norte de Chichén Itzá, es el más grande e importante de toda la civilización maya, su construcción data de la segunda fase de construcción de la Gran Nivelación, alrededor del año 1000 d.C. (Bíró y Pérez de Heredia, 2021).

El deporte implicaba un evento religioso que simbolizaba la dualidad (luz y oscuridad, muerte y renacimiento), estos encuentros solían finalizar con un sacrificio. La dinámica consistía en el enfrentamiento de dos equipos, los jugadores debían rebotar una pelota de hule macizo con las caderas, codos y muslos, de manera que no tocara el suelo; se obtenía puntaje si la esfera caía al suelo del equipo contrario o si atravesaba los aros de roca colocados en los muros que flanqueaban la estructura del juego (Bueno, 2018:50-51).

Como se mencionó con anterioridad, en los extremos norte y sur de la cancha se localizan dos templos, uno de ellos es el objeto de este trabajo de investigación, en la literatura se indica que el uso de estos recintos fue ritual.

Se ha interpretado recientemente que los bajorrelieves del interior del Templo Norte (Figura 4) representan un ritual de inauguración de un nuevo gobernante, relacionado con el relato de la entronización del noble Hunac Ceel de Mayapán en el manuscrito Chilam Balam de Chumayel. El texto nombra a los participantes y recoge las actividades y ofrendas realizadas, estas pueden agruparse en rituales preparatorios, ceremonia inicial, presentación del heredero, penitencia del príncipe y finalmente, posesión del cargo. Se identificó también que el personaje que más aparece en los relieves del Templo Norte es el Príncipe Turbante de Serpiente, quien ilustraría al aspirante al trono, este individuo también puede observarse en relieves y pintura mural de otros edificios de Chichén Itzá como el Templo Inferior de Jaguares, Templo del Chacmool, Templo de las Mesas y el Templo de los Guerreros (Bíró y Pérez de Heredia, 2021).

Bíró y Pérez de Heredia (2021) teorizan que los bajorrelieves no son contemporáneos a la construcción del templo, cabe la posibilidad que se refieran a eventos pasados o mitológicos. De igual manera, si se está representando a Hunac Ceel, este podría haber vivido siglos más tarde (S.XII o S.XV, por ejemplo), por lo que la elaboración de los relieves surge como muestra de la permanencia de los rituales de iniciación de sus reyes y el sistema de gobierno.

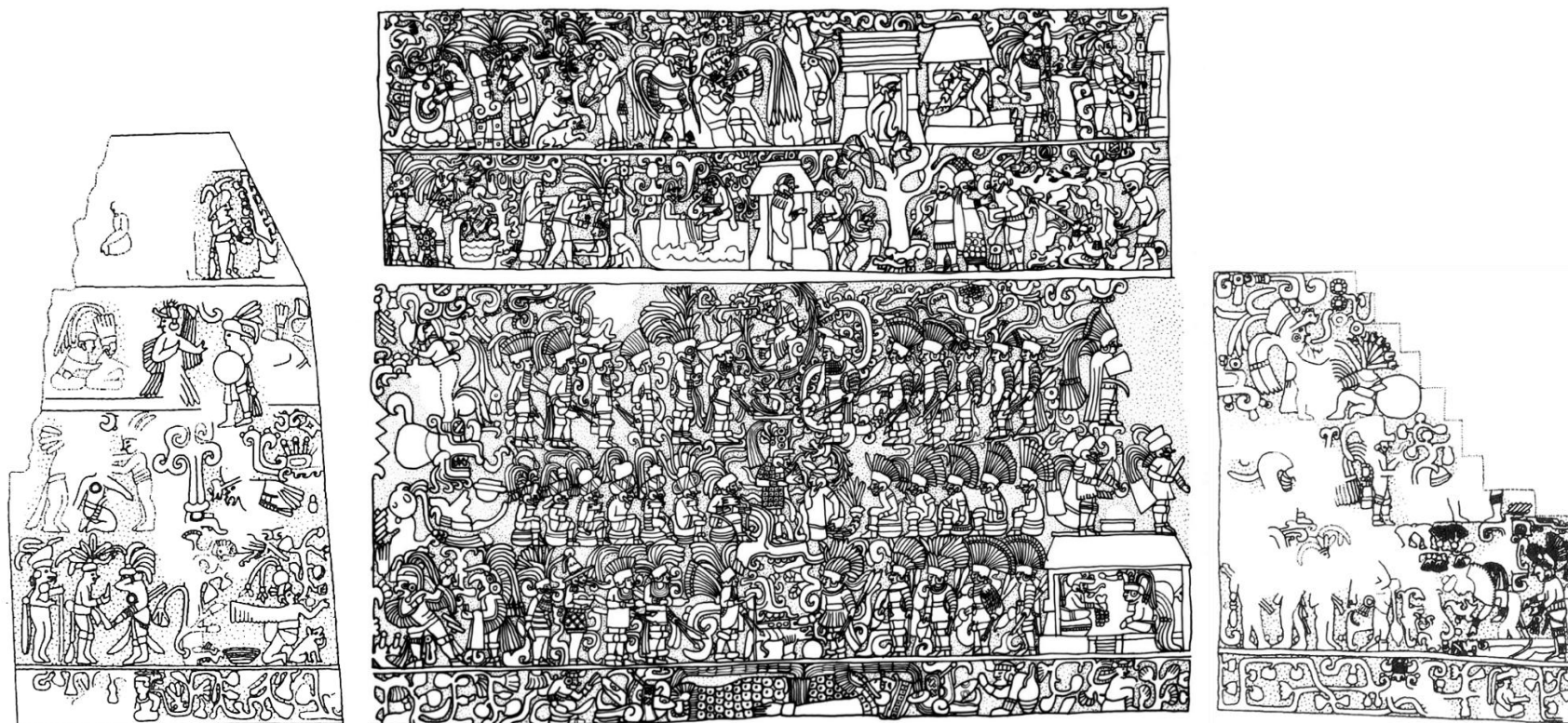


Figura 4. Bajorrelieves del muro norte (al centro) del Templo Norte, dibujo por Linda Schele recuperado de la Fundación para el avance de estudios mesoamericanos. Bajorrelieves de los muros oeste y este (a los lados) dibujos por Linnea Wren en *Schele y Mathews (1999-245-255)*.

2.3 Marco geológico de la zona arqueológica de Chichén Itzá

El área de estudio se localiza en la Plataforma de Yucatán, una provincia fisiográfica de 300,000 km² que abarca parte del sureste del país (Yucatán, Campeche y Quintana Roo) además del noreste de Belice y norte de Guatemala y se extiende bajo la superficie del Golfo de México (López-Ramos, 1975).

Es importante mencionar que existe poca información sobre la descripción geológica de la región. La recopilación de datos se ha visto obstaculizada por el clima, la espesa vegetación tropical, poco relieve, lixiviación y alteración de las rocas y la transformación en caliche de los afloramientos (Bonet y Butterlin, 1979:11; López-Ramos, 1979:36).

Los trabajos de exploración e investigación geológica de la Península comenzaron a realizarse a finales del siglo XIX con las expediciones de científicos como Sapper (1896). Más tarde, con la perforación de pozos petroleros en la Península durante la década de 1950 se logró recabar y consolidar información más detallada, donde destacan los trabajos de Bonet y Butterlin y en la década de 1970 con los artículos de López-Ramos.

Sapper (1896) menciona que no existe una gran variedad de formaciones geológicas, las capas sedimentarias están prácticamente horizontales y se distinguen los siguientes horizontes geológicos: calizas grises o blancas, calizas rojas y brechas, calizas del Plioceno y calizas cuaternarias.

Es importante definir que las calizas son rocas sedimentarias, formadas por procesos biológicos y bioquímicos que precipitan carbonato de calcio, es común encontrarlas en aguas cálidas y someras tropicales y subtropicales (Tarbuck y Lutgens, 2005:208-210). Las brechas calcáreas también son rocas sedimentarias, se caracterizan por fragmentos angulosos de caliza incrustados en una masa básica compuesta por una matriz de grano fino (Flügel, 2010:228) los clastos y la matriz provienen de procesos de transporte y depósito por mecanismos como la gravedad, terremotos, tormentas, oleaje, entre otros (Flügel, 2010:230).

López-Ramos (1975) menciona que la Península de Yucatán suele dividirse en tres regiones: la planicie norte (abarca el terreno entre las ciudades de Mérida, Valladolid y Puerto Juárez), la Sierrita de Ticul y al sur de ésta se ubica la "Planicie Central". La Zona arqueológica de Chichén Itzá se localiza entonces dentro de la planicie norte y es en este terreno donde se enfocará la descripción geológica.

Desafortunadamente no se cuenta con una columna geológica precisa, sin embargo, con las evidencias recabadas durante la exploración de pozos petroleros (alrededor de la década de los 50's del siglo pasado), López-Ramos (1979:43-52) consiguió elaborar una relación estratigráfica aproximada de las tres regiones de la

península, observando que las formaciones del Cenozoico se volvían más jóvenes conforme se avanzaba al norte. En la planicie norte se pueden distinguir los estratos que se presentan en la Tabla 1. En adición a la tabla, Bonet y Butterlin (1979:10) señalan que debajo de la capa superficial de caliche y antes de llegar a la roca caliza viva, suele encontrarse “sascab” que definen como una arena calcárea, resultado de la descomposición de las calizas, normalmente utilizado por los mayas en la construcción de caminos a los que se les llama “sacbé” (Pacheco-Martínez y Alonzo-Salomón, 2003).

Como se puede observar en la Tabla 1, destaca la presencia de tres formaciones: Icaiché, Chichén Itzá y Carrillo Puerto. Bonet y Butterlin (1979:15-27) ahondan en la descripción de cada una, resaltando los siguientes datos:

a) Formación Icaiché

Se considera como la formación más antigua de la Península de Yucatán en su porción mexicana (Bonet y Butterlin, 1979:20-21; Sapper, 1896). Aflora en el centro de la región meridional de la Península y hacia el este se encuentra junto con la formación Chichén Itzá, se trata de calizas con yeso y margas, el yeso se presenta en bancos de varios metros de espesor que se intercala con las otras dos litologías. No se encuentra fauna.

b) Formación Chichén Itzá

Son en su mayoría calizas del Eoceno, Bonet y Butterlin (1979:21) mencionan que es probable que el depósito de estas rocas se llevó a cabo en una cuenca marina sin que variaran las condiciones de sedimentación. Los mismos autores separan esta formación en tres miembros:

-*Miembro Xbacal*: Calizas amarillas, blancas o grises, cristalinas, pueden encontrarse margas o lutitas verdosas; su espesor llega a alcanzar cientos de metros. Dentro de la microfauna existen bastantes miliólidos, cuantiosa *Operculina cabenula*, además de *Borelis floridanus* Cole, *Discocyclina cristensis*, *Coskinolina elongata* Cole, *Nonion*, *Helicostegina gyralis* Barker y *Grimsdale*.

-*Miembro Pisté*: Su nombre refiere a la localidad al oeste del sitio arqueológico de Chichén Itzá. En los niveles inferiores se presenta como calizas amarillas en capas gruesas microcristalinas, en los superiores son rocas blancas-amarillentas en capas gruesas que finalizan con calizas blancas delgadas (10 a 40 cm) compactas y duras. Su espesor puede alcanzar cientos de metros.

Presenta una gran cantidad de microfauna del Eoceno Medio, entre ellas algas calcáreas (*Clypeina*), moluscos mal conservados, foraminíferos de las familias Valvulinidae (*Coskinolina floridana* Cole, *Dietyoconus cookei*, *Dietyoconus americanus*, *Pseudochrysalidina floridana* Cole, *Coskinolinoides jamaicensis* Cole,

Olavulina floridana Cole), Cymbaloperidae (*Gunteria floridana*), Victoriellidae (*Europertea*, *Carpenteria*, *Rotalidae*), Amphisteginidae (*Amphistegina*), Miliolidae (*Pyrgo*, *Triloculina*, *Quinqueloculina*). Bonet y Butterlin (1979) refieren que la microfauna es parecida a aquella que se puede encontrar en la Florida y las Grandes Antillas.

Cabe mencionar que López-Ramos (1979:39) señala el miembro Pisté como una formación y no como un miembro.

-*Miembro Chumbe*: Se localiza en una zona limitada en los alrededores de la localidad de Libre Unión. Son calizas blancas cristalinas y macizas; su espesor es menor a los 100 metros. Contiene microfauna como miliólidos, la asociación *Operculina willcoxi*- *Lepidocyclina pustulosa* H. Douvillé, además de *Amphistegina*, *Amphistegina lopeztrigoi* y *Lepidocyclina macdonaldi* Cushman.

c) Formación Carrillo Puerto

Aflora en gran medida en el estado de Quintana Roo, su nombre proviene de una localidad perteneciente a este territorio. Se presentan varios niveles, los inferiores presentan coquinas de espesores menores a un metro, cubiertas con calizas amarillentas, macizas y con moluscos, después existen calizas amarillentas y rojizas, arenosas y nodulosas que se pueden alternar con margas amarillas, arenas y areniscas; por último, en los niveles superiores se encuentran calizas blancas o amarillentas. El espesor puede alcanzar centenares de metros.

Su microfauna es de edad miocénica media a reciente, se compone de abundantes Peneroplidae (*Peneroplis proteus* d'Orbigny, *Archaias engulatus*, *Archaias compressus* y miliólidos), también *Amphistegina*, *Sphaerogypsina*, hemacoralarios y moluscos (lamelibranquica y gasterópodos).

Como complemento a la información anterior, la carta geológico-minera de Mérida (Zarate-Barradas et al., 2006) indica que existen principalmente dos Formaciones Geológicas: Formación Chichen Itzá, que se compone de rocas carbonatadas constituidas por texturas grainstone, wackestone, brechas calcáreas y horizontes de margas; la segunda, Carrillo Puerto, de texturas mudstone, wackestone, grainstone, packstone, boundstone y brechas calcáreas.

Tabla 1. Litología, temporalidad y fauna de la planicie norte de la Península de Yucatán según López-Ramos (1979)

ERA	PERIODO	ÉPOCA	FORMACIÓN/LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	FAUNA Y MICROFAUNA
CENOZOICO	Cuaternario	Pleistoceno		Caliche superficial, también se encuentra en forma de calizas alteradas, calcarenitas y calcilutitas que bordean la Península.	
	Neógeno	Plioceno	Formación Carrillo Puerto	Se presenta en unas zonas como una caliza blanca recristalizada con microfauna, en otras como caliza coquinoide y pulverulenta con restos de bivalvos o bien en forma conglomerática.	Algas, <i>Archaias</i> , <i>Amphistegina</i> , <i>Peneroplis proteus d'Orbigny</i> , <i>Sorites</i> , <i>Peneroplis</i> , <i>Cycloculina</i> y ostrácodos.
		Mioceno			
	Paleógeno	Oligoceno	Calizas, lutitas, margas	<u>Superior:</u> Caliza y calcarenita pulverulenta, coquinoide, de colores crema y blanco.	Abundancia de restos de moluscos (bivalvos) y briozoarios, además de algas, miliólidos, corales, <i>Lepidocyclus</i> , <i>Miogyopsis</i> (<i>gunten</i> y <i>antillea</i>), <i>Heterostegina</i> , <i>Camerina</i> , <i>Amphistegina lessoni</i> , <i>Numulitides</i> y <i>Meterostegina antillea</i> .
				<u>Inferior:</u> Calcarenita pulverulenta, quebradiza, con caliche y de color blanca y rosada. Espesores de 1-1.5 m	Principalmente <i>Eulepidina favosa</i> , <i>Nummulitides</i> y <i>Bioculina</i> . Además de algas, <i>Lepidocyclus</i> , <i>Camerina</i> , <i>Gypsina</i> , <i>Nephrolepidina radista</i> , <i>Eponides</i> y <i>Rotalina mexicana</i> .
		Eoceno	Formación Pisté, Formación Icaiché, Formación Chichén Itzá,	<u>Superior:</u> Calizas blancas masivas, sacaroides	Abundantes miliólidos, <i>Operculina willcoxi</i> , <i>Lepidocyclus</i> , <i>Postulosa Douvillé</i> y <i>Amphistegina</i> .
				<u>Medio e Inferior:</u>	Los afloramientos de la Fm. Chichén Itzá tienen algas calcáreas (<i>Clypeina</i>),

MESOZOICO				Calizas microcristalinas, una parte pulverulentas o travertinizadas, de color blanco a gris crema, a veces manchadas de color café por óxidos de hierro. Espesores de 1-1.20 m	moluscos y foraminíferos de las familias valvulinidae, cymbaloporidae, victoriellidae, rotalidae-amphisteginidae y miliólidos.
		Paleoceno		Calizas compactas, cristalinas, de color amarillo crema a blanco, de dolomitización y silificación secundaria frecuentes.	Sin fósiles característicos.
	Cretácico	Superior	Calizas, margas, areniscas, tobas, andesita		
		Medio	Andesita		

3. MATERIALES Y MÉTODOS DOCUMENTALES, PETROFÍSICOS, PETROGRÁFICOS Y GEOQUÍMICOS PARA EVALUAR LAS ROCAS CALIZAS DEL TEMPLO NORTE DE CHICHÉN ITZÁ

En este capítulo se presentan los detalles metodológicos que se emplearon para el desarrollo del presente trabajo de investigación, el cual tiene como objetivo comprender a nivel fisicoquímico las alteraciones de la roca caliza que compone el Templo Norte de Chichén Itzá. Para alcanzar los objetivos planteados se diseñó la metodología a continuación descrita, que implicó la colecta de información en la literatura, visita y reconocimiento del sitio de trabajo, colecta de muestras y procesamiento de las rocas para análisis en laboratorio. Lo anterior proporcionó información sobre las propiedades petrográficas, petrofísicas, geoquímicas y mineralógicas de las calizas. A continuación, se describen a detalle las etapas mencionadas.

3.1 Documentación

Como etapa inicial y que continuó durante todo el trabajo de investigación, se realizó una extensa y detallada consulta bibliográfica, principalmente en libros, artículos, tesis, informes, bases de datos, mapas y diagramas. La información es sustento del contenido del trabajo de investigación.

3.2 Registro en campo

En el periodo comprendido entre finales del año 2022 y mediados del 2023 se realizaron tres visitas a la zona arqueológica de Chichén Itzá donde se realizaron las siguientes actividades de registro en el Templo Norte del Juego de Pelota, tales como:

- Levantamiento de datos generales del inmueble y elaboración de diagramas de deterioro, con la finalidad de contar con un registro gráfico del tipo de daño y las zonas afectadas del inmueble.
- Mapeo litológico que ubica cada tipo de roca en el edificio; la comparación de este mapa con el de deterioros, ayudó a identificar si la litología predispone el material al tipo y grado de deterioro. Posteriormente, se realizó la ilustración de mapas litológicos y de deterioros del inmueble (tanto del exterior como el interior del recinto) por medio del software de diseño libre Inkscape para encontrar una relación entre la litología y textura de la roca con las características de su degradación. Para los términos empleados en el mapeo de deterioros se comparó la información obtenida con los registros llevados a cabo por el Proyecto de Conservación Integral de Chichén Itzá en la temporada de 2023 (Reyes et al., 2023).
- Registro de temperatura y humedad de cada litología, muro y del grado de deterioro en tres horarios distintos del día (8:00 a.m., 12:00 p.m. y 2:30 p.m.),

para evaluar cómo inciden en la roca las fluctuaciones de estos parámetros a lo largo del día. Esto se llevó a cabo durante el mes de junio, época de lluvias en Chichén Itzá.

3.2.1 Toma de muestras

El muestreo de rocas fue realizado para los análisis geoquímicos, petrográficos y ensayos petrofísicos.

Antes de la toma de muestras, se realizó una identificación visual de los dos tipos de roca de los que derivan los sillares del Templo Norte: caliza y brechas calcáreas rojas. Es importante mencionar que la mayoría del material no se extrajo de manera directa de los muros del Templo Norte. No obstante, se identificaron piedras similares en los alrededores del inmueble y que también corresponden a sillares del Juego de Pelota, lo cual permitió tener muestras del tamaño requerido para los análisis de expansión térmica, hídrica, capilaridad, destrucción de sales y resistencia a la compresión uniaxial.

Solo cuatro de las muestras pertenecen directamente a los muros del edificio, proporcionadas por el Proyecto de Conservación Integral de Chichén Itzá del INAH, son fragmentos que se desprendieron durante los procesos de restauración, que por su escasa dimensión solo fue posible realizarle análisis geoquímicos, de porosidad y microfacies.

Tal como se explicó previamente, uno de los puntos a tomar en cuenta para la selección de muestras fueron las dimensiones solicitadas para los análisis petrofísicos acorde a las normas del Instituto Alemán de Estandarización (Deutsches Institut für Normung) también llamadas Normas DIN, números 772-4(1998), 772-11(2004), 52102(1988), 12370 (1999) y 1926 (2007) de cuyos documentos se guiarán algunos de los ensayos. De esta manera, se buscaron rocas que tuvieran un tamaño mayor al indicado para poder cortarlas posteriormente. Las medidas y cantidad de muestra requerida para estos experimentos se resumen en la Tabla 2. Se debe tomar en cuenta que la cantidad es por cada tipo de litología (caliza y brecha calcárea).

Tabla 2. Medidas de muestras para experimentos petrofísicos acorde a las Normas DIN.

ANÁLISIS	FORMA	DIMENSIONES	CANTIDAD NECESARIA
Porosidad, densidad verdadera y aparente y absorción al vacío	Cubo	6.5 x 6.5 x 6.5 cm	1
Expansión hídrica y térmica	Prismas cuadrangulares	10 x 1.5 x 1.5 cm	3
Envejecimiento por explosión salina	Cubo	6.5 x 6.5 x 6.5 cm	1

Para la determinación de elementos químicos, así como las láminas delgadas, se utilizaron los fragmentos restantes del corte de las rocas, ya que la cantidad que se necesita es muy poca: 0.1 gr para geoquímica y fragmentos de 4 cm de lado aproximadamente para microfacies.

Adicionalmente, se tuvo acceso a un afloramiento de roca caliza dentro de la zona arqueológica, de donde se extrajo una muestra más. También, el proyecto de conservación proporcionó ocho muestras más, pertenecientes a otros dos inmuebles de la zona arqueológica, el Templo de los Guerreros y el Complejo Las Monjas, con la finalidad de comparar los resultados de las rocas. Una vez elegidas las rocas, se marcaron con tinta indeleble y se guardaron en una bolsa de polietileno resellable, la cual también estaba etiquetada con la información de cada una de las rocas, fecha, hora y lugar de recolección. El conjunto de rocas se introdujo en una caja plástica y fue enviada desde la ciudad de Mérida al Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por medio de una empresa de paquetería privada.

Para el manejo de la información obtenida de los análisis se utilizó el programa Microsoft Excel®, llevándose de manera paralela una bitácora de los avances. Algunos de los códigos de las muestras fueron otorgados por el Proyecto de Conservación Integral Chichén Itzá.

En la Tabla 3 se indica la litología y lugar de procedencia de las muestras analizadas, junto con algunas observaciones y las técnicas analíticas aplicadas a cada una, además se ilustra un mapa elaborado en Google Earth™ donde se marca el sitio de recolección de cada una (Figura 5).

Tabla 3. Muestras analizadas: litología, procedencia, observaciones y ensayos realizados.

CLAVE	CLAVE DEL PCICI	OBSERVACIONES	ENSAYOS PETROFÍSICOS						GEOQUÍMICA			PETROGRAFÍA
			Porosidad, ρ de matriz, aparente y absorción de agua al vacío	Capilaridad	Expansión hídrica	Expansión térmica	Explosión salina	Resistencia a la compresión uniaxial	ICP-OES	FRX	DRX	
BRECHAS												
TEMPLO NORTE												
BRE-01		90% de matriz	X									
BRE-02		90% de matriz	X		X	X			X	X	X	X
BRE-03		70% de matriz, clastos = o <12 mm	X		X	X			X	X	X	X
BRE-04		25% de matriz, contiene clastos de hasta 90 por 50 mm	X		X	X			X		X	X
BRE-05		90% de matriz	X	X	X	X		X				X
BRE-06		90% de matriz	X	X			X					X
BRE-07	TN-01	Son dos fragmentos, contienen 90% de matriz, fue obtenida del muro norte por dentro. Fila 4/ Columna 3. Canto izquierdo del bloque.	X									
BRE-08	TN-04	Son dos fragmentos, 90% de matriz, fue obtenido del muro este por dentro. Fila 6/ Columna 1							X	X	X	
COMPLEJO LAS MONJAS												
BRE-09	MON-01	70% de matriz, fue obtenida del anexo sureste portada norte	X									
BRE-10	MON-02	70% de matriz, fue obtenida del anexo sureste portada norte							X			X
TEMPLO DE LOS GUERREROS												
BRE-11	GUE-02	75% de matriz, contiene clastos = o <18 mm, fue obtenida de la zona este de la estructura	X						X			X
CALIZAS												
TEMPLO NORTE												
CAL-01			X		X	X			X		X	X
CAL-02		Roca de coloración negra	X		X	X			X		X	X

CLAVE	CLAVE DEL PCICI	OBSERVACIONES	ENSAYOS PETROFÍSICOS						GEOQUÍMICA			PETROGRAFÍA
			Porosidad, ρ de matriz, aparente y absorción de agua al vacío	Capilaridad	Expansión hídrica	Expansión térmica	Explosión salina	Resistencia a la compresión uniaxial	ICP-OES	FRX	DRX	
CAL-03		Roca con alveolización	X						X	X	X	X
CAL-04		Roca con vetas	X		X	X			X		X	X
CAL-05			X	X							X	X
CAL-06			X	X								
CAL-07			X	X								
CAL-08		Roca laminada	X									
CAL-09		Roca laminada	X									
CAL-10			X				X					X
CAL-11			X		X	X						
CAL-12			X	X				X				
CAL-14	TN-02	Fue obtenida del muro oeste por dentro. Fila 4/ Columna 1. Canto izquierdo del bloque.							X	X	X	
CAL-15	TN-03	Fue obtenida de la bóveda. Fila 1/ Columna 7. Esquina inferior izquierda del bloque.	X									X
COMPLEJO LAS MONJAS												
CAL-16	200PCHI	Son dos fragmentos, es una roca quemada y de coloración negra, fue obtenida del anexo sureste portada norte	X						X			X
CAL-17	201PCHI	Roca con vetas, fue obtenida del anexo sureste portada norte	X						X			X
CAL-18	202PCHI	Fue obtenida del anexo sureste portada norte	X									
CAL-19	203PCHI	Son tres fragmentos de una roca deteriorada (erosión), fue obtenida del anexo en la portada sur	X						X			X
TEMPLO DE LOS GUERREROS												
CAL-20	GUE-01	Obtenida de la zona este de la estructura	X						X			X
AFLORAMIENTOS												
CAL-21	AFL-01		X						X			X

SALES				
CLAVE DEL PCICI	OBSERVACIONES	GEOQUÍMICA		
		ICP-OES	FRX	DRX
179 SPCHI	Sal obtenida de la cámara en el muro norte, en un rango de altura de 0-50 cm del suelo.			X
181 SPCHI	Sal obtenida de la cámara en el muro norte, en un rango de altura de 100-150 cm del suelo.			X
182 SPCHI	Sal obtenida de la cámara en el muro norte, en un rango de altura de 150-200 cm del suelo.	X		
195 SPCHI	Sal fina de coloración gris oscuro, obtenida de la columna oeste en su cara norte.			X



Figura 5. Mapa de ubicación de extracción de muestras de caliza y brecha calcárea en la zona arqueológica de Chichén Itzá, obtenida de Google Earth™.

3.3 Técnicas analíticas

Los datos cuantitativos, semicuantitativos y cualitativos de las muestras fueron obtenidos empleando técnicas de análisis geoquímicos, petrofísicos y petrográficos. Los resultados proporcionaron información sobre las características de la roca constitutiva del Templo Norte de Chichen Itzá, de los afloramientos y de los otros inmuebles para su comparación.

Como se mencionó anteriormente, dependiendo del análisis a realizar, las rocas requirieron un procesamiento especial, ya sea que cortaran en cubos y prismas, se pulverizaran o se elaboraran láminas delgadas. Para ello, en el Laboratorio de Preparación de Muestras del Instituto de Geología, se utilizaron cortadoras y pulidoras marca Hillquist™, un molino de discos Retsch™ modelo RS 200 y uno de mandíbula modelo BB100 Mangan.

3.3.1 Registro termo-higrométrico *in situ*

El objetivo de llevar un registro termo-higrométrico es evaluar la incidencia de las fluctuaciones de estos parámetros en las rocas que forman los sillares del inmueble a lo largo del día.

Durante el mes de junio, en la semana del día 5 al 9 se registró la temperatura y humedad de las cuatro fachadas del templo, además de los tres muros de la cámara interior, tres veces al día: 8:00 am, 12:00 pm y 2:30 pm. Solo un día se tuvo acceso a la zona arqueológica a las 6:00 pm para tomar los datos. En cada muro se eligieron 3 bloques de cada litología, uno en buen estado de conservación, uno deteriorado y uno en estado intermedio.

Para la obtención de datos se utilizaron un termómetro infrarrojo (Fluke™ modelo 62 MAX) y un medidor de humedad (Ovibell DURO™ modelo 650195).

3.3.2 Valores petrofísicos

Se realizaron los siguientes estudios de valores petrofísicos básicos, estos ayudaron a evaluar las características físicas y mecánicas de las rocas calizas; ya que estudios anteriores han demostrado que existen relaciones entre las propiedades físicas de las rocas y su 'fábrica' interna, la cual es a menudo responsable de la respuesta a la degradación del material (Siegesmund y Dürrast, 2011:97).

Para la mayoría de los experimentos se siguieron los métodos indicados en las Normas DIN (Deutsches Institut für Normung). Las pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Petrofísica del Instituto de Geología de la UASLP.

- *Porosidad efectiva, densidad aparente (bulk density), densidad de matriz y absorción de agua al vacío*

La porosidad implica la proporción del volumen del poro con el volumen total de una roca; la porosidad efectiva se refiere a todos los poros donde pueden acceder fluidos y gases. Tiene efectos directos e indirectos en la mayoría de las propiedades físicas de la roca, por lo que es considerado el parámetro más importante, por ejemplo, controla el contenido de humedad. Si su valor es alto, su influencia resultará desfavorable en la degradación del material rocoso (Siegesmund y Dürrast, 2011:107).

El valor de la densidad aparente (ρ_{Bulk}) se refiere a la densidad de un material con respecto a su porosidad, mientras que la densidad de matriz (ρ_{Matrix}) no toma en cuenta este parámetro, por lo tanto, esta última proporciona evidencia sobre la composición y densidad de la matriz de la roca (Siegesmund y Dürrast, 2011:97-98).

Acorde a las normas DIN 772-4 (1998) y DIN 52103 (1988) , se secaron las muestras en horno (Boekel Scientific™ modelo 107905) a 50°C por 24 horas para posteriormente pesarlas en una balanza (KERN PCB™ modelo 2500-2). Después se introdujeron a un desecador de vidrio en el que se generó vacío con ayuda de una bomba aspiradora (Vevor™ modelo VP280) durante tres horas, después el recipiente se llenó de agua destilada. Las rocas se dejaron sumergidas por 24 horas, posteriormente se extrajeron del desecador, se les retiró el exceso de agua con ayuda de un paño absorbente y se pesaron de nuevo. En adición, se registró su peso bajo el agua; esto se logra con ayuda de un aditamento que se le coloca a la balanza, el cual consiste en un disco de metal sujetado en la parte inferior de la báscula, este se sumerge con la muestra en un recipiente lleno de agua y se pesa la roca.

Con base en los resultados de los pesos, se obtuvieron los valores petrofísicos mediante cálculos aritméticos.

- *Expansión hídrica y térmica*

Los cambios en temperatura y contenido de humedad de un material pétreo resultan factores importantes en su degradación, aún más si ambos se combinan. (Siegesmund y Dürrast, 2011:146).

Una roca varía sus dimensiones cuando se le inducen cambios de temperatura, esto a causa de su composición y contenido mineral; estas variaciones pueden causar una pérdida en la cohesión en los granos del material. El coeficiente de expansión térmica indica el cambio relativo en la longitud de una muestra acorde a un cambio de temperatura (Siegesmund y Dürrast, 2011:146-149).

Las fluctuaciones de humedad generan fenómenos de expansión y contracción. Expansión hídrica se refiere a los cambios dimensionales que sufre una roca cuando está en presencia de agua directamente (Siegesmund y Dürrast, 2011:161).

Ambos parámetros pudieron medirse con ayuda de dilatómetros (Westward™), los cuales son instrumentos especiales que miden los cambios longitudinales de una muestra de roca al calentarla y enfriarla o sumergirla en agua. Para ambos casos se requirieron prismas cuadrangulares de 10 x 1.5 x 1.5 cm de las muestras.

En cuanto a la expansión hídrica, las piezas previamente secadas durante 24 horas en horno se sumergieron en agua destilada en un recipiente de vidrio, se colocó un dilatómetro en uno de sus lados, interponiendo un cilindro de sílice entre la roca y el instrumento. Los cambios de longitud se registraron durante 3 a 4 horas.

Para la medición de expansión térmica, se coloca el prisma sobre una parrilla (Corning™ modelo PC-420D) en posición horizontal, a cada extremo se posiciona un dilatómetro y un cubo de sílice como intermediario. Se encendió la placa inicialmente a 50°C y se aumentó poco a poco la temperatura cada 10°C, dejando transcurrir un aproximado de 10 minutos entre cada incremento. Se registraron los cambios en la longitud de la roca acorde a la temperatura hasta alcanzar los 200°C, al llegar a ese punto, se descendió el valor nuevamente 10°C cada 10 minutos y se anotaron los cambios ocasionados por el enfriamiento. También se escribió la temperatura de la roca, esta se tomaba con ayuda de un termómetro infrarrojo (Fluke™ modelo 62 MAX).

- *Absorción capilar*

El agua resulta un factor determinante en los procesos de degradación de una roca, su presencia o ausencia es crucial para su estabilidad. La absorción capilar es un proceso que se lleva a cabo cuando un material poroso (poros de entre 10 µm a 1 mm) entra en contacto con un líquido, el cual será absorbido; el agua asciende por los capilares siempre y cuando se trate de una superficie hidrofílica, como es la de los minerales. Su coeficiente se determina con ayuda de una muestra cortada en cubo o cilindro, su cara inferior debe colocarse sobre un recipiente con agua; se debe anotar el cambio de peso de la roca periódicamente mientras dure el experimento (Siegesmund y Dürrast, 2011:122-123).

Acorde a la norma DIN EN 772-11 (2004) se necesitó que la muestra se encontrara cortada en cubos preferentemente de 6.5 cm de lado, estos se dejaron secar en el horno durante 24 horas, después se pesaron en la balanza. Posteriormente, con ayuda de una abrazadera y tres cadenas de metal, se dejó colgando el cubo de la parte inferior de la balanza, se verificó que la cara que quedaba en la parte inferior estuviera lo más lisa, recta y sin imperfecciones posible. Debajo del cubo se colocó una plataforma móvil con un recipiente plano de plástico encima. Subiendo la

superficie del contenedor lo más posible al cubo, debe verificarse que la cara inferior se encuentre lo más recta posible, es decir que una vez que se apoye en la superficie, toda la cara toque al mismo tiempo el plástico. Se alejó el recipiente nuevamente y se colocó agua destilada en el fondo, lo suficiente para cubrirlo. Se subió nuevamente la plataforma hacia la cara inferior del cubo, despacio, hasta que se formó un menisco entre el agua y la roca. Inmediatamente se comenzó a tomar el tiempo con cronómetro, debió registrarse por minuto el peso de la muestra. Los cambios se registraron durante una hora.

- *Prueba de envejecimiento por explosión salina*

Las sales son sustancias que se encuentran naturalmente dentro de la roca o pueden estar disueltas en el agua que entra en contacto con ella. Cristalizan cuando aumenta la temperatura o se evapora el agua y al crecer dentro del material aumentan su volumen, ejerciendo presión en las paredes de los poros, disgregando la roca (García y Flos, 2008:100; Steiger et al., 2011:240).

Los métodos de envejecimiento artificial son procesos de alteración acelerados y generados en el laboratorio con la finalidad de examinar procesos de deterioro y así evaluar con antelación sus efectos; normalmente solo se pone a prueba un parámetro, para facilitar su estudio (Matteini y Moles, 2001:253-256). De esta manera, se replicó cómo funciona la generación de sales sumergiendo una muestra en una solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4) al 30% durante 4 horas, después se secó a una temperatura de 50 °C durante 24 horas para que la sal pudiera cristalizar, posteriormente se repite el ciclo hasta que la muestra se destruya. Es importante pesar la roca en una balanza cada vez que se termina un ciclo, estos resultados se grafican para observar el comportamiento del material (Steiger et al., 2011:245).

La utilización de Na_2SO_4 está justificada debido a que su uso se indica en la norma estándar DIN EN 12370 (1999) para este tipo de experimento y además su presencia suele ser común en un gran rango de ambientes y ubicaciones, aunado a que es bastante destructiva (Çelik y Aygün, 2019).

- *Resistencia a la compresión uniaxial*

Los parámetros de fuerza mecánica se refieren a la capacidad de un material para soportar un esfuerzo sin quebrarse, su análisis es básico para la clasificación de la calidad las rocas de construcción y dependen de la heterogeneidad, fábrica, tamaño, forma, edad y condiciones de almacenamiento de la roca (Siegesmund y Dürrast, 2011:167).

El ensayo de resistencia evalúa la carga de compresión longitudinal que puede soportar una muestra de roca seca antes de que presente una pérdida total de cohesión sobre una superficie de fractura, es decir hasta que se rompa. En el

resultado influyen el tamaño de grano, foliación, cambios en la disposición de los minerales, humedad residual y edad de la muestra (Siegesmund y Dürrast, 2011:168 y 171-174).

Según la Norma DIN 1926 (2007), se llevaron cubos de muestra de las calizas y brechas a una prensa de compresión automática (marca Controls™ modelo AUTOMAX 5) en el Laboratorio de materiales de construcción de la Facultad de Ingeniería de la UASLP. Los ensayos se realizaron aplicando progresivamente una carga de 1.5 kg/cm² por segundo hasta que los cubos se rompieron.

3.3.3 Geoquímica de roca total

La composición de elementos mayores de las rocas se determinó empleando Espectroscopía de Emisión Óptica (ICP-OES) y de menores y traza con Espectrometría de Masas (ICP-MS), mientras que la mineralogía se analizó por medio de Difracción de Rayos X (DRX).

Antes de proceder a realizar los análisis geoquímicos, las muestras se prepararon de la siguiente manera. Se colocaron las rocas a secar en el horno Boekel Scientific (modelo 107905) durante 24 horas a 50° C, posteriormente se llevaron al Laboratorio de Preparación de Muestras, donde se empleó el triturador de mandíbula marca Retsch™ modelo BB100 Mangan y el molino de discos Retsch™ modelo RS 200. El producto pulverizado se pasó por dos tamices, primero uno No. 50 (300 µm) marca W.S. Tyler y después el No. 100 (150 µm) del mismo proveedor. El polvo restante se recolectó en frascos de polipropileno marca Deltalab. El restante que quedó sobre los tamices se almacenó en bolsas de plástico.

○ Espectroscopía de Emisión Óptica (ICP-OES)

La Espectroscopía de Emisión Óptica (ICP-OES) permite el análisis elemental de muestras pequeñas a partir de la incidencia de energía térmica o eléctrica sobre una muestra dispersa, de manera que los electrones de la sustancia realizan saltos energéticos y se reordenan emitiendo un espectro de radiaciones electromagnéticas en consecuencia. El espectro permite identificar los elementos de los cuales se compone la sustancia (Matteini y Moles, 2001:111-115).

El ICP-OES realiza excelentes lecturas cualitativas, pudiendo detectar hasta elementos traza, también pueden obtenerse datos cuantitativos, pero de menor

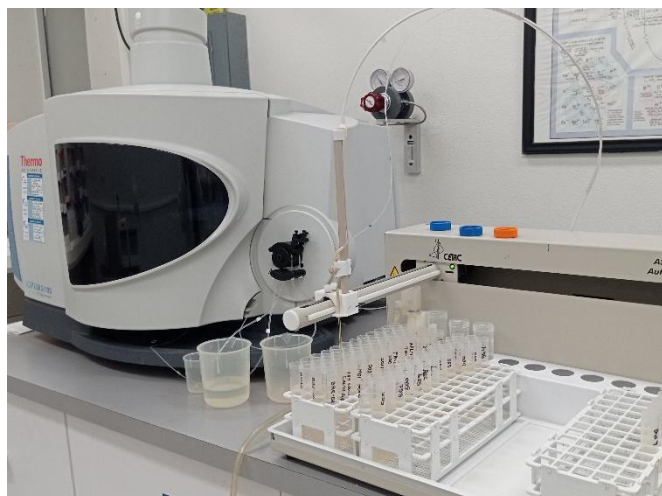


Figura 6. ICP-OES Thermo Scientific iCap serie 7000.

exactitud y no es adecuado para la identificación de compuestos (Matteini y Moles, 2001:115).

Para poder realizar la medición, fue necesario que las muestras de roca llevaran una preparación previa llamada digestión ácida, la cual rompe todos los enlaces de los átomos. Acorde al método sugerido por Almaguer-Rodríguez (2010), se pesaron 0.1 gramos de la muestra triturada en balanza analítica (Ohaus Adventurer™ modelo AR2 140) dentro de un vial de PFA (perfluoroalcoxi) marca Savillex, se registró el valor exacto de la medición. Posteriormente se le agregó a cada muestra, y de uno a uno, 1 ml de ácido nítrico (HNO_3) y 1 ml de ácido fluorhídrico (HF), ambos de grado ULTREX, esto con ayuda de una micropipeta (Eppendorf Research® plus de 0.5-5 ml).

Los viales se cerraron con su tapa y se colocaron sobre una placa calefactora (marca Barnstead International modelo Thermo Scientific™ Cimarec™ SP131325), donde se dejaron calentar durante 8 horas a 120°C , después se retiraron y se liberaron los vapores generados bajo una campana de flujo laminar. Posteriormente, las muestras se acomodaron nuevamente en la parrilla y se dejaron calentar a la misma temperatura; se retiraron del calor hasta que se evaporó el líquido restante, se generó una costra delgada al fondo de los recipientes.

Después de la evaporación, se le agregó 1 ml de ácido clorhídrico (HCl) grado ULTREX a cada vial, se cerró con su tapa y se les volvió a aplicar calor durante 8 horas, después de las cuales se retiraron de la parrilla y se dejaron enfriar. Se repitió entonces el procedimiento de evaporar los residuos de ácido.

Al finalizar, se le agregó a cada muestra 1 ml de agua desionizada y 1 ml de HNO_3 , se calentaron sobre la placa durante 8 horas más y al terminar se dejaron enfriar.

El siguiente paso fue el aforo, que consistió en vaciar la muestra digerida en un tubo para centrífuga de fondo cónico de 50 ml de capacidad, se enjuagaron los viales y tapas de cada muestra con agua desionizada de cada una por lo menos tres veces para recuperar todo el contenido posible. El tubo se terminó llenando con agua desionizada hasta alcanzar un peso de 50 gr.

Es entonces cuando se procedió a evaluar las muestras digeridas en el espectroscopio (Thermo Scientific™ modelo iCap™ Serie 7000 con un automuestreador CETAC™ modelo A5X-520, Figura 6) que se encuentra en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la UASLP. Los datos fueron recabados con el software QTegra.

○ *Fluorescencia no dispersiva de rayos X (FRX)*

Se le denomina como fluorescencia a los efectos ópticos temporales generados cuando un material es irradiado por cierta longitud de onda (rayos primarios) y este emite radiaciones de una longitud de onda mayor (rayos secundarios) debido a la ionización y reasentamiento de electrones. La intensidad de la energía y la longitud

de onda de los rayos secundarios se encuentran relacionadas con el número atómico de los elementos químicos, por lo tanto, resulta útil para la caracterización de materiales (Matteini y Moles, 2001:133).

Los analizadores de fluorescencia no dispersiva de rayos X son instrumentos portátiles que almacenan material radiactivo en un cabezal mediante el cual se generan los rayos X necesarios para la caracterización elemental, las radiaciones son recogidas y separadas por un detector de silicio, la información recabada se almacena en el equipo o se transmite a un ordenador en forma de gráficas (Evident Corporation; Matteini y Moles, 2001:136).

Esta técnica permite análisis cualitativos y cuantitativos (menos exactos) de los elementos cuyo número atómico se encuentre entre el 12 y 92 y tiene un límite de detección de hasta algunas partes por millón (ppm). Es importante mencionar que solo detecta y analiza la superficie que se irradia (Matteini y Moles, 2001:135-137).

La finalidad de emplear este método de análisis fue determinar más precisamente el contenido de silicio de algunas de las muestras de calizas y brechas calcáreas, debido a que la digestión por placa utilizada para la caracterización por ICP-OES pudo ocasionar que una porción de este elemento se perdiera durante el proceso. Por lo tanto, cinco muestras se analizaron en Laboratorio de Remediación ambiental del Instituto de Metalurgia de la UASLP donde se cuenta con un analizador portátil FRX marca Olympus modelo DELTA Professional. Se introdujo una porción del polvo de roca en bolsas plásticas para colocarlas frente al detector, después se transmitieron los datos a un ordenador para su análisis.

○ *Difracción de Rayos X (DRX)*

El análisis por Difracción de Rayos X arroja resultados cualitativos y semicuantitativos sobre la mineralogía de sustancias cristalinas. Su principio de funcionamiento se basa en que al incidir rayos X sobre un material cristalino y en un ángulo en específico, este genera fenómenos de difracción únicos, conformando una huella característica del cristal. Para ello se necesita un gramo o unos cuantos miligramos de la muestra pulverizada; al pasar por el difractómetro, la información del patrón pasa a un ordenador en donde se compara con bases de datos que contienen las huellas de miles de sustancias para determinar la presencia de una o más de ellas (Matteini y

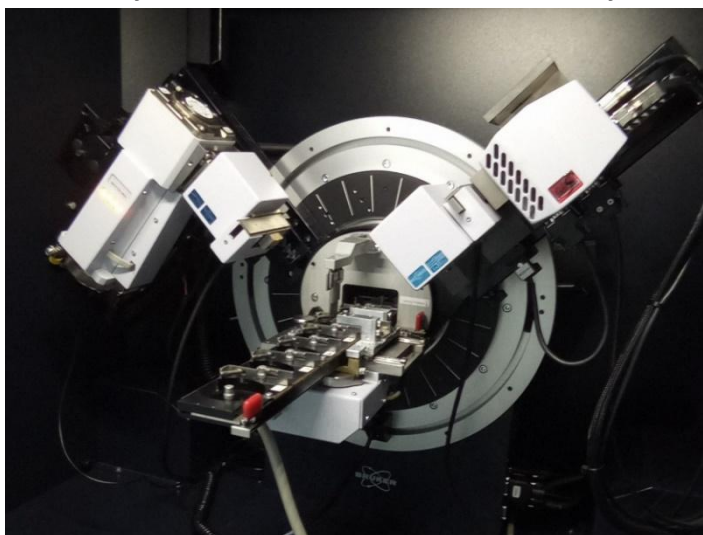


Figura 7. Difractómetro de Rayos X Bruker® D8 Advance.

Moles, 2001:127-128). Tiene la ventaja de ser un método de análisis que permite diferenciar compuestos químicamente iguales, pero de distinta estructura. Sin embargo, entre sus desventajas se encuentran el ser incapaz de reconocer compuestos amorfos y tener un límite de detección del 4%.

El estudio por medio de Difracción de Rayos X funcionó para determinar la composición mineralógica de las rocas calizas. El Instituto de Metalurgia de la UASLP cuenta con un laboratorio de DRX, por lo que se les proporcionaron las muestras para su evaluación, el equipo es un difractómetro de rayos X Bruker® modelo D8 Advance (Figura 7) cuya fuente de radiación es un tubo de rayos X de cobre de longitud de onda de 1.518 Angströms; la determinación se llevó a cabo con el software Diffract.Eva versión 5.2 con ayuda de la base de datos PDF-2 Release 2022 de la International Centre for Diffraction Data (ICDD).

Para el análisis, se utilizó un gramo del polvo de roca obtenido por trituración, este se posicionó sobre un portamuestras de polimetilmetacrilato. Las condiciones de trabajo que se utilizaron para extraer los datos fueron las siguientes.

- 2theta: 4-90°, este rango de ángulos normalmente se utiliza para muestras minerales
- Step/size: 0.2
- Time/step: 0.3 segundos
- Duración total: 21 minutos

3.3.3 Petrografía

Las técnicas petrográficas se encargan de la descripción de la textura, composición y propiedades ópticas de los minerales que forman las rocas. Para ello es necesario que una muestra se encuentre preparada en secciones o láminas delgadas, estas son fragmentos de roca que se adhieren a un portaobjetos de vidrio y se lijan hasta llegar a un grosor de alrededor de 30 micras, de esta manera pueden observarse al microscopio petrográfico sus propiedades mineralógicas. Es un buen método para suministrar información para deducir la composición de una roca (Ashurst y Dimes, 1998:151; Heinrich, 1980:13).

En la observación de láminas delgadas al microscopio, pudo realizarse un análisis de facies y microfacies, que permitió conocer a nivel microscópico las características texturales y composicionales de las rocas calizas que conforman el Templo Norte, como su tipo de masa básica y componentes; esto es importante para conocer los orígenes de las rocas, su uso en los monumentos y relacionar las características litológicas con su respuesta al desgaste, de manera que esta información pueda ser tomada en cuenta para medidas de restauración y conservación futuras (García-Solís et al., 2023).

Para este análisis, se requirió que la muestra se encontrara preparada de la siguiente manera; se eligió o cortó un fragmento de muestra de dimensiones similares o menores a las de un portaobjetos (75 por 25 mm aproximadamente) y

se cortó en una de sus caras, de manera que quedara una superficie pareja, después se lijó en la pulidora (Hillquist™) con un disco de grano No. 400 hasta que resultara lo más lisa posible. Posteriormente se friccionó sobre una superficie de vidrio con abrasivos No. 600 y agua, el procedimiento se repitió con abrasivos No. 1000. Para finalizar, la muestra se afinó en una lija de agua de grano No. 1500.

A continuación, se puso a calentar resina epóxica para secciones delgadas (Hillquist™) y las muestras sobre una parrilla a baja temperatura, se colocó entonces una porción de adhesivo sobre un portaobjetos (previamente lijado en una de sus caras para generar una superficie rugosa) y sobre este, la muestra, procurando presionar ligeramente para sacar las burbujas de aire. La resina se dejó curar durante 24 horas. Como último paso, se cortó y pulió el resto de la muestra hasta lograr la lámina delgada.

Se procedió entonces a la observación bajo el microscopio petrográfico en el Laboratorio de Petrografía del Instituto de Geología, donde se emplearon dos microscopios petrográficos, uno marca Motic™ modelo BA310POL y uno Leica® modelo DMLP, en este último se capturaron fotografías con ayuda de una cámara digital (OMAX™ modelo A3550U3).

Para finalizar, cada muestra se clasificó de acuerdo con los modelos propuestos por Folk (1959, 1962), Dunham (1962) y Embry y Klovan (1971).

4. RESULTADOS DEL REGISTRO LITOLÓGICO, DE DETERIOROS Y LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES DE LAS ROCAS CALIZAS DEL TEMPLO NORTE DE CHICHÉN ITZÁ

En el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos en las técnicas analíticas realizadas, divididos en valores petrofísicos, geoquímica de roca total y petrografía, además se presentan los mapeos litológicos y de deterioros del inmueble y el registro termo-higrométrico *in situ*.

4.1 Mapeo litológico del Templo Norte de Chichén Itzá

Se elaboraron diagramas que indican la litología presente en cada uno de los muros que conforman el Templo Norte, es decir, los tres que se encuentran en el interior de la cámara y las cuatro fachadas.

Como se mencionó anteriormente, se encontraron dos tipos de roca en el inmueble, calizas y brechas calcáreas; en los muros internos fue posible identificar un porcentaje aproximado de matriz en el caso de las brechas, el cual se señala en color rojo y dependiendo de la oscuridad del tono es la cantidad de matriz que presenta, divididos en más de 75%, entre 50 y 75%, entre 25 y 50% y menos de 25%.

Para los muros externos sólo se indica el tipo de litología presente, ya que se dificultó la identificación de las rocas debido a los cambios de coloración ocasionados por agentes ambientales extrínsecos. La mayoría de los sillares presentaban un aspecto gris oscuro, con zonas de biopelícula y líquenes; también, la presencia de una algas que dotaban a la caliza blanca de una coloración rojiza hacía fácil confundirlas con brechas calcáreas. Debido a lo anterior, es más evidente la presencia de brechas en las zonas que presentan una mayor pérdida de material, pues puede observarse la roca sin muchos cambios de coloración ni pátinas.

A continuación, se presentan los mapas digitalizados de los muros del interior de la cámara (Figuras 8, 9 y 10) y de las fachadas (Figuras 11, 12, 13 y 14).

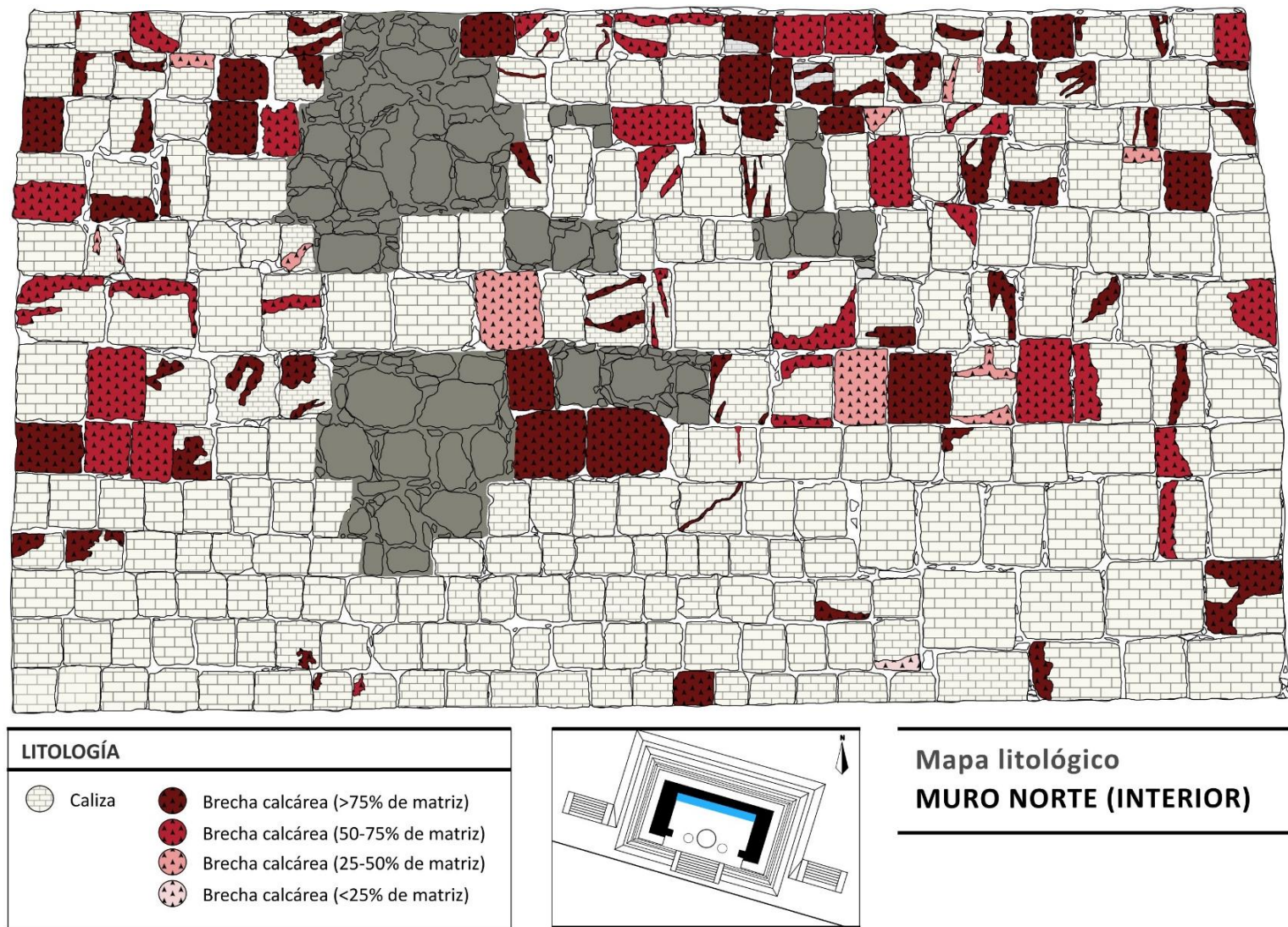
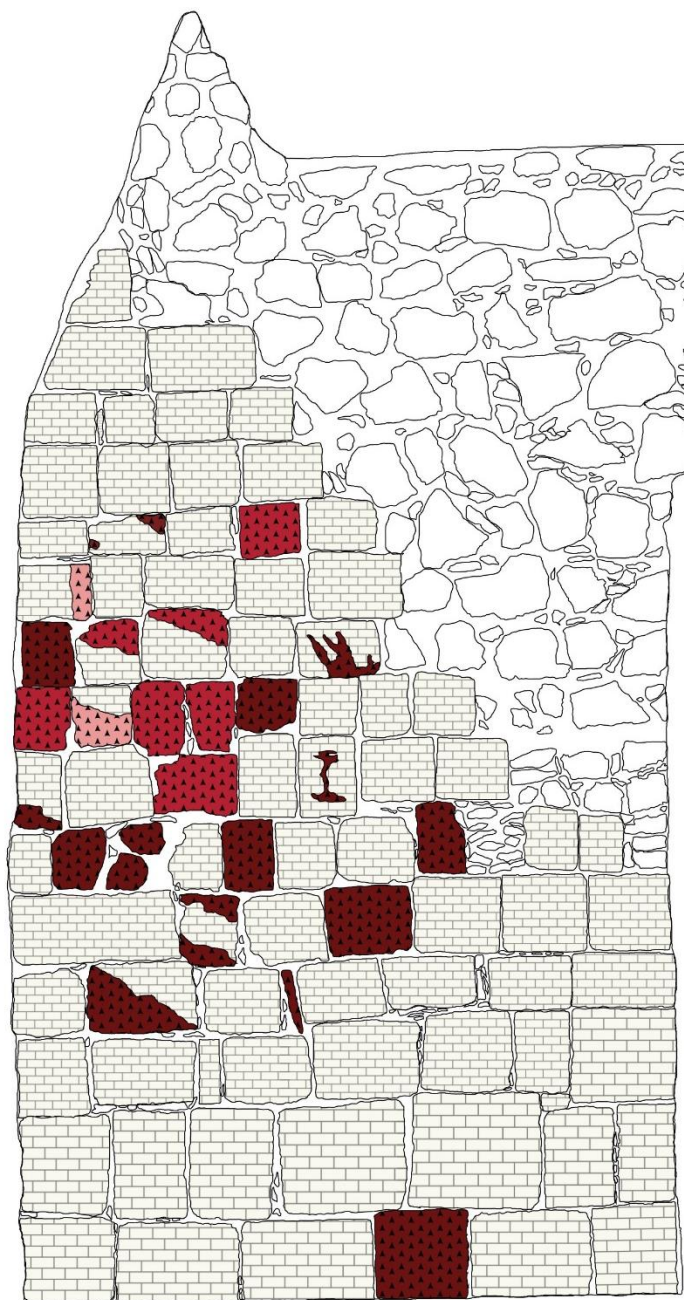
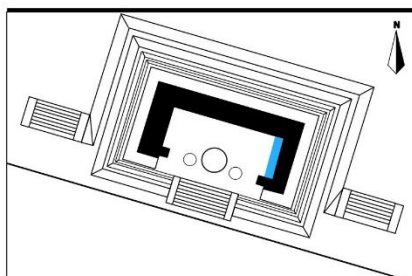


Figura 8. Mapa litológico del muro norte del Templo Norte de Chichén Itzá.



LITOLOGÍA	
	Caliza
	Brecha calcárea (>75% de matriz)
	Brecha calcárea (50-75% de matriz)
	Brecha calcárea (25-50% de matriz)
	Brecha calcárea (<25% de matriz)



**Mapa
litológico
MURO ESTE
(INTERIOR)**

Figura 9. Mapa litológico del muro este del Templo Norte de Chichén Itzá.



Figura 10. Mapa litológico del muro oeste del Templo Norte de Chichén Itzá.

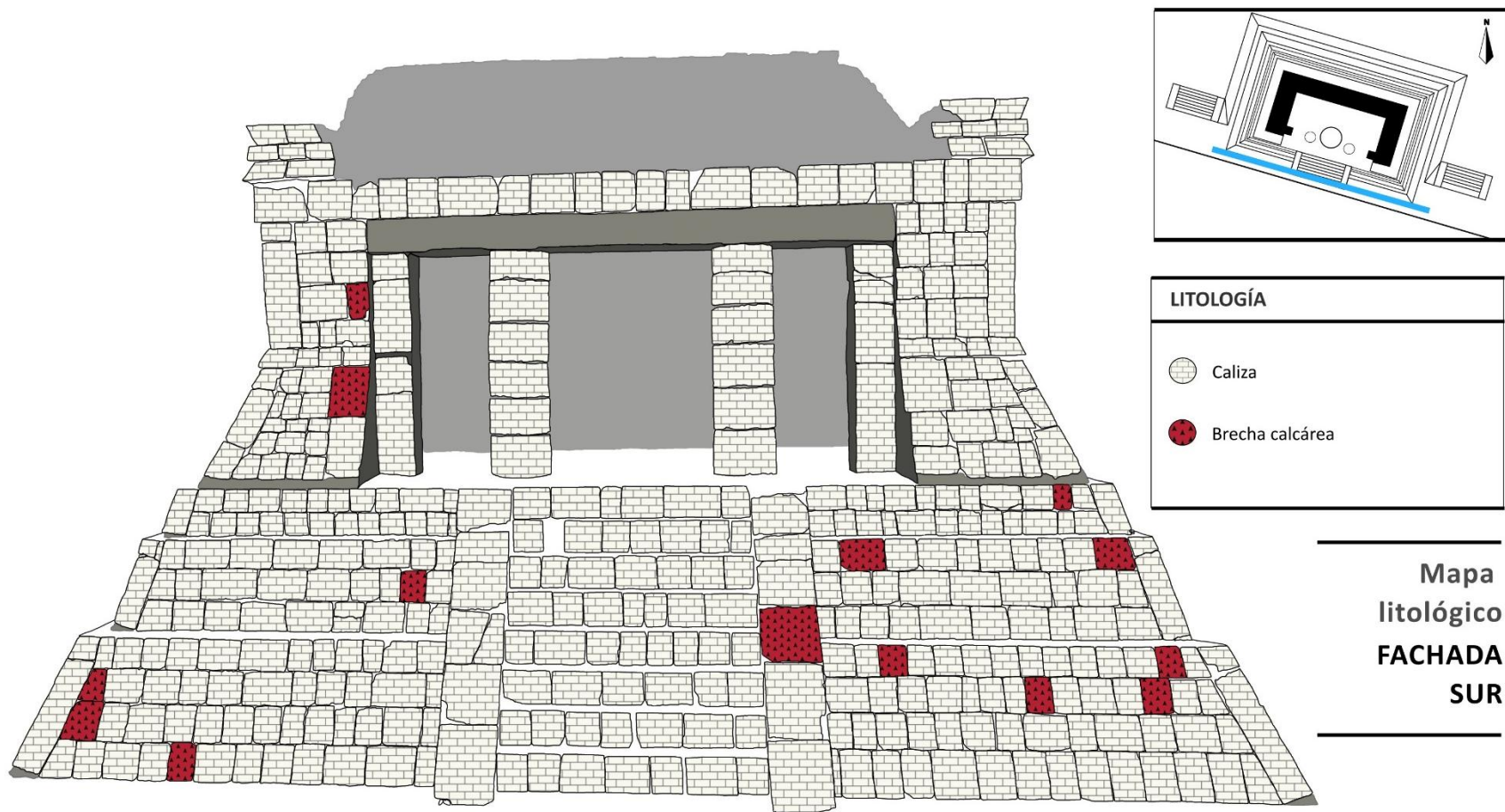


Figura 11. Mapa litológico de la fachada sur del Templo Norte de Chichén Itzá.

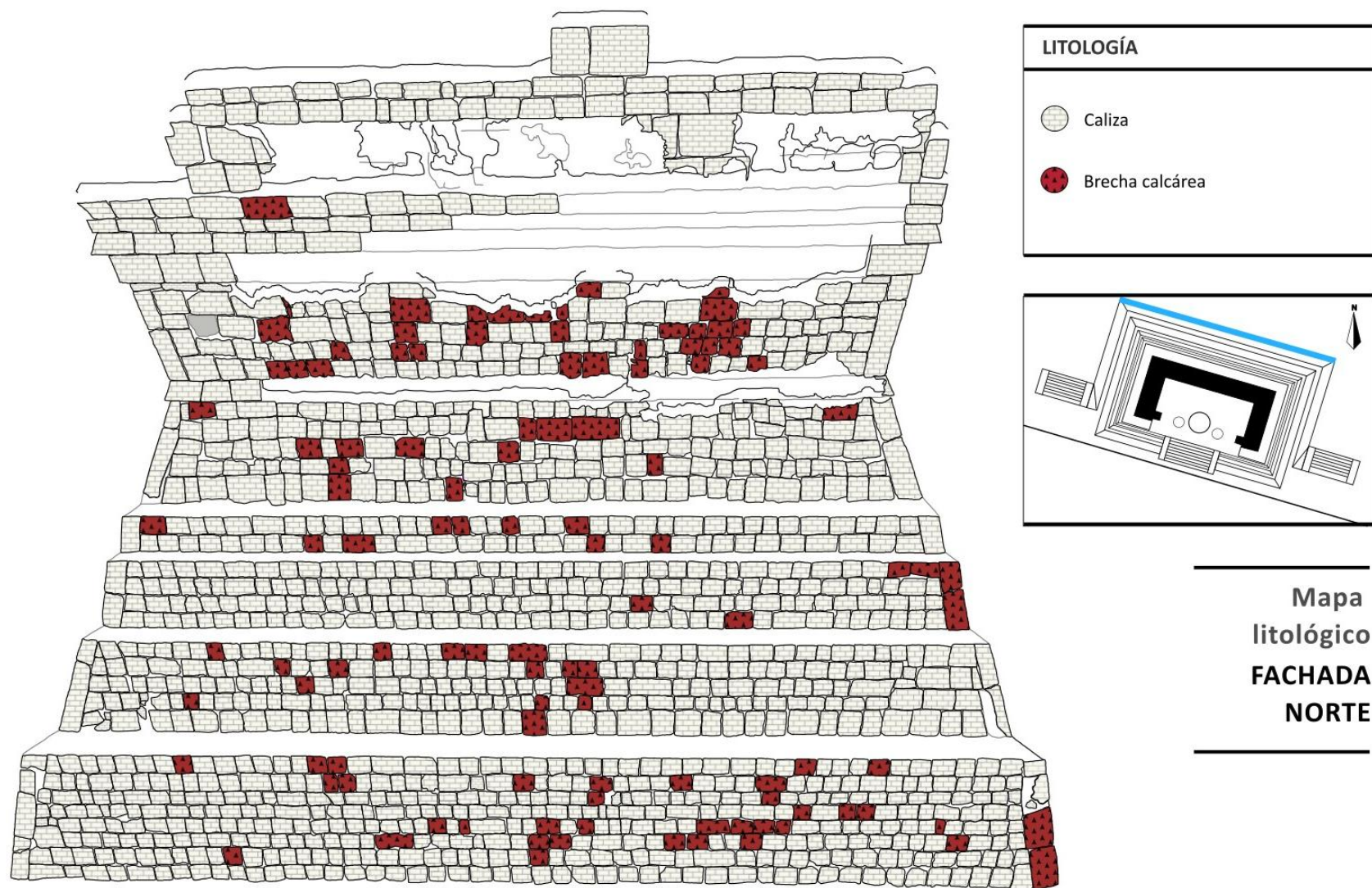


Figura 12. Mapa litológico de la fachada norte del Templo Norte de Chichén Itzá.

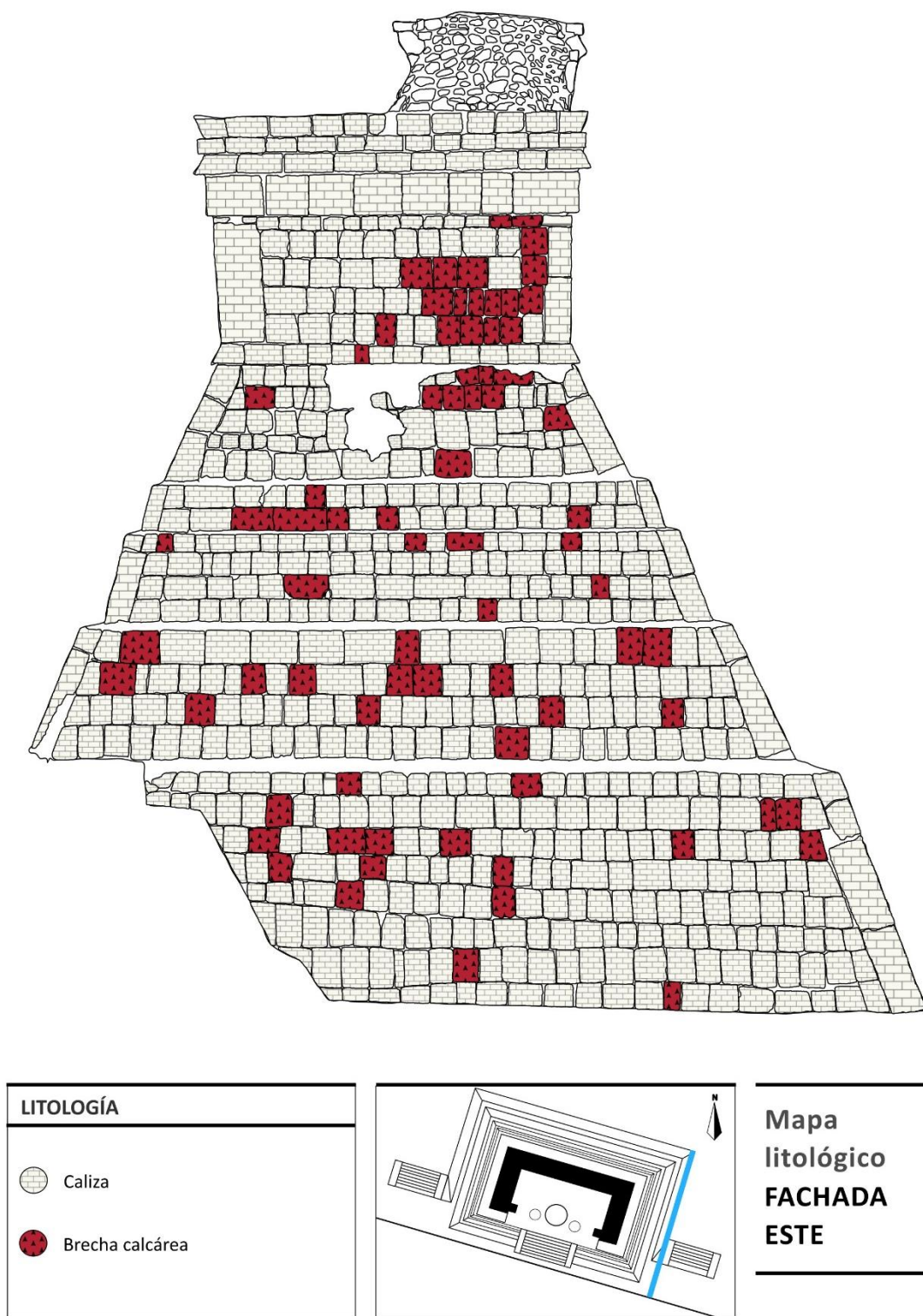


Figura 13. Mapa litológico de la fachada este del Templo Norte de Chichén Itzá.

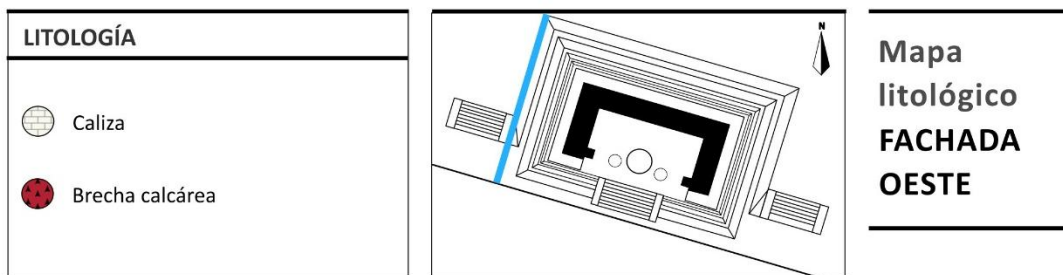
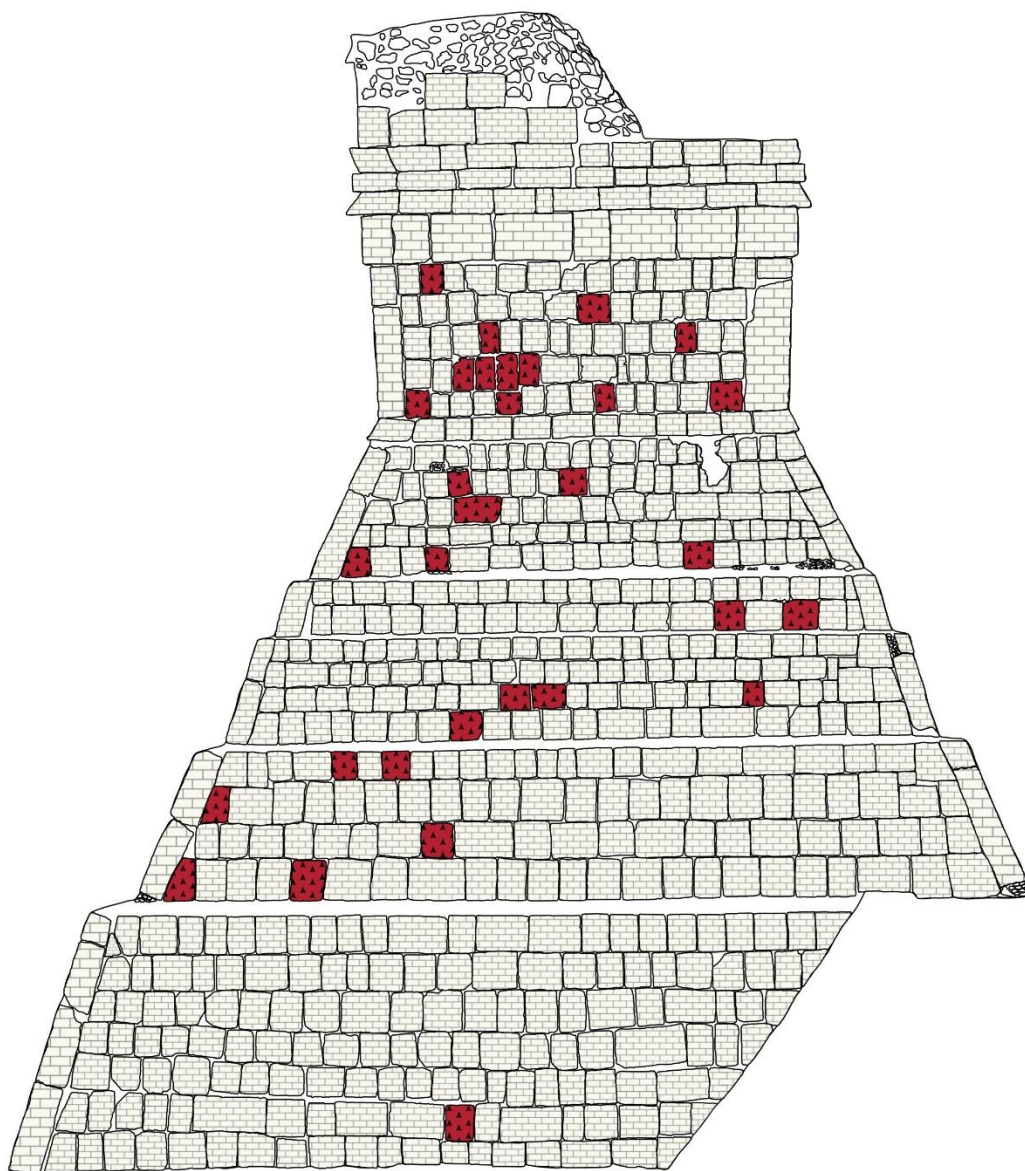


Figura 14. Mapa litológico de la fachada oeste del Templo Norte de Chichén Itzá.

4.2 Mapeo de deterioros del interior del Templo Norte de Chichén Itzá

Se realizaron mapas de diagnóstico de los tres muros internos del Templo Norte, se le dio mayor importancia a la evaluación de este recinto debido a que es aquí donde se concentra la mayor cantidad de bajosrelieves en el inmueble, la que presenta una mayor pérdida de material pétreo y, por lo tanto, el sitio donde se encuentra el mayor daño al inmueble (Figuras 18, 19 y 20).

A manera de resumen, el edificio se ha visto afectado por pérdida de material pétreo, fisuras y grietas, colonización biológica, alteraciones cromáticas e intervenciones anteriores.

En varios de los sillares puede observarse una erosión diferencial donde las brechas calcáreas presentan pérdida de matriz, que a su vez debilita la estructura rocosa y esto ocasiona que los clastos contenidos en ella se desprendan (Figura 15 B).

La alveolización es un tipo de erosión diferencial en una etapa más avanzada de pérdida de matriz y clastos, tanto en brechas como en calizas; se define como la formación de cavidades en la superficie de la roca de distintos tamaños y formas (generalmente de algunos centímetros de ancho) los cuales pueden estar interconectados (ICOMOS-ISCs, 2008:28). Es uno de los daños más importantes en los muros de la cámara, tanto interiores como exteriores (Figura 15 A).

Se localizaron varias perforaciones en el interior de la cámara, de algunos centímetros de profundidad y de ancho variable, en reportes anteriormente realizados (García-Solís, 2006) se refiere que fueron realizados para instalaciones de luz (ahora en desuso). Las perforaciones de menor dimensión (aproximadamente 0.5 cm de ancho) pudieron haber sido realizadas por avispas (Figura 15 D).

Como se mencionó en el apartado anterior, el edificio pasó por una reconstrucción a mediados del siglo pasado, las zonas de faltantes de los muros de la cámara fueron rellenados con rocas calizas y brechas nuevas, la mayor parte de ellas a pesar de ser de más reciente adición se muestran en un mayor estado de deterioro que los sillares originales. Para la consolidación y resane de las juntas y rocas se utilizaron morteros de cemento (Figura 16 A) (García-Solís et al., 2006:31). Destaca también que estructuralmente se requirió el agregado de un dintel de varillas de hierro recubiertas de cemento que se colocó sobre los pilares y pilastras de la entrada, el cual ya contaba con pérdidas de material en la parte inferior, dejando las varillas al descubierto y ocasionando su oxidación (García-Solís et al., 2006:31) (Figura 16 B).

En la superficie de los muros se perciben algunas grietas y fisuras, especialmente en las rocas que rellenan los faltantes y en los sillares de entre 1.20 a 2 m de altura del suelo (Figura 16 C).



Figura 15. A) Alveolización en roca caliza, B) Erosión diferencial de caliza y brecha calcárea con clastos, C) Alveolo con velo salino a su alrededor y D) Perforaciones de avispas.

Un aspecto importante que considerar es la falta de la bóveda sur, que permite el paso de agua al interior de la cámara, la lluvia escurre por la bóveda norte y los muros con bajorrelieves lo que causa que se acumule dentro del inmueble y erosiona el material rocoso a su paso o favorece la aparición de microorganismos (Figura 17 A).

Otro deterioro significativo en todo el Templo Norte es la colonización biológica de distintos organismos. Una de las alteraciones más notorias es la biopelícula, una capa delgada de coloración negra formada por microorganismos (alga, cianobacteria u hongo), la cual no solo afecta estéticamente la roca caliza, sino que

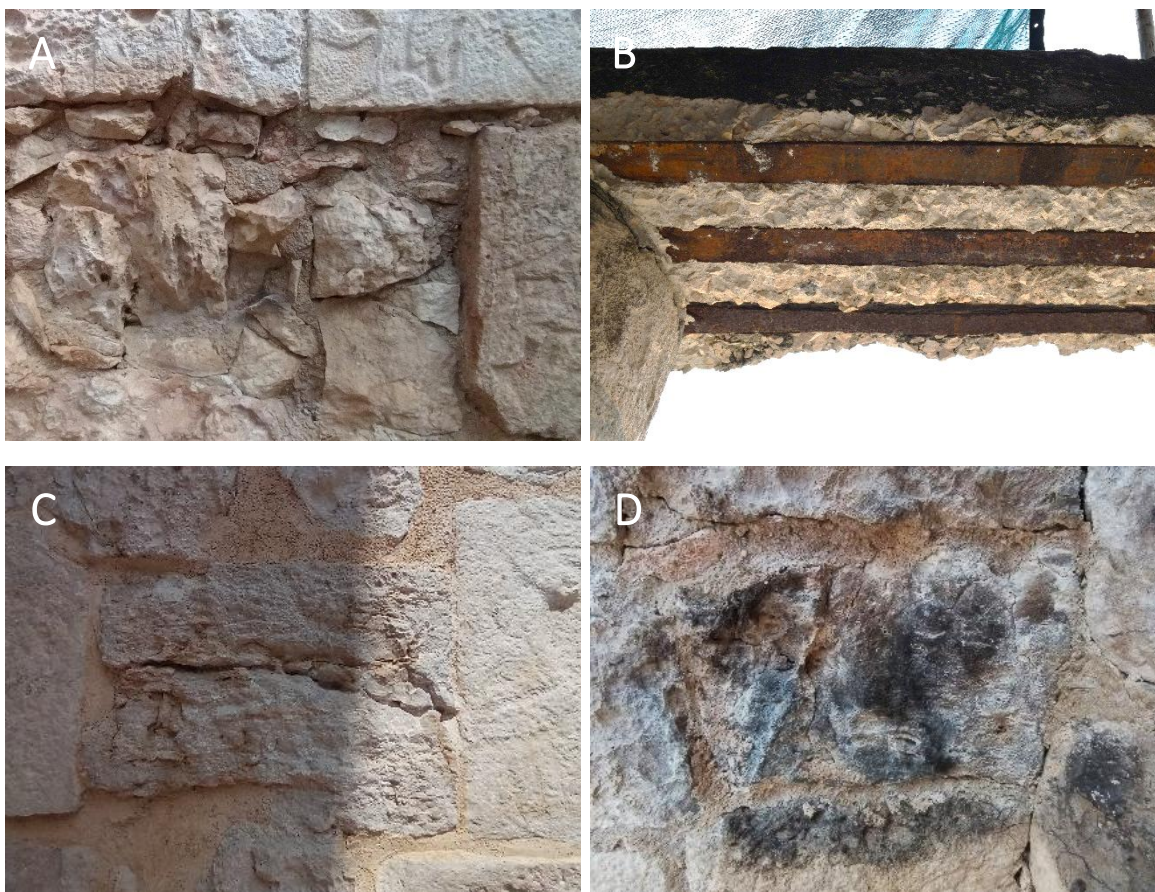


Figura 16. A) Rocas agregadas en la reconstrucción, B) Parte inferior de dintel de varillas de hierro, C) Grieta que atraviesa un sillar del muro este y D) Mancha oscura en un sillar del muro norte.

en la superficie ocasiona agujeros milimétricos o submilimétricos no interconectados, este deterioro se denomina *pitting* como se observa en la Figura 17 B (Alonso et al., 2013:119; González-Gómez et al., 2018; ICOMOS-ISCS, 2008:40). La biopelícula se encuentra, al interior, mayormente en los muros este y oeste, hacia la mitad sur de cada uno y donde las rocas no reciben suficiente luz del sol; en el muro norte y la bóveda se localizan dos manchas de escurrimiento sobre las que ha crecido biopelícula (Figura 17 A). En el exterior, se presenta particularmente en el primer y segundo cuerpos del basamento y la cornisa.

Se observó también la presencia de algas de coloración naranja en las fachadas, lo que dificultó la correcta identificación de sillares que contenían brecha calcárea.

También se observó musgo creciendo sobre los cantos superiores de los sillares del muro este cerca de la entrada al recinto, a 1.5 m de altura aproximadamente. La aparición de plantas superiores es un elemento que puede percibirse en prácticamente cada muro del templo en interiores y exteriores, especialmente entre las juntas que han perdido mortero (Figura 17 C). Dentro de la cámara crecen en el muro este a cerca de 2 m de altura del suelo, hacia la parte central de la pared; en el oeste y el norte se observan pocas hacia los vértices superiores e inferiores. En

cuanto a las fachadas, prácticamente surgen plantas en toda el área, siendo las zonas con mayor concentración la fachada norte y el primer basamento en sus tres caras, en contraste a la fachada sur que es en la que menos se perciben. De igual manera, se distinguió el crecimiento de líquenes en las fachadas norte, oeste y este.

Por último, al lado izquierdo del muro interior norte, se encontró un panal de avispas, a 2.5 m de altura, estaba incrustado en una zona donde las rocas de construcción no son las originales (Figura 17 D).



Figura 17. A) Escurrimiento con biopelícula color gris oscuro en la bóveda, B) Biopelícula vista en una lupa de 30 aumentos, se observan agujeros milimétricos en las zonas donde se han desprendido los microorganismos, C) Plantas superiores en las juntas de la bóveda, D) Panal de avispas incrustado en el muro norte.

Se localizaron velos salinos en los muros interiores, en el norte se concentran en la mitad superior de la pared, en el este, en la parte inferior y que colinda con el muro norte y, en el oeste, hacia la parte central del muro. Estos velos se presentan como capas blanquecinas muy delgadas que a veces rodean los alveolos que se crean en la pérdida de material pétreo (Figura 15 C). Para terminar, en el muro norte, hacia la derecha y a 1 m del suelo se ubica una mancha de color gris oscuro, que se considera pudo ser resultado de un fuego cercano o una instalación de luz que falló (Figura 16 D).

Como conclusión y destacando que la cámara es el sitio con mayor deterioro del Templo Norte, es factible que las condiciones de exposición que favorezcan el deterioro en el inmueble sean la acumulación de humedad y de agua de lluvia, el viento, la falta de mortero en las juntas, la presencia de consolidantes como el cemento de intervenciones anteriores y el mal estado de la cubierta, pues permite el paso directo de agua y favorece los escurrimientos en los muros, que a su vez generan un ambiente adecuado para la proliferación de microorganismos y la aparición de velos salinos.

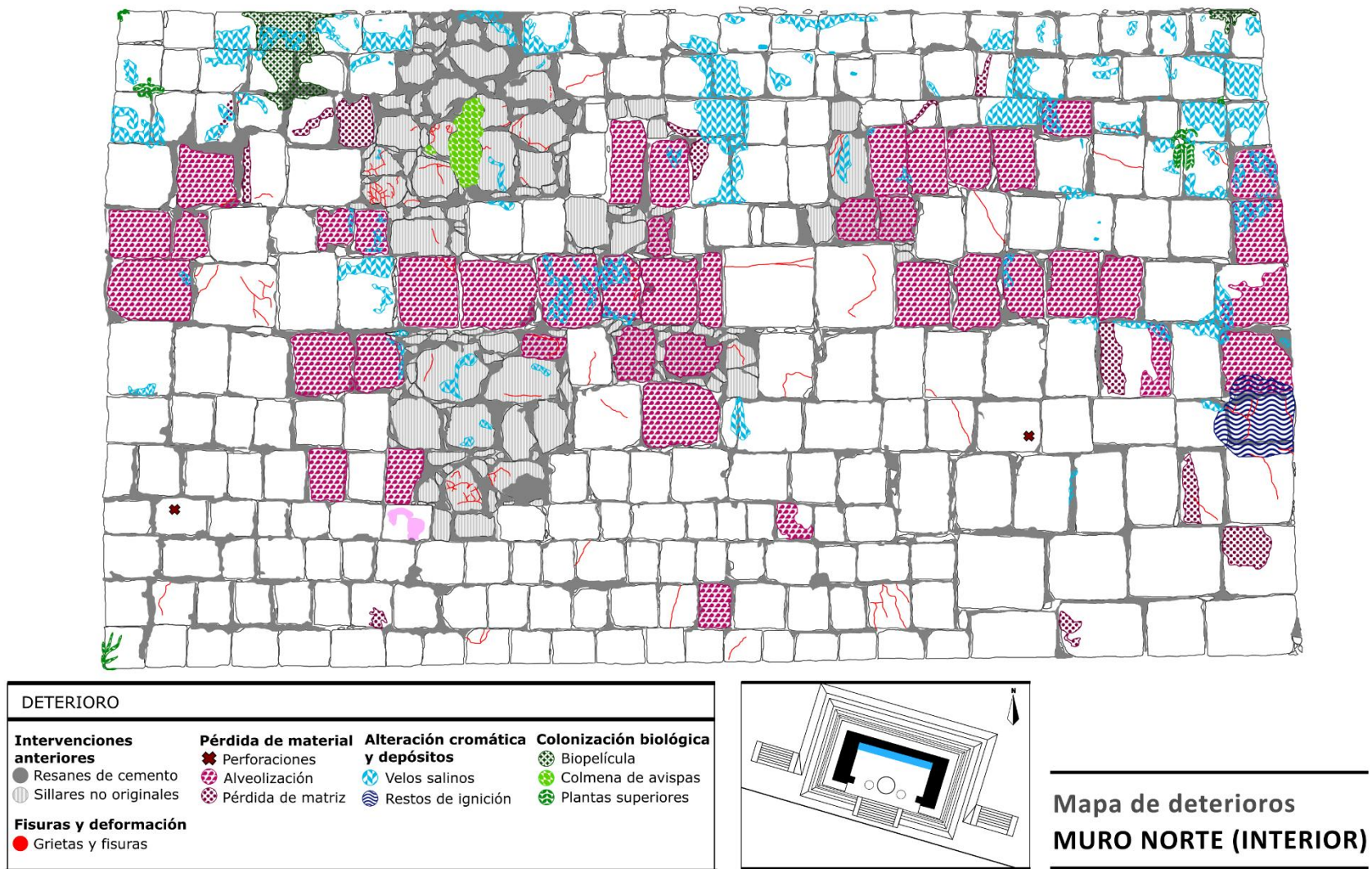
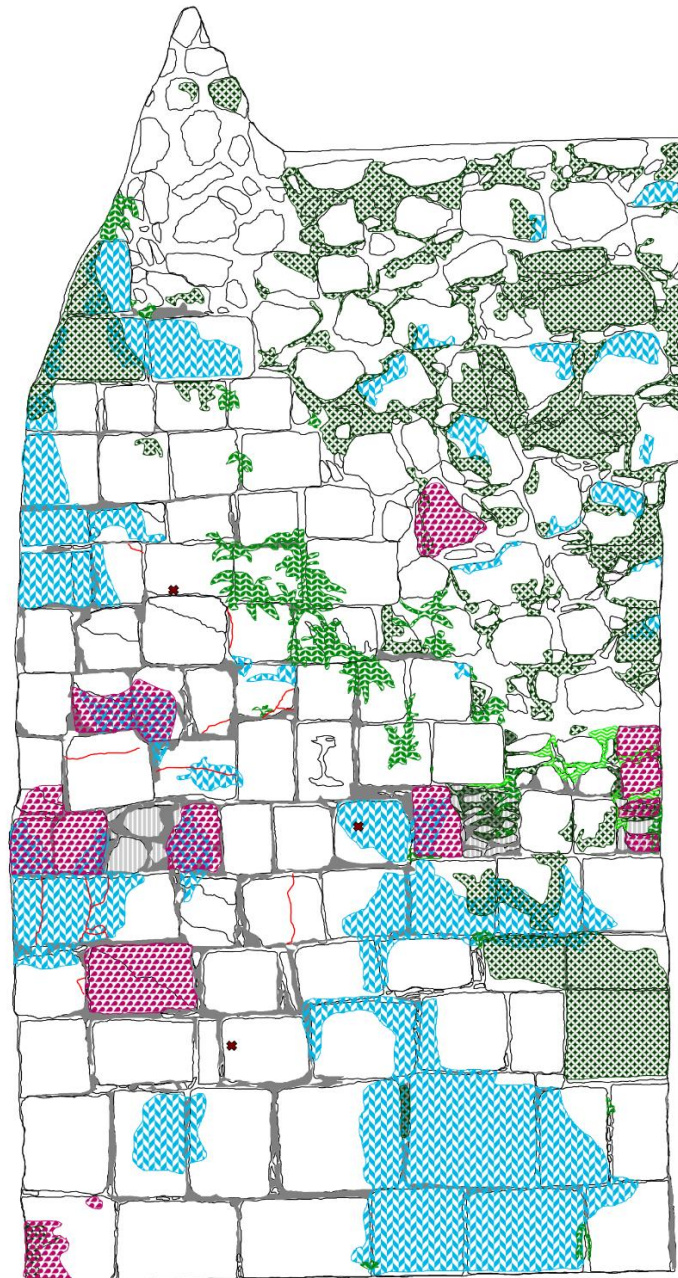
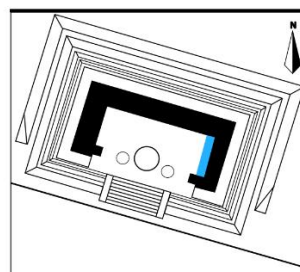


Figura 18. Mapa de deterioros del muro norte del Templo Norte de Chichén Itzá.

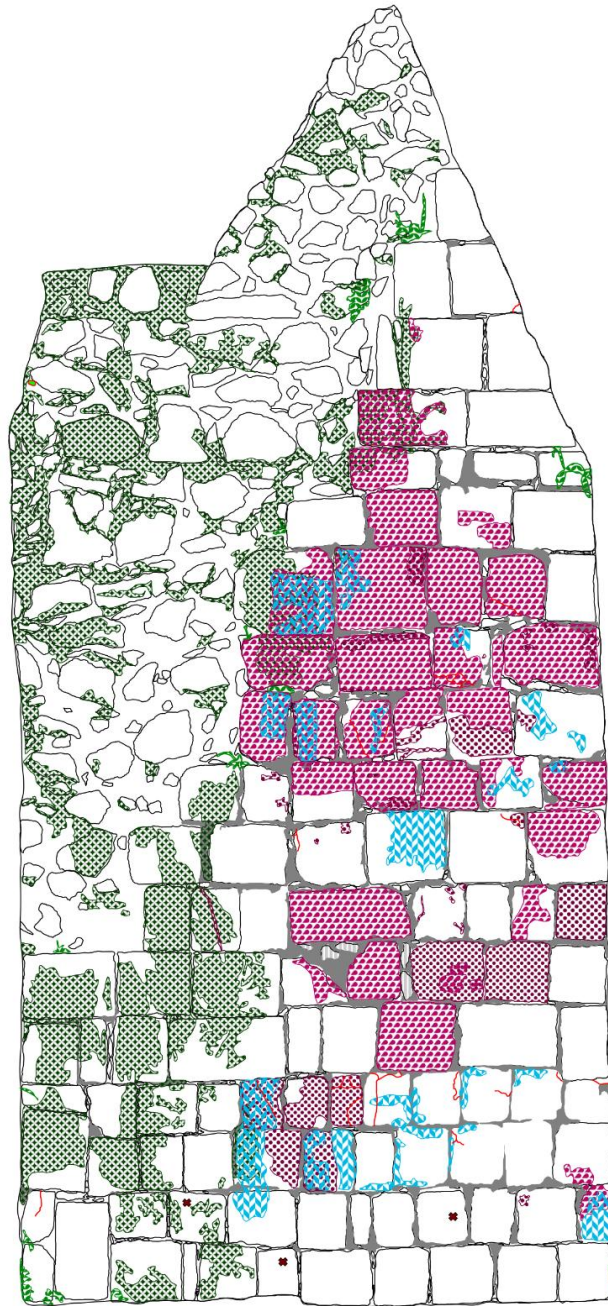


DETERIORO	
Intervenciones anteriores	Alteración cromática y depósitos
● Resanes de cemento	● Velos salinos
● Sillares no originales	
Fisuras y deformación	Colonización biológica
● Grietas y fisuras	● Biopelícula
Pérdida de material	● Musgo
● Perforaciones	● Plantas superiores
● Alveolización	
● Pérdida de matriz	

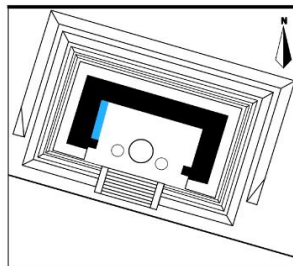


Mapa de
deterioros
MURO ESTE
(INTERIOR)

Figura 19. Mapa de deterioros del muro este del Templo Norte de Chichén Itzá.



DETERIORO	
Intervenciones anteriores	Alteración cromática y depósitos
● Resanes de cemento	● Velos salinos
● Sillares no originales	
Fisuras y deformación	Colonización biológica
● Grietas y fisuras	● Biopelícula
Pérdida de material	● Musgo
● Perforaciones	● Plantas superiores
● Alveolización	
● Pérdida de matriz	



**Mapa de
deterioros
MURO OESTE
(INTERIOR)**

Figura 20. Mapa de deterioros del muro oeste del Templo Norte de Chichén Itzá.

4.3 Registro termo-higrométrico *in situ*

Durante la semana del 5 al 9 de junio de 2023 se registró la temperatura y humedad de las cuatro fachadas del templo, además de los tres muros de la cámara, por tres veces al día, a las 8:00 am, 12:00 pm y 2:30 pm, sólo uno de los días (7 de junio) se tuvo acceso a la zona arqueológica a las 6:00 pm, hora en la que nuevamente se tomaron datos.

En cada muro se eligieron 3 sillares de cada litología, es decir, brecha y caliza, y de cada tipo de roca se eligió uno en buen estado de conservación, uno deteriorado y uno en estado intermedio, esto se decidió acorde a su pérdida de material constituyente.

Para la nomenclatura que se asignó en la toma de datos se tomaron en cuenta los parámetros que se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros para la asignación de claves en la toma de temperatura y humedad *in situ*.

Por su ubicación en el inmueble	Por su ubicación respecto a los puntos cardinales	Por su litología	Por su estado de conservación
I: Muro interior E: Muro exterior o fachada	N: Norte S: Sur E: Este O: Oeste	B: Brecha roja C: Caliza	1: Bueno 2: Intermedio 3: Malo

De esta manera, por ejemplo, la clave “IE C1” se refiere a un sillar de caliza del muro interior este en buen estado de conservación.

Con los datos recabados se obtuvieron promedios de cada litología y grado de deterioro, según las variaciones de temperatura y humedad a lo largo del día, los resultados graficados pueden observarse en las Figuras 21 y 22. En ellas se puede percibir que la temperatura incrementa conforme avanza el día, disminuyendo a media tarde.

En cuanto a la humedad, el porcentaje tiende a decrecer conforme la temperatura aumenta, pero vuelve a incrementar a media tarde, cuando el calor disminuye. También puede observarse que la litología que absorbe menos agua es la roca caliza, especialmente la que se encuentra en buen estado de conservación (C1), mientras que las brechas calcáreas en general presentaron un porcentaje mayor de humedad. Un dato importante es que la caliza deteriorada (C3) llega a tener valores de humedad muy similares a la brecha calcárea dañada (B3), por lo tanto, el estado de conservación de la roca es un factor importante para la retención de humedad.

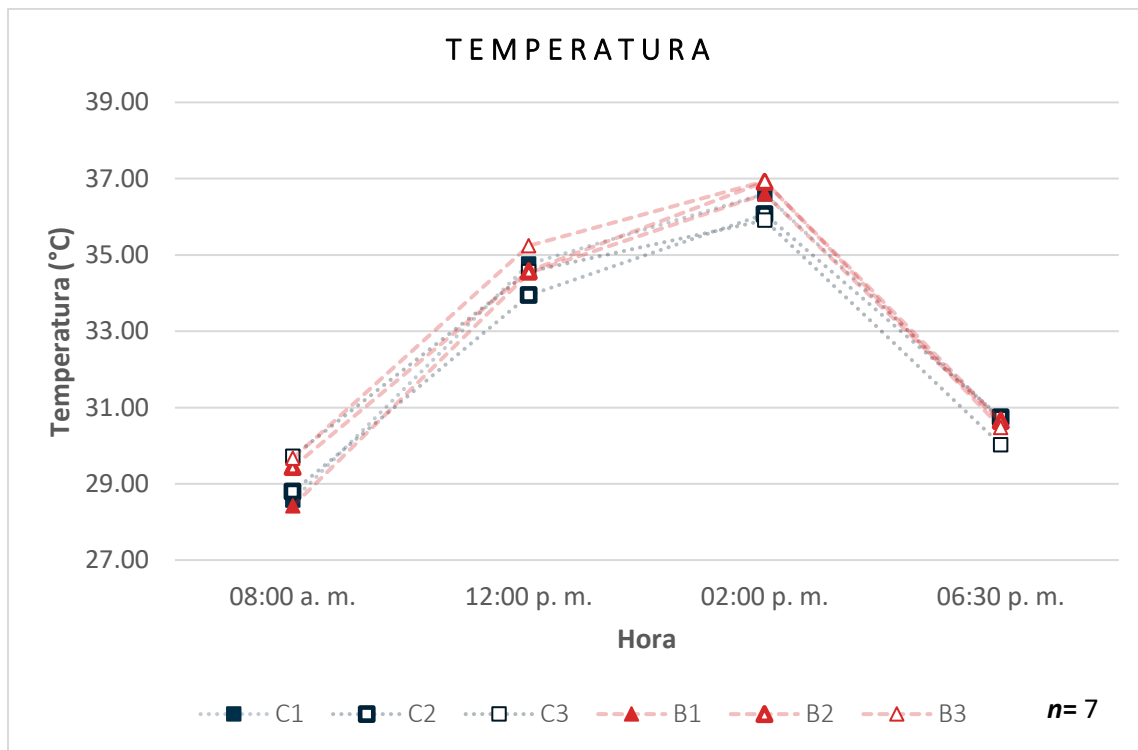


Figura 21. Promedios de registro de temperatura in situ.

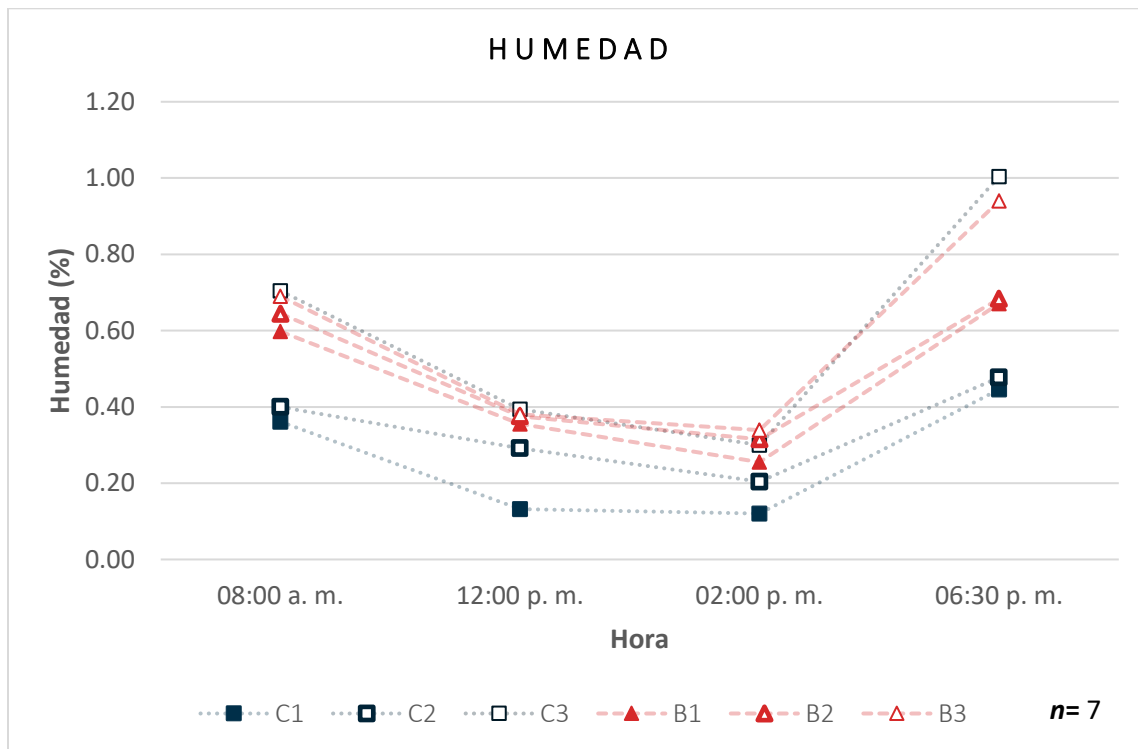


Figura 22. Promedios de registro de humedad in situ.

Se elaboró un modelo tridimensional de cómo se proyectaban las sombras y la luz del sol a lo largo del día durante el periodo de toma de los datos, debajo se colocaron los promedios de temperatura y humedad de las cuatro fachadas en esa semana (Figura 23). En el diagrama puede observarse cómo la insolación aumenta la temperatura de los sillares a la vez que disminuye el porcentaje de humedad. Lo anterior también se puede comprobar en la Tabla 5 donde se muestran los promedios de cada fachada después de obtener la media de temperatura y humedad de cada sillar durante la semana, en rojo se señalan los bloques que reciben insolación y en azul los que reciben sombra dependiendo de la hora del día en que se tomaron los datos, en verde se resaltan aquellos que recibían una parte de del sol y otra de sombra.

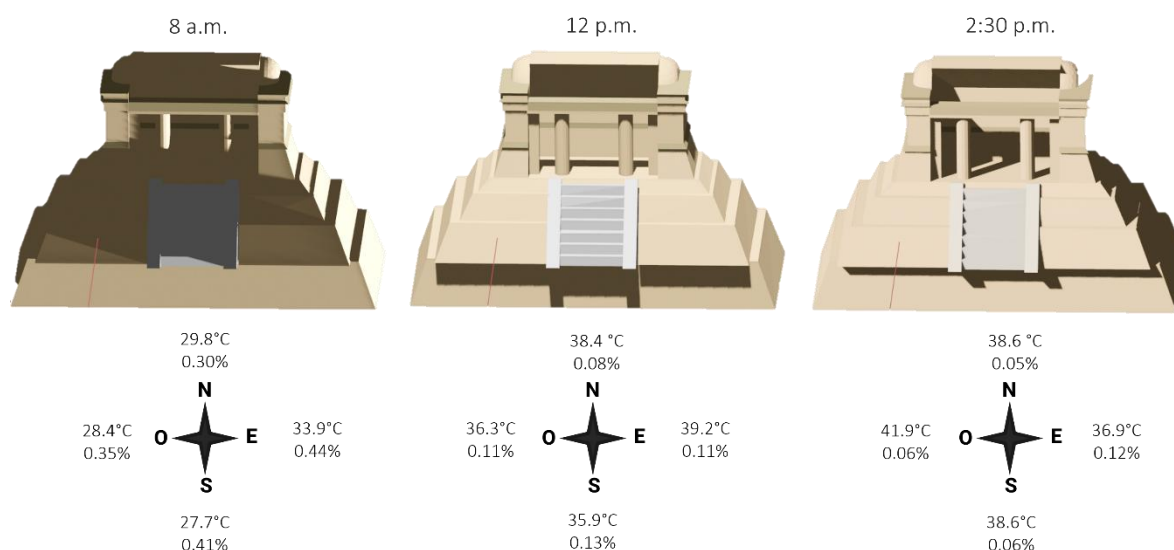


Figura 23. Diagrama de luz del sol y sombras proyectadas en el Templo Norte de Chichén Itzá durante la toma de datos termo-higrométricos.

Tabla 5. Promedios de temperatura y humedad de cada fachada a las 8:00 am, 12:00 pm, 2:30 pm y 6:30 pm.

		T (°C)	H (%)	T (°C)	H (%)	T (°C)	H (%)	T (°C)	H (%)
		08:00 a. m.		12:00 a. m.		02:30 p. m.		06:30 p. m.	
FACHADA SUR	ES C1	27.68	0.13	36.98	0.00	39.38	0.00	30.5	0.00
	ES C2	27.75	0.20	32.83	0.05	35.35	0.00	30.1	0.35
	ES C3	27.38	0.40	34.83	0.00	38.03	0.00	29.5	0.60
	ES B1	27.38	0.51	36.63	0.21	39.48	0.10	30	0.60
	ES B2	28.53	0.59	37.58	0.21	39.93	0.15	30.6	0.60
	ES B3	27.85	0.61	36.95	0.28	39.53	0.11	30.1	0.60
Promedio		27.76	0.41	35.96	0.13	38.61	0.06	30.13	0.46

		T (°C)	H (%)	T (°C)	H (%)	T (°C)	H (%)	T (°C)	H (%)
		08:00 a. m.		12:00 a. m.		02:30 p. m.		06:30 p. m.	
FACHADA ESTE	EE C1	30.13	0.59	36.45	0.09	35.68	0.21	29.5	1.00
	EE C2	33.00	0.00	38.85	0.00	36.40	0.00	30.3	0.00
	EE C3	36.60	0.41	40.93	0.00	38.58	0.00	29	1.90
	EE B1	31.23	0.60	38.83	0.20	35.75	0.23	29.8	0.65
	EE B2	35.85	0.51	38.78	0.26	37.33	0.18	30.5	0.60
	EE B3	37.05	0.54	41.63	0.14	38.13	0.10	30.4	0.65
Promedio		33.98	0.44	39.24	0.11	36.98	0.12	29.92	0.80
FACHADA NORTE	EN C1	29.18	0.16	38.38	0.00	37.95	0.00	30.9	0.35
	EN C2	28.60	0.00	37.75	0.00	38.28	0.00	31.5	0.00
	EN C3	32.30	0.05	39.03	0.00	38.28	0.00	30.4	0.00
	EN B1	27.35	0.66	38.78	0.35	40.25	0.11	31.3	0.60
	EN B2	30.48	0.58	38.43	0.15	38.65	0.16	31.1	0.60
	EN B3	31.18	0.34	38.25	0.00	38.28	0.00	30.5	0.60
Promedio		29.85	0.30	38.43	0.08	38.61	0.05	30.95	0.36
FACHADA OESTE	EO C1	28.60	0.36	38.40	0.05	43.10	0.00	31.3	0.55
	EO C2	28.25	0.05	35.53	0.00	41.25	0.00	31.9	0.00
	EO C3	28.35	0.09	35.50	0.00	41.10	0.00	31	0.00
	EO B1	28.10	0.58	35.33	0.26	40.88	0.14	31.1	0.65
	EO B2	28.30	0.56	35.03	0.31	40.90	0.25	30.5	0.60
	EO B3	28.83	0.46	38.18	0.06	44.55	0.00	31.6	0.40
Promedio		28.40	0.35	36.33	0.11	41.96	0.06	31.23	0.37

4.4 Valores petrofísicos

4.4.1 Porosidad efectiva, densidad aparente y de matriz y absorción de agua al vacío

Los resultados de los cálculos de porosidad efectiva, absorción de agua al vacío y densidad aparente y de matriz se muestran en la Tabla 5, las brechas calcáreas se etiquetan en color naranja mientras que las calizas se señalan con azul claro. La densidad de matriz osciló entre 2.5 y 2.7 para todas las muestras, lo cual es concordante con los valores que normalmente tiene una roca caliza. Por otro lado, la densidad aparente fluctúa entre 1.95 a 2.43, estos resultados son similares a los obtenidos en estudios previos sobre calizas provenientes de algunas canteras del estado de Yucatán (González-Gómez et al., 2015).

Tabla 5. Porosidad efectiva, densidad de matriz, densidad aparente y absorción de agua al vacío de muestras de caliza y brecha calcárea.

	MUESTRA UNIDAD	POROSIDAD [%]	DENSIDAD DE MATRIZ [g/cm ³]	DENSIDAD APARENTE (BULK) [g/cm ³]	ABSORCIÓN DE AGUA AL VACÍO [Gew.%]
BRECHAS	BRE-01	23.18	2.63	2.02	11.49
	BRE-02	9.43	2.65	2.40	3.92
	BRE-03	20.94	2.65	2.09	10.00
	BRE-04	4.77	2.62	2.49	1.92
	BRE-05	25.05	2.65	1.99	12.62
	BRE-06	22.18	2.64	2.06	10.77
	BRE-07	22.62	2.58	2.00	11.31
	BRE-11	7.27	2.61	2.42	3.00
	BRE-09	18.06	2.65	2.17	8.32
CALIZAS	CAL-01	15.30	2.69	2.28	6.73
	CAL-02	25.59	2.62	1.95	13.12
	CAL-03	13.35	2.67	2.31	5.77
	CAL-04	11.95	2.66	2.34	5.10
	CAL-05	12.31	2.67	2.34	5.26
	CAL-06	5.14	2.57	2.43	2.11
	CAL-07	11.14	2.63	2.34	4.76
	CAL-08	17.56	2.55	2.10	8.35
	CAL-09	10.28	2.62	2.35	4.38
	CAL-10	9.86	2.70	2.43	4.05
	CAL-11	12.75	2.67	2.33	5.47
	CAL-12	15.69	2.66	2.24	7.00
	CAL-15	13.12	2.69	2.34	5.61
	CAL-20	15.94	2.65	2.23	7.15
	CAL-16	16.54	2.60	2.17	7.62
	CAL-17	11.85	2.67	2.36	5.03
	CAL-18	11.74	2.68	2.37	4.96
	CAL-19	17.97	2.67	2.19	8.22
	CAL-21	8.61	2.66	2.43	3.54
	CAL-22	16.68	2.67	2.23	7.48

En la Tabla 6 se presentan los resultados de absorción de agua al vacío y porosidad ordenados de manera descendente, se puede percibir que en general las brechas calcáreas tienden a ser más porosas y absorbentes que las rocas calizas, aunque dos de las muestras no cumplen esta condición, es el caso de la brecha 'BRE-04' y la caliza 'CAL-02', ambos casos podrían explicarse debido a su textura y composición, debido a que 'BRE-04' contiene clastos de caliza grandes y baja cantidad de matriz, mientras que 'CAL-02' tiene la distinción de ser de coloración distinta (negro) al resto de muestras de caliza, por lo que podría indicar un mayor contenido de materia orgánica.

Tabla 6. Porosidad efectiva y absorción de agua al vacío de muestras de caliza y brecha calcárea.

MUESTRA UNIDAD	POROSIDAD [%]	MUESTRA UNIDAD	ABSORCIÓN DE AGUA AL VACÍO [Gew.%]
CAL-02	25.59	CAL-02	13.12
BRE-05	25.05	BRE-05	12.62
BRE-01	23.18	BRE-01	11.49
BRE-07	22.62	BRE-07	11.31
BRE-06	22.18	BRE-06	10.77
BRE-03	20.94	BRE-03	10.00
BRE-09	18.06	CAL-08	8.35
CAL-19	17.97	BRE-09	8.32
CAL-08	17.56	CAL-19	8.22
CAL-22	16.68	CAL-16	7.62
CAL-16	16.54	CAL-22	7.48
CAL-20	15.94	CAL-20	7.15
CAL-12	15.69	CAL-12	7.00
CAL-01	15.30	CAL-01	6.73
CAL-03	13.35	CAL-03	5.77
CAL-15	13.12	CAL-15	5.61
CAL-11	12.75	CAL-11	5.47
CAL-05	12.31	CAL-05	5.26
CAL-04	11.95	CAL-04	5.10
CAL-17	11.85	CAL-17	5.03
CAL-18	11.74	CAL-18	4.96
CAL-07	11.14	CAL-07	4.76
CAL-09	10.28	CAL-09	4.38
CAL-10	9.86	CAL-10	4.05
BRE-02	9.43	BRE-02	3.92
CAL-21	8.61	CAL-21	3.54
BRE-11	7.27	BRE-11	3.00
CAL-06	5.14	CAL-06	2.11
BRE-04	4.77	BRE-04	1.92

Los valores de absorción de agua al vacío y porosidad se graficaron en la Figura 24, los íconos rojos representan muestras de brecha calcárea y los azules, de caliza. Los rombos indican que se trata de muestras recolectadas del Templo Norte y sus alrededores, los cuadrados señalan las rocas procedentes del Templo de los Guerreros, los triángulos del Complejo las Monjas y el círculo del afloramiento.

En la gráfica, nuevamente puede observarse que mientras aumenta el porcentaje de porosidad de las rocas, aumenta su absorción de agua al vacío. Además, la

brecha tiende a ser la textura más porosa y absorbente, con excepción de las dos muestras CAL-02 y BRE-04, por las razones que se mencionaron en el párrafo anterior.

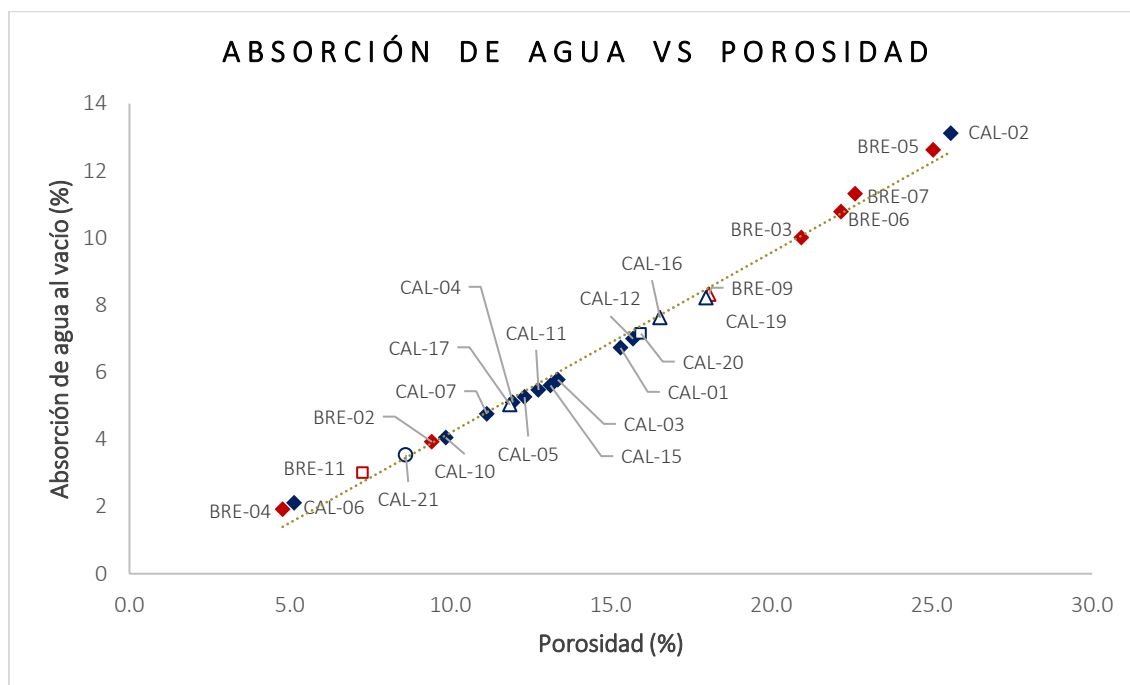


Figura 24. Gráfica de Absorción de agua al vacío vs porosidad efectiva de muestras de brecha calcárea y calizas.

4.4.2 Expansión hídrica y térmica

Se emplearon 8 prismas rectangulares para los experimentos de expansión hídrica y térmica, 4 de ellos de brecha calcárea (BRE-02, BRE-03, BRE-04 y BRE-05) y 4 de caliza (CAL-01, CAL-02, CAL-04 y CAL-11). El grosor del prisma fue de 1cm, las longitudes variaron debido al tamaño de la muestra de roca; las dimensiones se indican en la Tabla 7. La selección de muestras se enfocó en analizar cuatro prismas de cada litología de los alrededores del Templo Norte que no tuvieran grietas ni fisuras, ya que desafortunadamente varias rocas se quebraron durante el corte y otras más tenían el tamaño insuficiente para generar el prisma.

Tabla 7. Longitud (mm) de muestras analizadas para expansión hídrica y térmica.

CALIZAS		BRECHAS CALCÁREAS	
Muestra	Medida (mm)	Muestra	Medida (mm)
CAL-01	69.60	BRE-02	60.78
CAL-02	59.54	BRE-03	103.05
CAL-04	55.54	BRE-04	101.59
CAL-11	101.45	BRE-05	83.46

En los ensayos de expansión térmica, sólo dos muestras de brecha calcárea (BRE-03 y BRE-05) mostraron cambios en su longitud, el incremento ocurrió antes de los primeros 20 minutos, ver Figura 25. Por otro lado, no se observaron cambios de expansión o dilatación durante las tres horas de duración del experimento en las dos muestras restantes de brecha y todas las rocas calizas analizadas.

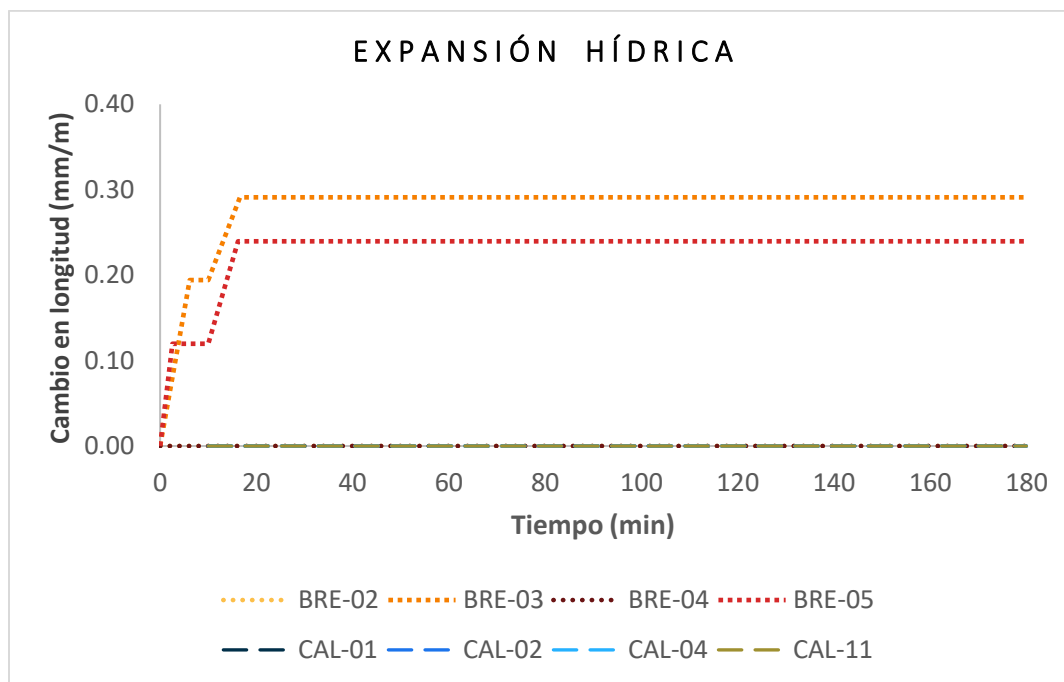


Figura 25. Gráfica de expansión hídrica de muestras de brecha y caliza.

En cuanto a la expansión térmica, se observó que todas las muestras presentaron sensibilidad al calor, pues comenzaba a cambiar su longitud desde antes de que la roca se llegara a calentar a 50°C y se observó por lo menos en uno de los dilatómetros que aumentaban casi de manera lineal conforme aumentaba la temperatura.

Las calizas llegaron a expandirse hasta 0.27 mm en la temperatura más alta (200°C), mientras que la expansión máxima de una de las brechas fue de 0.18 mm. Al enfriar la mayoría de las muestras (50°C), seis de las rocas presentaron contracción y ninguna volvió a presentar valores de cero en ambos dilatómetros, es decir, ninguna volvió a su longitud original.

En las Figuras 26 y 27, se ilustran los resultados en gráficas, a la izquierda las muestras de caliza y a la derecha, las de brecha calcárea. Se muestran dos series en cada una de las gráficas que corresponden a los valores de los dos dilatómetros colocados a cada lado de la roca durante el experimento.

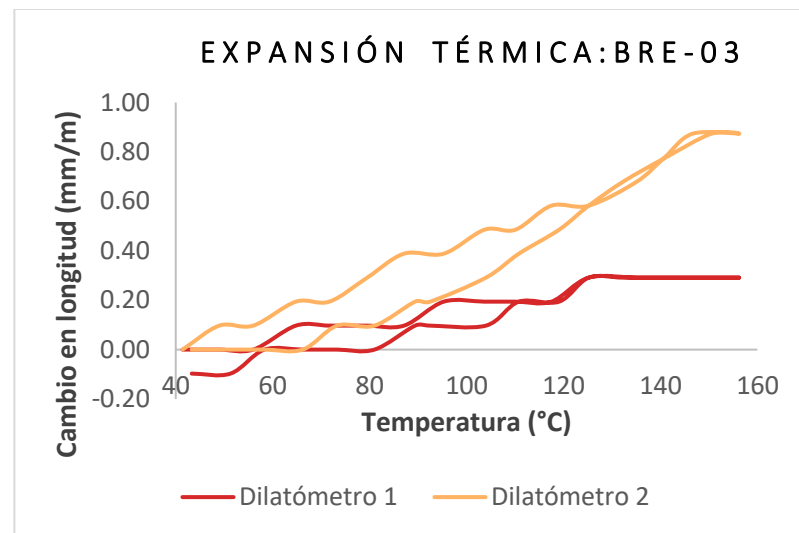
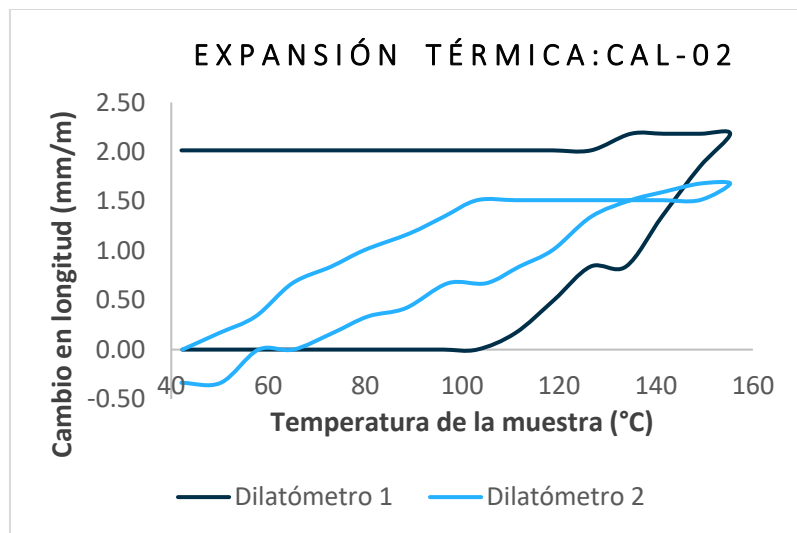
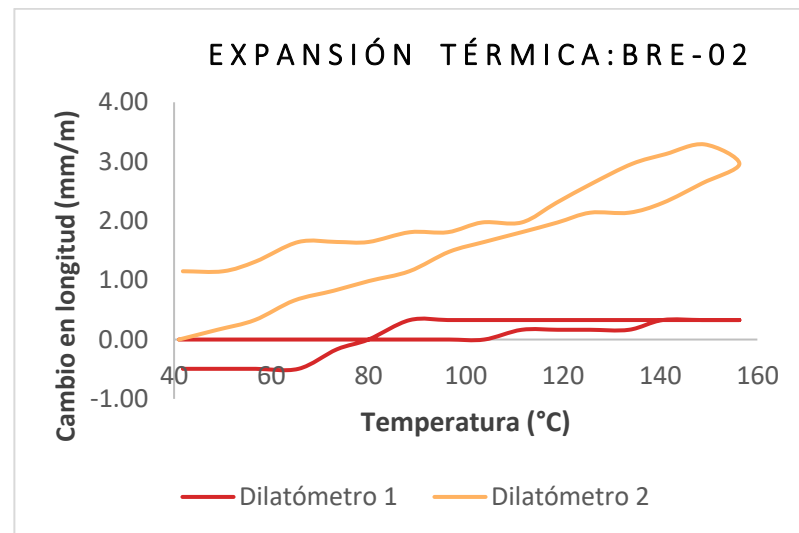
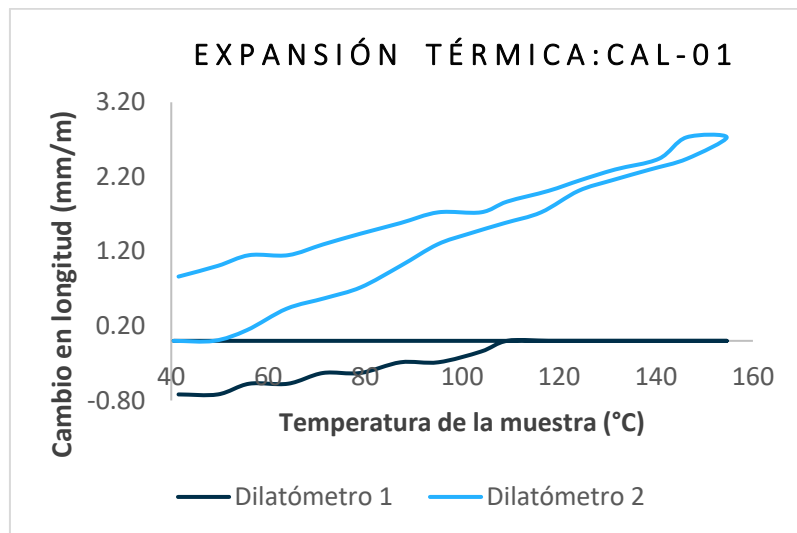


Figura 26. Gráficas de expansión térmica para muestras de calizas (izquierda) y brechas (derecha).

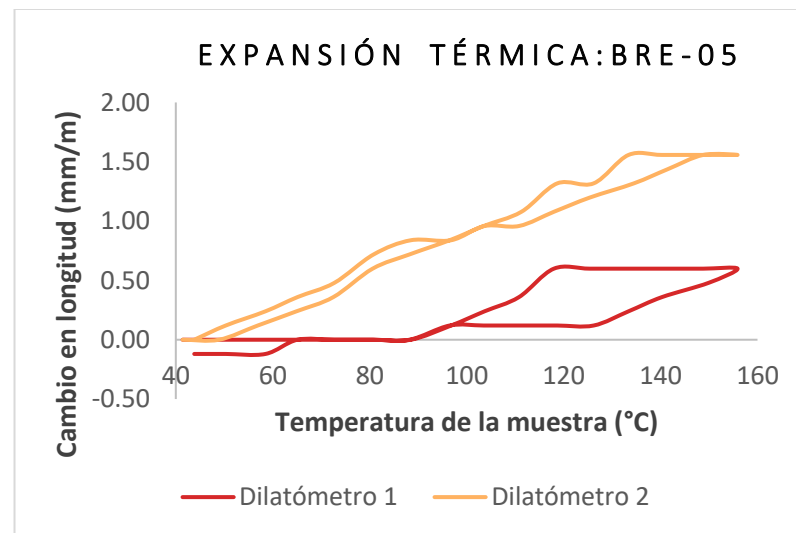
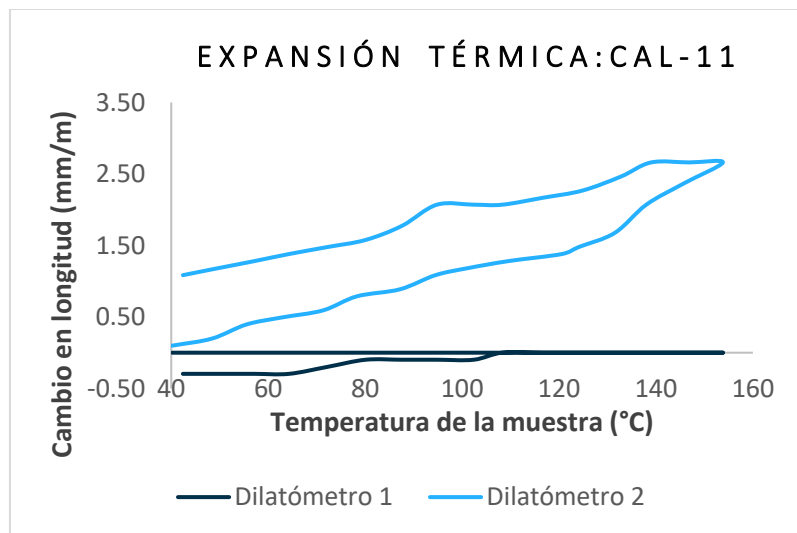
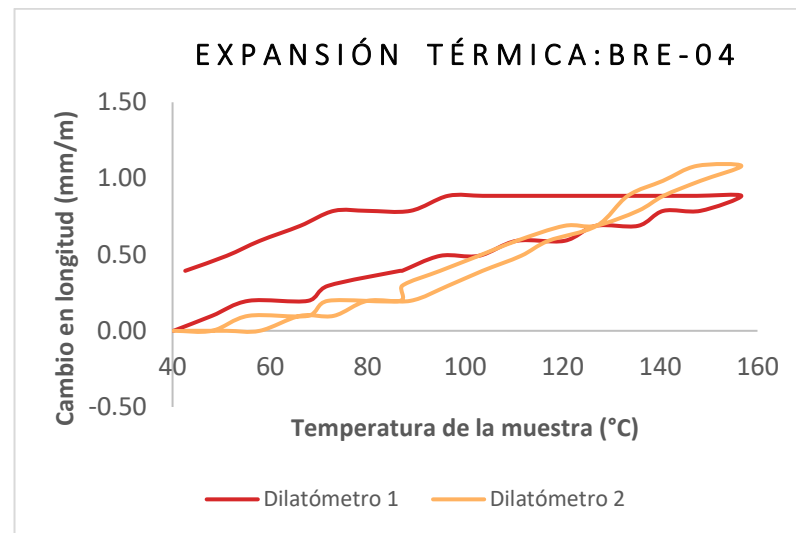
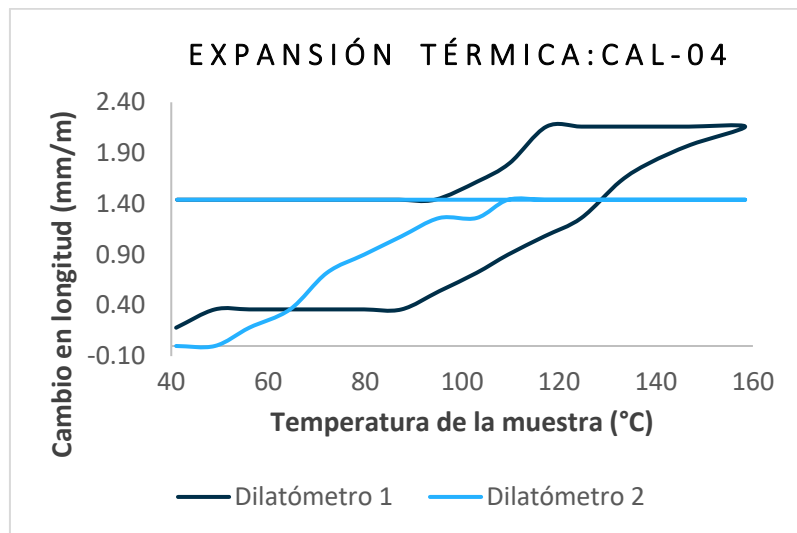


Figura 27. Gráficas de expansión térmica para muestras de calizas (izquierda) y brechas (derecha).

4.4.3 Absorción capilar

Se realizó el experimento de absorción capilar en 3 cubos de caliza (CAL-05, CAL-06 y CAL-07) y 2 de brecha calcárea (BRE-05 y BRE-06). Se procuró evaluar por lo menos dos cubos de cada litología de los alrededores del Templo Norte, no fue posible cortar un tercer cubo de brecha ya que no se contaba con suficiente cantidad de muestra para obtener un cubo más.

Se puede observar que las rocas calizas y la muestra de brecha BRE-06 se impregnan de agua rápidamente en los primeros 1 a 3 minutos y después el peso queda estático durante el transcurso de la hora restante; por otro lado, la muestra de brecha BRE-05 absorbió líquido de manera paulatina hasta los 20 minutos transcurridos desde el inicio del ensayo.

En la Figura 28 se presentan los resultados graficados de la capilaridad en kg/m^2 por minuto de las muestras de calizas y brechas calcáreas.

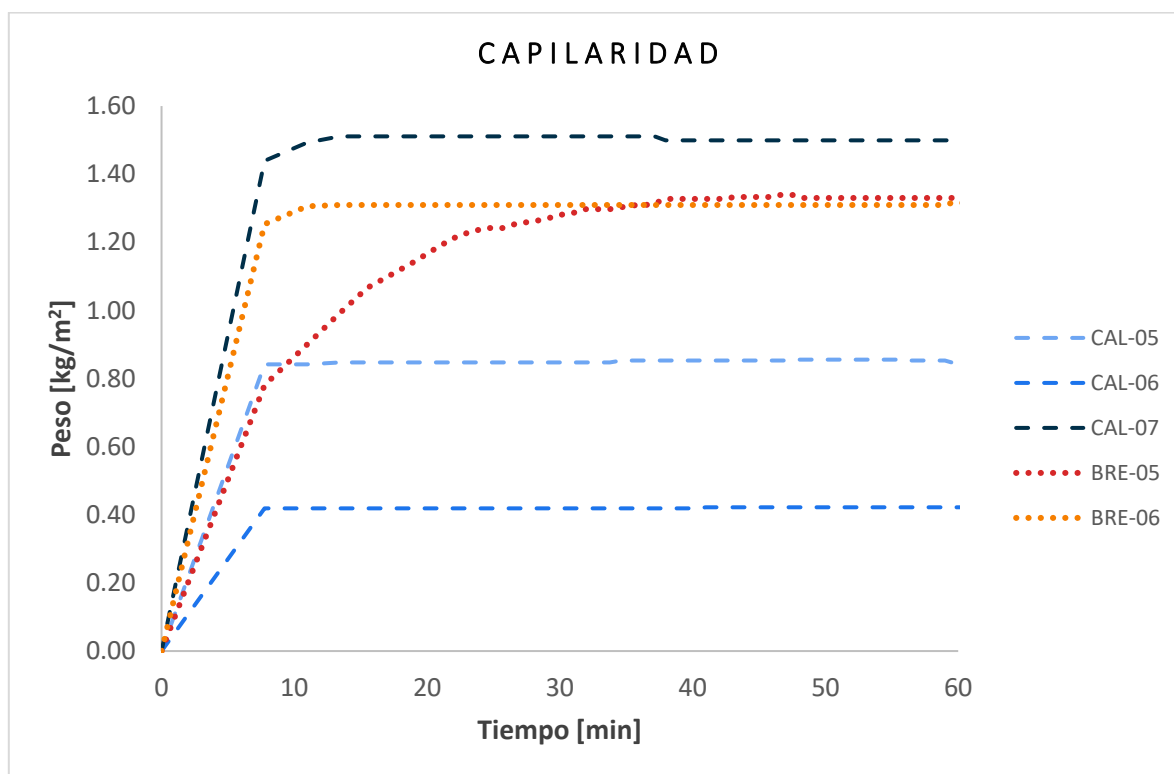


Figura 28. Gráficas de absorción por capilaridad de muestras de caliza y brechas.

4.4.4 Prueba de envejecimiento por explosión salina

Para la prueba de envejecimiento por sales se utilizaron dos cubos de roca, uno de caliza (CAL-10) y otro de brecha calcárea (BRE-06), nuevamente se buscó analizar por lo menos un cubo de cada tipo de roca ya que el ensayo es destructivo y no se contaba con suficiente cantidad de muestras de las dimensiones requeridas.

La muestra de brecha se rompió a los 42 ciclos de inmersión en la solución salina, durante el transcurso se observó que la roca presentaba una gruesa capa de eflorescencias cada que terminaba de secarse en el horno y se notaban perforaciones y disgregación en sus caras, en el ciclo 36 perdió un fragmento de una de sus esquinas. Se observó también que, al terminar el experimento, los clastos de caliza que contenía estaban en buen estado.

La muestra de caliza mostró una fina capa de sales al término de casi cada ciclo de secado, sus aristas se desgastaron ligeramente y un fragmento de sus esquinas se desprendió en el ciclo 38, sin embargo, no se observaron fracturas ni perforaciones, la superficie continuó homogénea y lisa hasta que el experimento se detuvo en el ciclo 100.

En las Figuras 29 y 30 se presentan los resultados del ensayo de cristalización de sales en forma de gráfica.

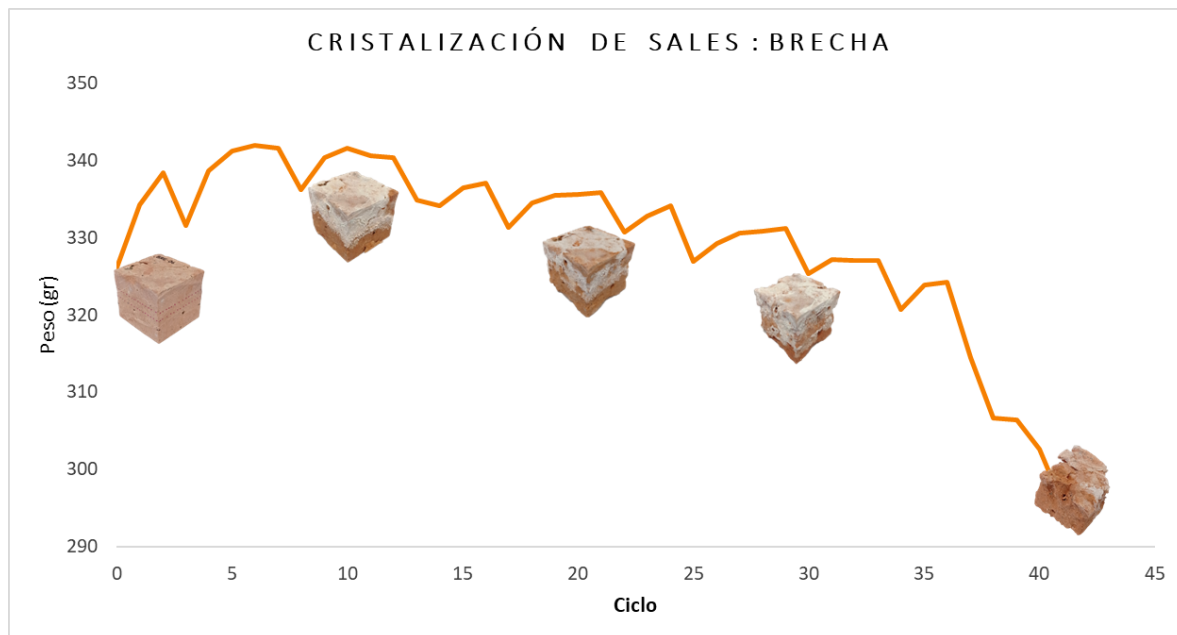


Figura 29. Ensayo de cristalización de sales en muestra de brecha (BRE-06).

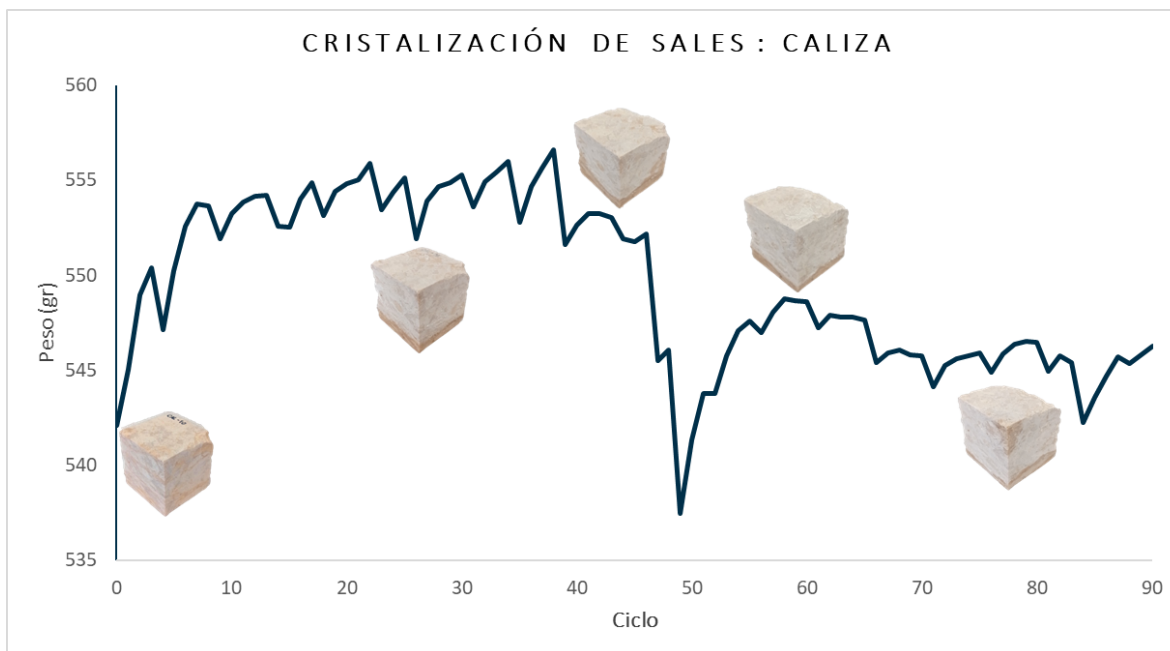


Figura 30. Ensayo de cristalización de sales en muestra de caliza (CAL-10).

4.4.5 Resistencia a la compresión uniaxial

Se destruyeron dos cubos de muestra en la prensa automática (cuyas dimensiones se señalan en la Tabla 8) uno de caliza (CAL-12) y otro de brecha calcárea (BRE-05), resistieron 33.43 MPa y 36.05 MPa respectivamente, antes de fallar (Figura 31). Una vez más el objetivo fue evaluar como mínimo un cubo de cada litología debido a la naturaleza destructiva del ensayo.

Tabla 8. Dimensiones de muestras de cubos de caliza y brecha para el experimento de resistencia a la compresión uniaxial.

CALIZA		BRECHA CALCÁREA	
Muestra	Medidas (mm)	Muestra	Medida (mm)
CAL-12	62.31 x 59.92 x 59.36	BRE-05	67.81 x 65.68 x 63.51

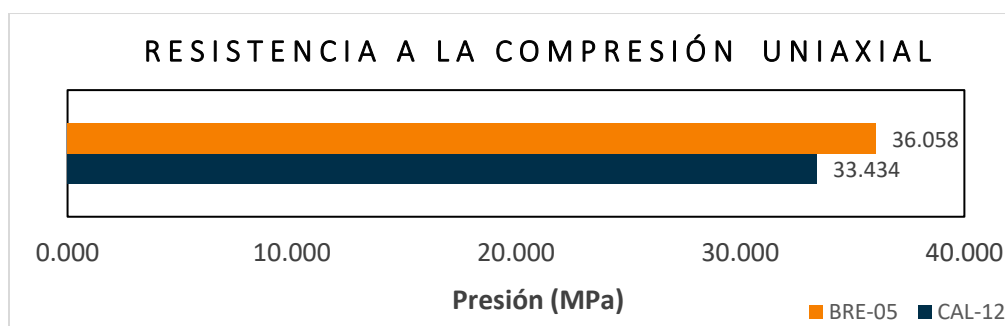


Figura 31. Resistencia a la compresión uniaxial de muestras de caliza y brecha.

4.5 Geoquímica de roca total

A continuación, se desglosan los resultados obtenidos para la determinación elemental de las muestras de rocas calizas y brechas, divididas según la técnica analítica empleada.

4.5.1 Análisis por ICP-OES

Se analizaron un total de 16 muestras de roca (CAL-01, CAL-02, CAL-03, CAL-04, CAL-14, CAL-16, CAL-17, CAL-19, CAL-20, CAL-21, BRE-02, BRE-03, BRE-04, BRE-08, BRE-10, BRE-11) y en adición, se introdujo una muestra de sal (182SPCHI) del Templo Norte.

Para la selección de muestras se procuró analizar por lo menos una muestra sana de cada litología y de cada sitio donde se obtuvieron muestras, de preferencia que originalmente hubieran pertenecido a los muros de los inmuebles: Templo Norte (CAL-01, CAL-02, CAL-04, CAL-14, BRE-02, BRE-03, BRE-04 y BRE-08), Templo de los Guerreros (CAL-20 y BRE-11), el Conjunto de las Monjas (CAL-17 y BRE-10) y una más del afloramiento cercano al Cenote Sagrado (CAL-21). También se introdujeron muestras de distinto estado de conservación para evaluar si existía alguna diferencia en la composición elemental con las rocas sanas, fue el caso de CAL-03 con alveolización, CAL-16 que es una roca quemada y CAL-19 con erosión. Por último, la elección de la muestra CAL-02 se debe a su diferencia en coloración y propiedades con el resto de las calizas, presentando un tono negro y mayor absorción de agua que otras rocas de la misma litología.

Junto a las muestras se procesaron también 3 duplicados, un blanco reactivo y el estándar IGLc-1 del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de México (UNAM).

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos de los elementos mayores en forma de óxidos para cada muestra, la unidad se encuentra en porcentaje en peso. Es importante mencionar que la cuantificación del óxido de silicio no es del todo confiable, ya que durante el proceso de digestión por placa este elemento puede perderse. Los 17 elementos traza que se pudieron detectar con el instrumento se pueden observar en la Tabla 10, cuantificado en partes por millón (PPM).

A partir de los datos, se graficó la cantidad de CaO de calizas (azul) y brechas (naranja) en la Figura 32, adicionalmente se realizaron dos gráficas de elementos mayores para cada litología sin la serie del óxido de calcio presente (Figuras 33 y 34) debido a que la gran cantidad de este compuesto no permite apreciar correctamente las variaciones del resto de los elementos. Los elementos traza se ilustran en las Figuras 35 y 36.

Por otro lado, los datos que se obtuvieron de la sal del muro del Templo Norte se presentan las Figuras 37 y 38 que ilustran los resultados en gráficas.

Tabla 9. Concentración de elementos mayores en las muestras analizadas de brecha y caliza en ICP-OES.

	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	SiO ₂
Muestra	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
CAL-01	0.00	0.00	36.96	0.11	0.07	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
CAL-02	0.02	0.00	34.82	0.40	0.05	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01
CAL-03	0.00	0.00	30.96	0.17	0.07	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01
CAL-04	0.03	0.00	33.30	0.23	0.07	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04
CAL-14	0.00	0.00	32.54	0.54	0.27	0.31	0.00	0.00	0.00	0.25
CAL-16	0.00	0.00	30.02	0.31	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAL-17	0.01	0.00	26.63	0.21	0.05	0.00	0.09	0.00	0.01	0.01
CAL-19	0.01	0.00	33.67	0.43	0.22	0.00	0.07	0.01	0.01	0.21
CAL-20	0.08	0.00	34.05	0.24	0.09	0.00	0.30	0.00	0.09	0.11
CAL-21	0.00	0.00	35.74	0.13	0.06	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00
BRE-02	2.15	0.04	38.13	0.42	0.54	0.00	7.09	0.00	2.51	0.31
BRE-03	1.60	0.03	34.50	0.54	0.50	0.00	5.73	0.00	1.87	0.44
BRE-04	0.61	0.01	37.50	0.29	0.21	0.00	1.55	0.00	0.71	0.39
BRE-08	0.17	0.00	30.91	0.58	0.37	0.55	0.61	0.00	0.20	0.49
BRE-10	3.34	0.10	39.41	0.60	0.46	0.00	8.47	0.02	3.90	0.15
BRE-11	0.23	0.00	35.75	0.47	0.18	0.00	0.74	0.00	0.27	0.32
182SPCHI	0.15	0.00	38.45	1.16	0.84	0.39	0.52	0.01	0.17	0.88
Estándar IGC-1	0.00	0.00	34.77	0.26	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 10. Concentración de elementos traza en las muestras analizadas de brecha y caliza en ICP-OES.

	Mo	S	Sr	As	Pb	Sn	Hg
Muestra	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM
CAL-01	0.00	360.02	7.02	8.03	0.00	0.00	0.00
CAL-02	0.00	645.25	0.00	1.11	0.00	0.00	0.00
CAL-03	0.00	176.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAL-04	0.00	452.95	28.07	0.00	161.44	0.00	0.00
CAL-14	0.00	1085.99	51.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAL-16	0.00	1068.74	110.58	9.15	0.00	0.00	0.00
CAL-17	0.00	487.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAL-19	0.00	400.27	9.18	0.00	0.00	0.00	0.00
CAL-20	0.00	657.11	10.55	0.00	0.00	0.00	0.00
CAL-21	0.00	388.78	0.00	0.00	134.71	0.00	0.00
BRE-02	0.00	315.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BRE-03	0.00	606.28	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00
BRE-04	1.78	779.51	165.68	0.00	0.00	0.00	560.99
BRE-08	0.00	1282.45	152.18	0.00	0.00	0.00	0.00

	Mo	S	Sr	As	Pb	Sn	Hg
Muestra	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM
BRE-10	7.35	398.03	0.00	0.00	0.00	0.00	795.82
BRE-11	0.00	936.37	0.00	4.39	0.00	0.00	0.00
182SPCHI	0.00	1666.82	390.54	0.00	0.00	20.11	8.59
Estándar IGC-1	0.00	183.56	308.50	0.00	0.00	0.00	0.00

	Cd	Zn	Cu	Ni	Co	Cr	Ba
Muestra	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM
CAL-01	3.48	5.98	0.00	187.26	0.00	0.00	494.84
CAL-02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAL-03	0.00	3.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAL-04	1.32	7.80	0.00	440.80	0.00	0.00	0.00
CAL-14	0.00	0.00	0.00	161.38	0.00	0.00	0.00
CAL-16	0.00	8.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAL-17	0.00	0.00	0.00	519.34	0.00	0.00	0.00
CAL-19	0.00	2.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAL-20	0.00	0.00	0.00	148.59	0.00	0.00	0.00
CAL-21	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BRE-02	0.00	20.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BRE-03	1.90	16.95	0.00	69.42	0.00	0.00	0.00
BRE-04	0.00	12.85	0.00	0.00	0.00	0.00	1.79
BRE-08	0.29	0.17	0.00	1251.84	0.00	0.00	0.00
BRE-10	0.85	28.90	0.00	312.66	0.00	0.00	7.35
BRE-11	7.63	3.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
182SPCHI	1.63	3.98	123.65	187.09	0.00	0.00	0.00
Estándar IGC-1	0.10	0.35	0.00	218.77	0.00	0.00	0.00

Como puede observarse los contenidos de CaO no difieren entre una litología u otra, las muestras oscilan entre un rango de 26.63 a 39.41%, que coincide con el valor del estándar en 34.77%. Entre las diferencias destaca que las brechas presentan porcentajes más altos de SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ y TiO₂ donde las calizas muestran valores muy bajos o nulos. Asimismo, la mayor variedad de elementos traza se observa en las brechas. Destaca también que las muestras pertenecientes directamente a los muros del Templo Norte y la sal (CAL-14, BRE-08 y 182 SPCHI) son las únicas muestras que presentan rastros de Na₂O. De igual manera, la cantidad de azufre es mayor que el estándar en todas las muestras a excepción de CAL-03 y especialmente destacan los valores de los fragmentos de roca correspondientes al Templo Norte y sus sales (CAL-14, BRE-08 y 182SPCHI) y en la roca quemada del Complejo de las Monjas (CAL-16). La sal es la única muestra con estaño y cobre, además de ser la que contiene una mayor cantidad de estroncio.

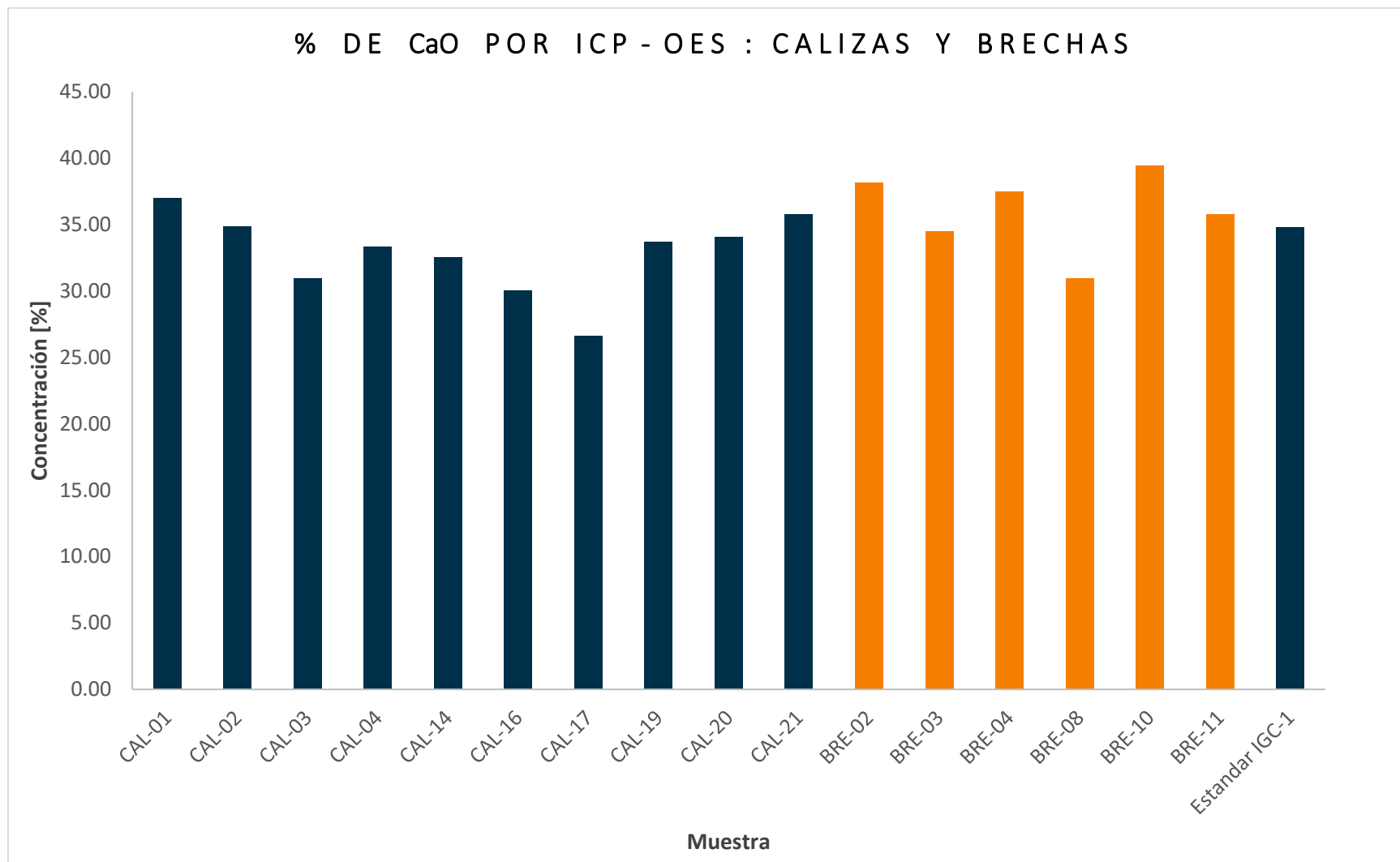


Figura 32. Gráfica de concentración de CaO por ICP-OES en muestras de calizas.

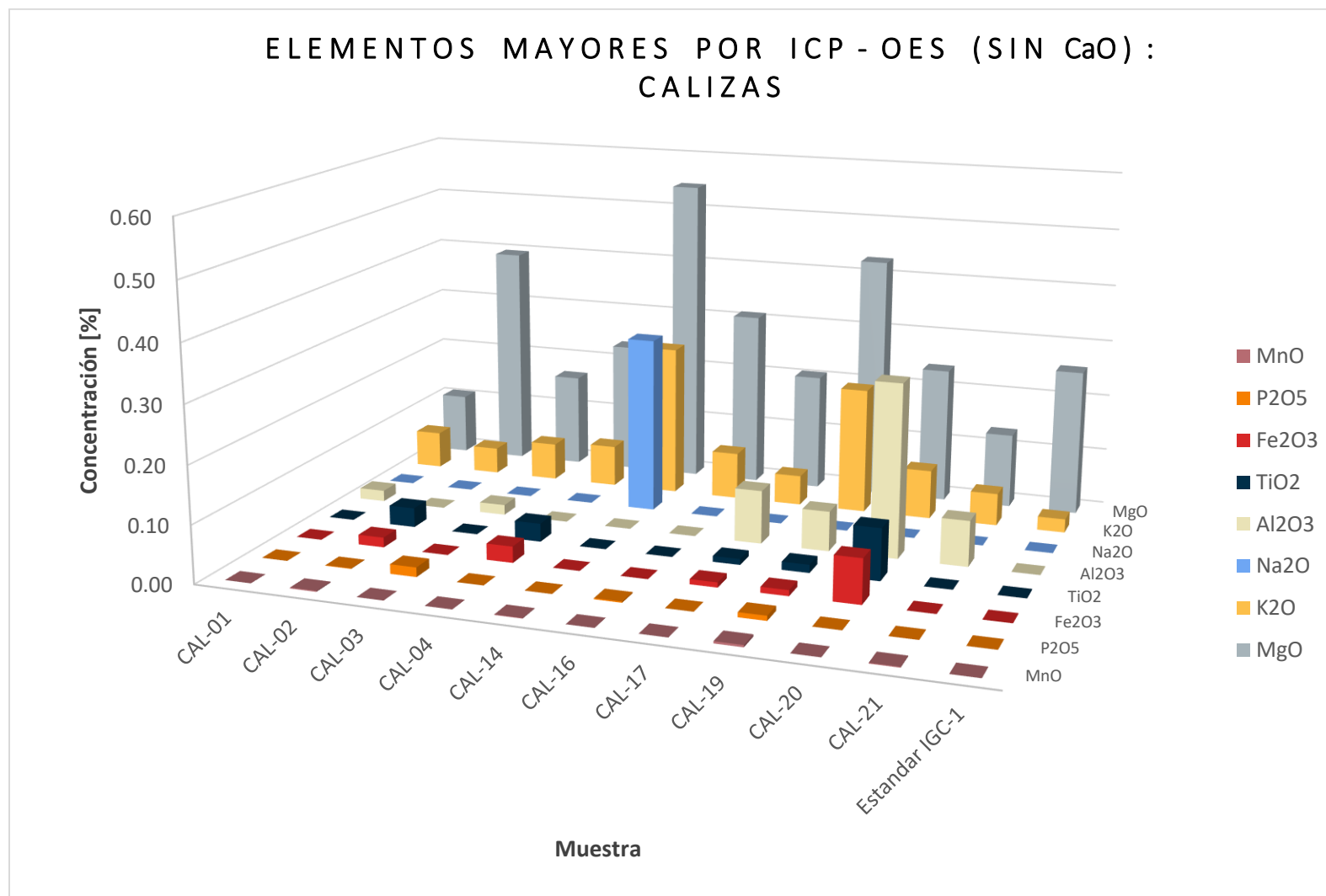


Figura 33. Gráfica de concentración de elementos mayores por ICP-OES en muestras de calizas (sin CaO).

ELEMENTOS MAYORES POR ICP - OES (SIN CaO): BRECHAS

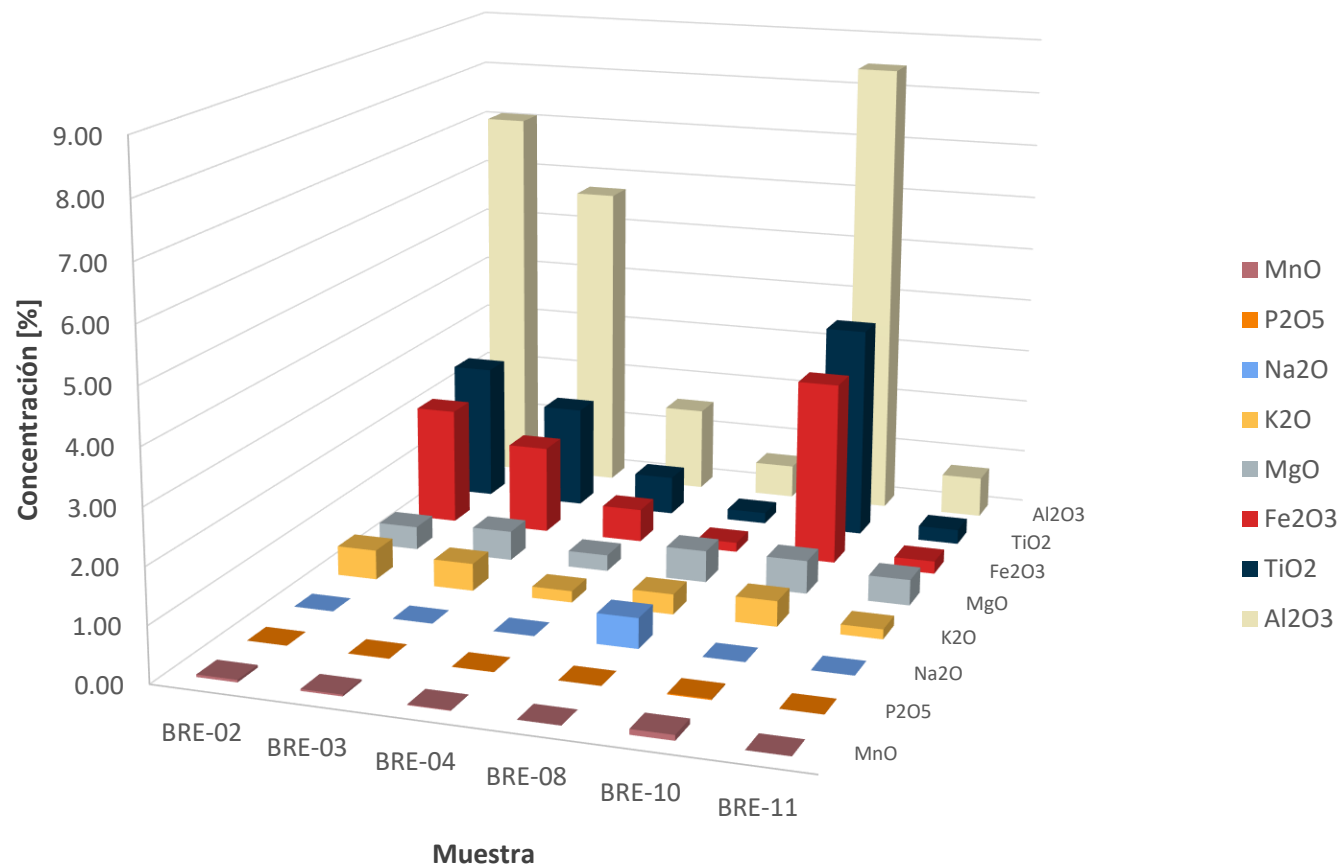


Figura 34. Gráfica de concentración de elementos mayores por ICP-OES en muestras de brecha (sin CaO).

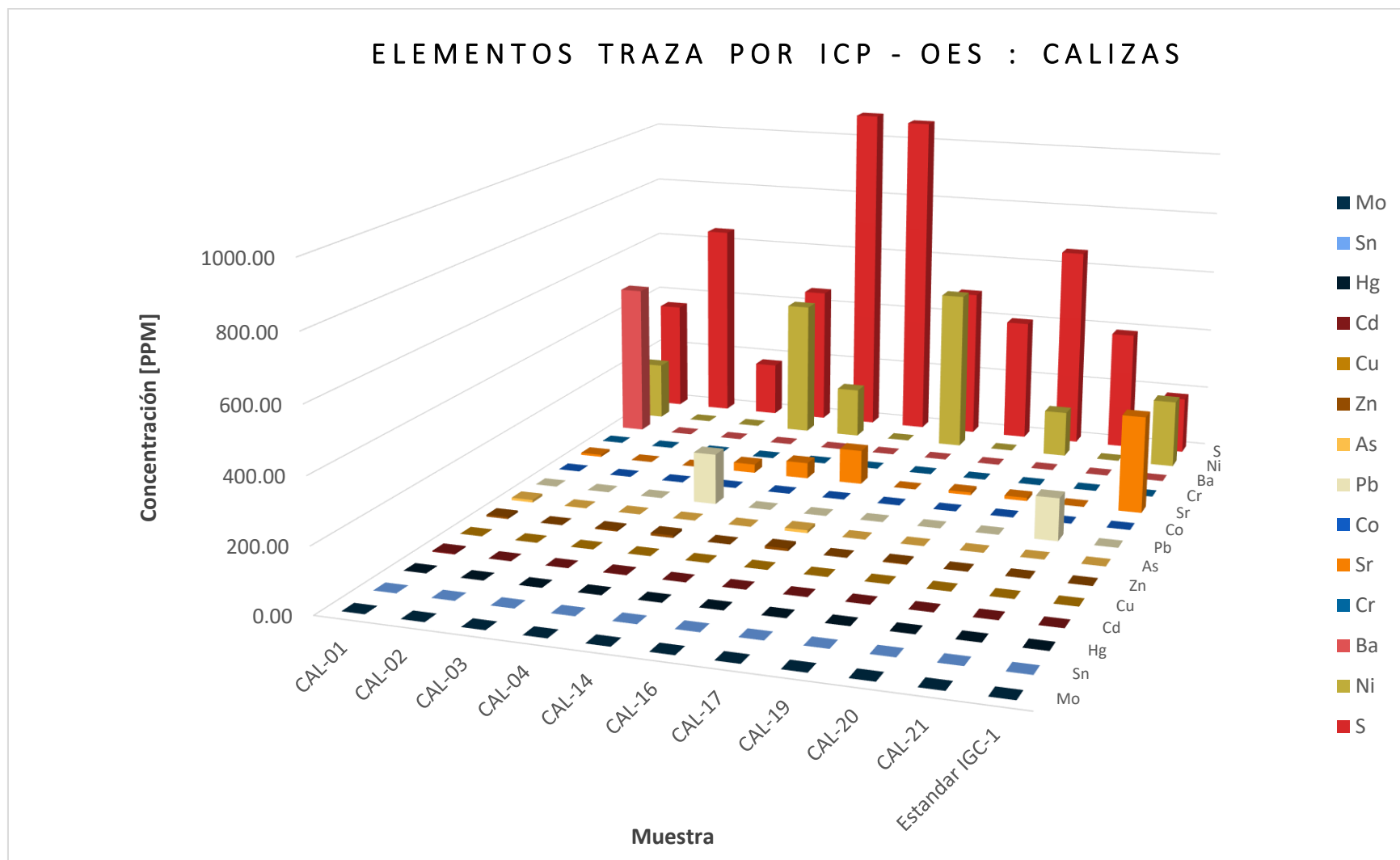


Figura 35. Gráfica de concentración de elementos traza por ICP-OES en muestras de caliza.

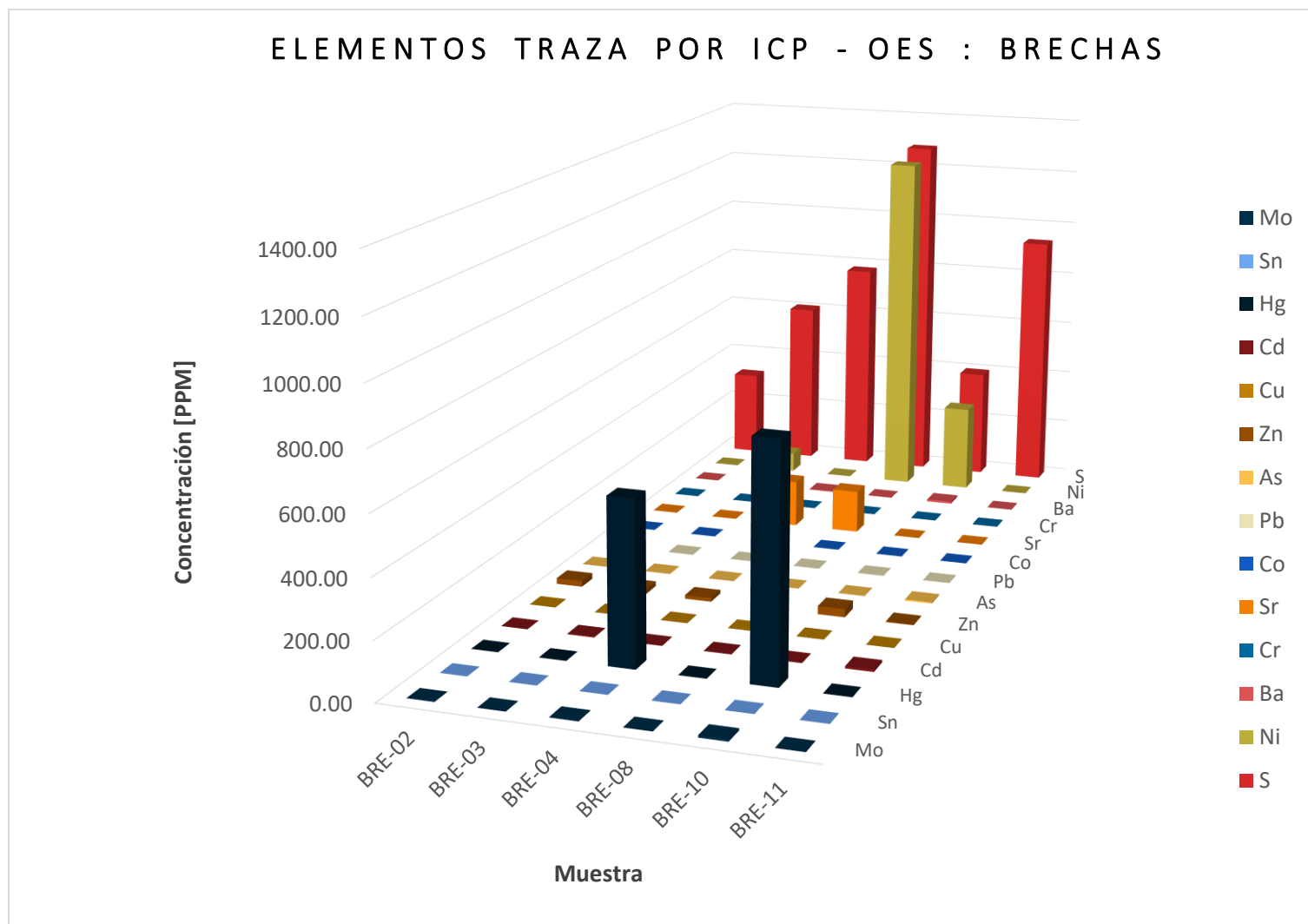


Figura 36. Concentración de elementos traza por ICP-OES en muestras de brecha.

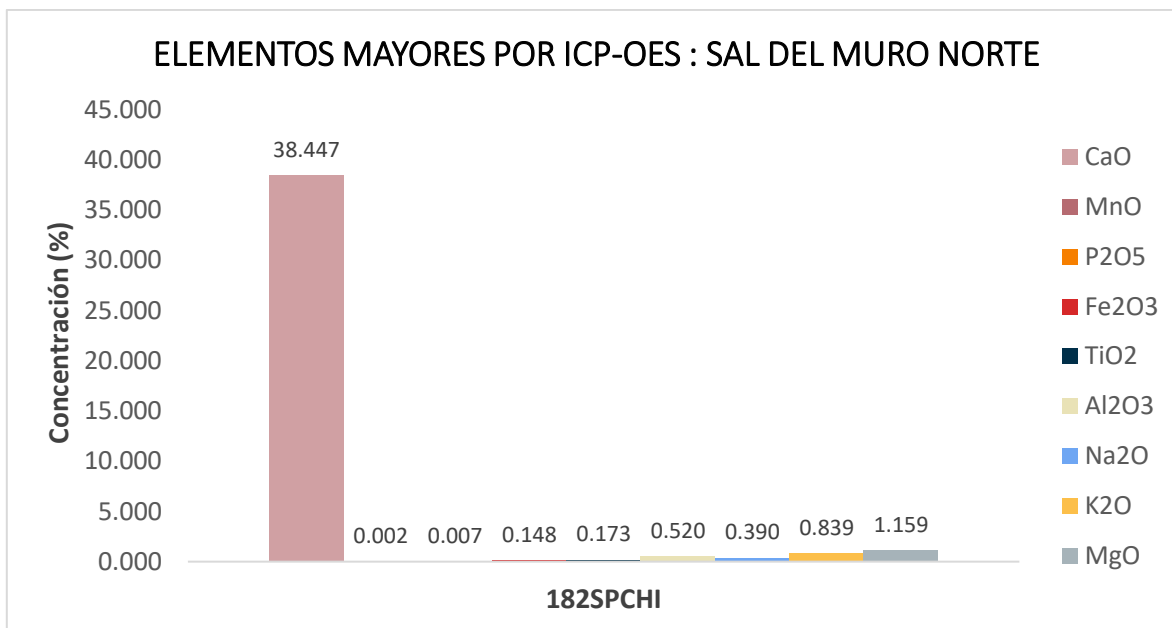


Figura 37. Concentración de elementos mayores por ICP-OES en sal del Templo Norte.

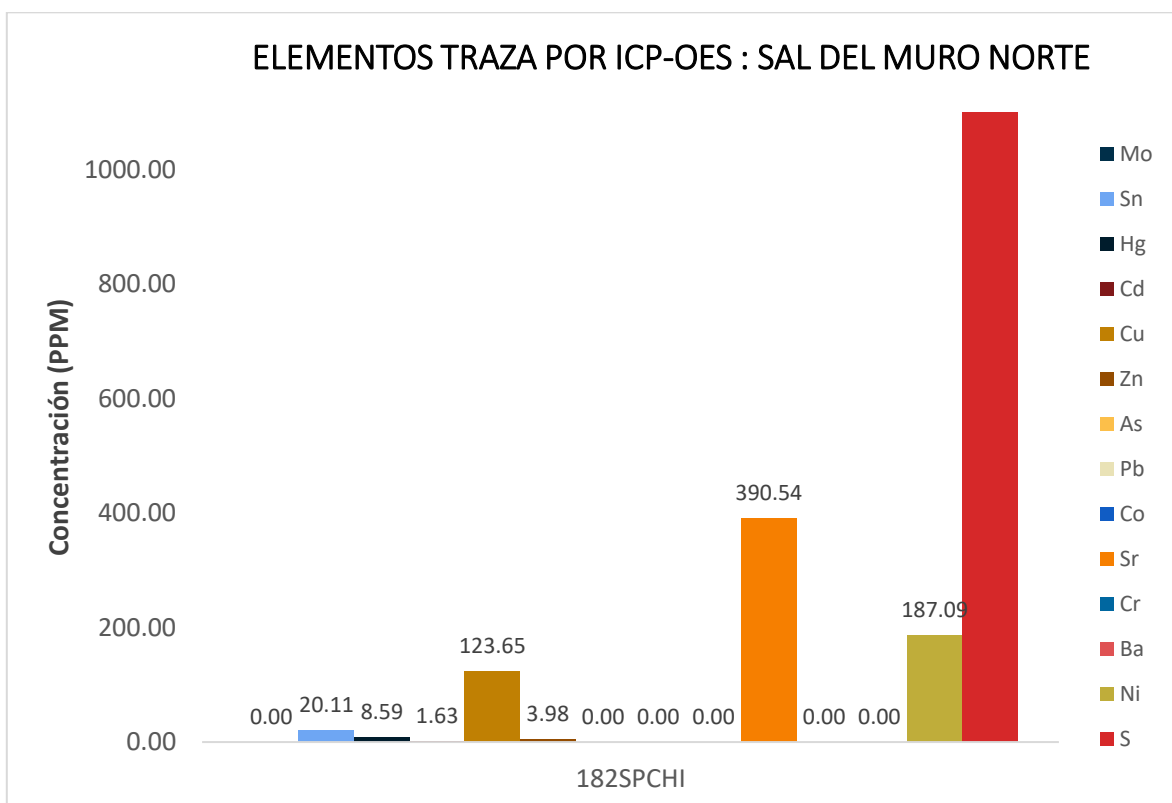


Figura 38. Concentración de elementos traza por ICP-OES en sal del Templo Norte.

4.5.2 Fluorescencia de Rayos X

Se realizaron análisis de FRX en el Instituto de Metalurgia de la UASLP con la finalidad de evaluar el contenido de silicio en algunas de las muestras, ya que debido a la digestión ácida por placa que se realizó para el análisis por medio de ICP-OES el resultado de cuantificación de este elemento no es confiable ya que tiende a perderse durante el proceso, aunque sí se observó que el elemento estaba presente en las rocas.

Se seleccionaron dos muestras de roca sana, una de cada litología, pertenecientes al Templo Norte (CAL-14 y BRE-08), además de una roca con alveolización (CAL-03) y dos muestras más de brechas (BRE-02 y BRE-03) recolectadas alrededor del inmueble antes mencionado ya que durante el ensayo de DRX mostraron más claramente el contenido de otros minerales.

En la Tabla 11 se presentan los resultados de la concentración de elementos mayores y en la Tabla 12, de los elementos traza; en las Figuras 39, 40 y 41 se ilustran las cuantificaciones por medio de gráficas.

Tabla 11. Concentración de elementos mayores en las muestras analizadas de brecha y caliza en FRX.

	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
Muestra	%	%	%	%	%	%	%	%	%
CAL-03	0.00	0.00	0.90	0.00	0.00	57.23	0.00	0.00	0.07
CAL-14	0.00	0.00	1.18	0.00	0.12	65.38	0.00	0.00	0.04
BRE-02	0.00	0.00	2.13	0.00	0.27	37.47	0.24	0.07	3.21
BRE-03	0.00	0.00	2.01	0.00	0.28	41.33	0.00	0.06	2.80
BRE-08	0.00	0.00	1.48	0.00	0.29	73.30	0.00	0.00	0.82

Tabla 12. Concentración de elementos traza en las muestras analizadas de brecha y caliza en FRX.

	S	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Y
Muestra	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM
CAL-03	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.000
CAL-14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.029	0.001
BRE-02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004	0.002
BRE-03	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.009	0.003
BRE-08	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.036	0.001

	Zr	Nb	Mo	Rh	Pd	Ag	Cd	Sn	Sb	Ta	W
Muestra	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM
CAL-03	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CAL-14	0.003	0.005	0.005	0.000	0.056	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BRE-02	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BRE-03	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BRE-08	0.005	0.007	0.009	0.000	0.125	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000

	Pt	Au	Hg	Pb	Bi	Th	U	LE
Muestra	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM	mg/kg PPM
CAL-03	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	58.605
CAL-14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	52.495
BRE-02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	69.538
BRE-03	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	67.263
BRE-08	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018	0.000	45.893

Los porcentajes de CaO de todas las muestras oscilaron entre 37.47 a 73.30% y las brechas mostraron valores más altos de Fe₂O₃ y SiO₂, a diferencia de las calizas. También puede observarse que las brechas tienen una mayor cantidad y variedad de elementos trazas. Las muestras obtenidas directamente de los muros del Templo Norte son las únicas que presentaron trazas de niobio, molibdeno y paladio, además de tener valores más altos de estroncio y torio.

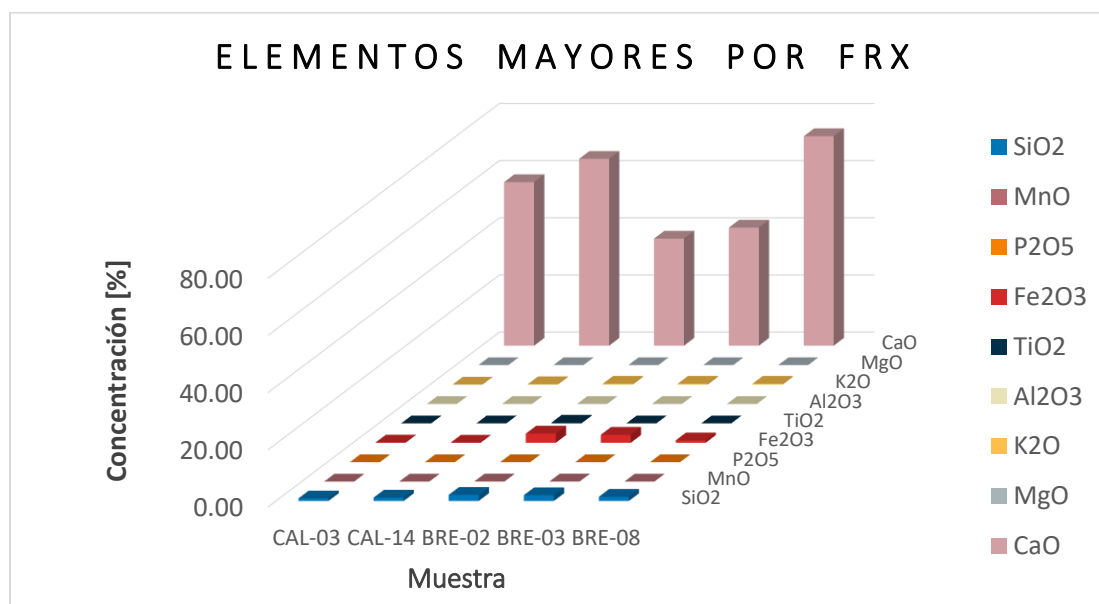


Figura 39. Concentración de elementos mayores por FRX en muestras de brecha y caliza.

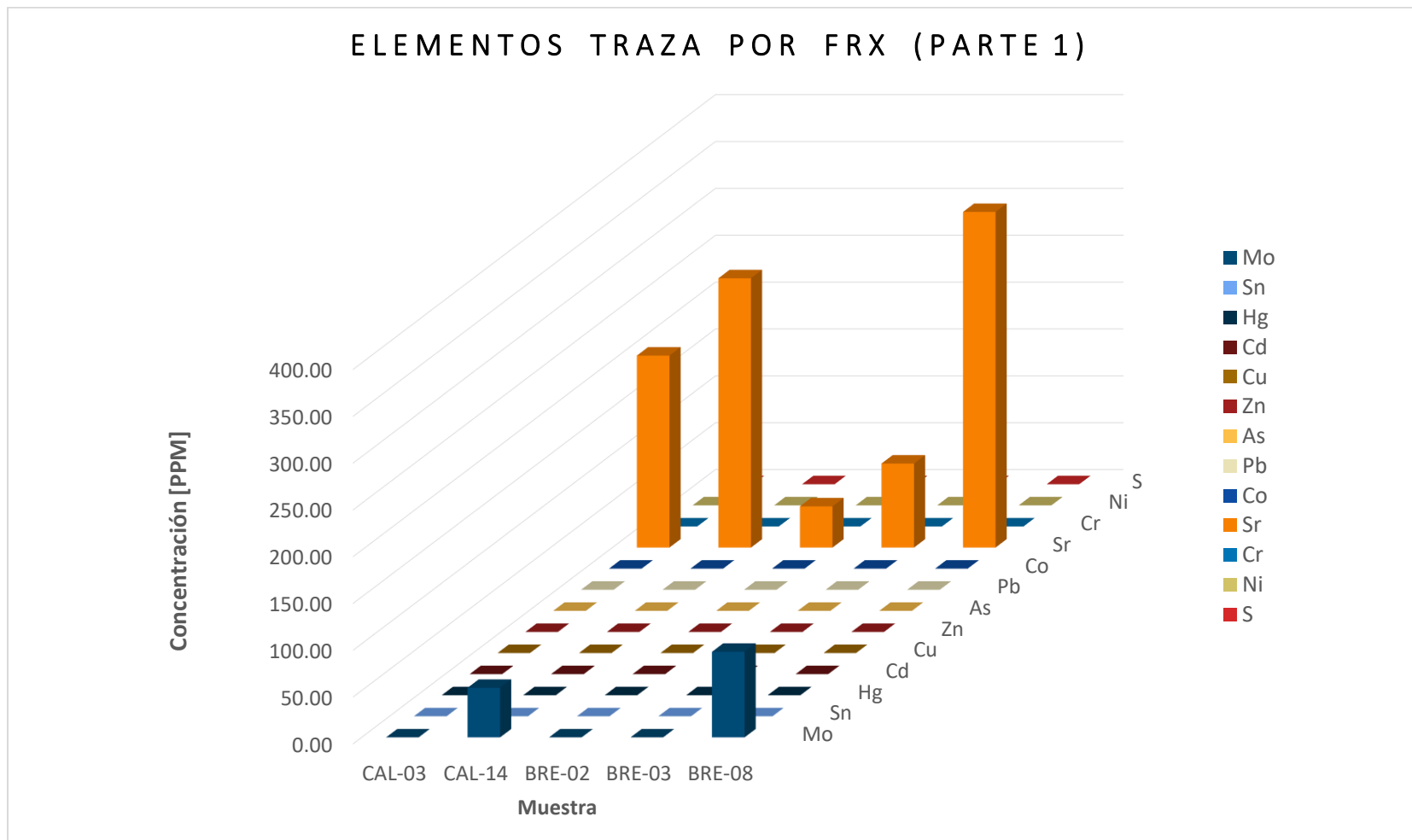


Figura 40. Concentración de elementos traza por FRX en muestras de brecha y caliza (parte 1).

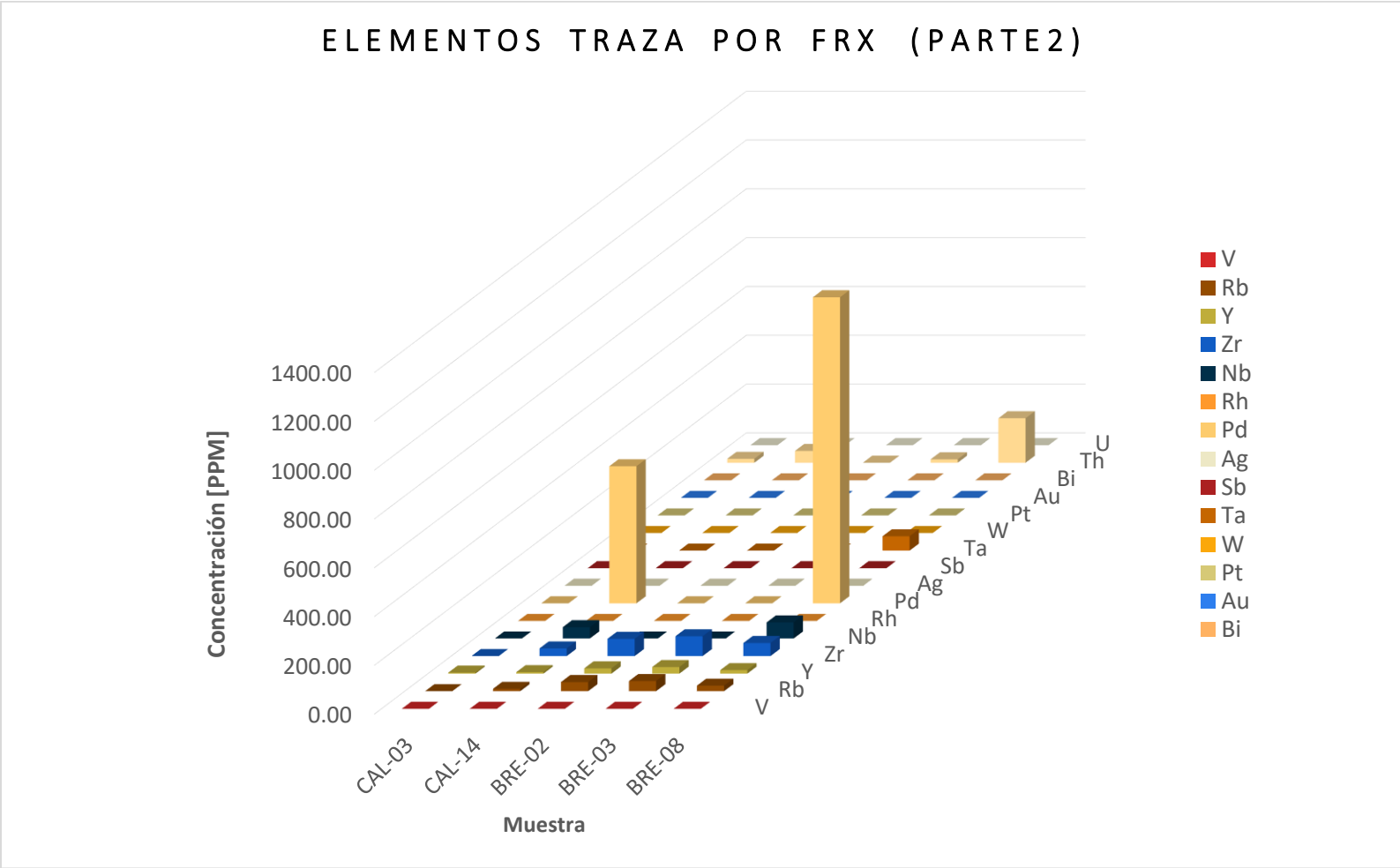


Figura 41. Concentración de elementos traza por FRX en muestras de brecha y caliza (parte 2).

4.5.3 Difracción de Rayos X (DRX)

Se analizaron 10 muestras de roca (CAL-02, CAL-03, CAL-04, CAL-05, CAL-14, BRE-02, BRE-03, BRE-04 y BRE-08) y tres muestras de sales (179 SPCHI, 181 SPCHI y 195 SPCHI) de los muros que se obtuvieron por parte del INAH. Nuevamente el objetivo fue evaluar ambas litologías del Templo Norte, con por lo menos tres muestras de roca sana (CAL-04, CAL-05, CAL-14, BRE-02, BRE-03 y BRE-04), una deteriorada (CAL-03) y se agregó la roca CAL-02 por sus propiedades petrofísicas y coloración.

Los difractogramas resultantes se muestran en las Figuras 42, 43 y 45, cada uno conjunta las muestras de caliza, brechas calcáreas o sales. Las muestras de caliza sólo arrojaron como resultado tener en su composición el mineral de calcita (CaCO_3), mientras que en las brechas rojas se encontró además diópsido ($\text{Ca}_{1.007}(\text{Mg}_{0.805}\text{Fe}_{0.214})(\text{Si}_{1.75}\text{Fe}_{0.241}\text{O}_6)$), cloritoide ($\text{Fe}_{1.77}\text{Mg}_{0.15}\text{Al}_{3.84}\text{Fe}_{0.16}\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$), almandina ($(\text{Fe}_{2.6}\text{Mg}_{0.4})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) y cuarzo (SiO_2). Las sales, al igual que las muestras de caliza, solamente indicaron la presencia de calcita.

Se decidió repetir el análisis en dos muestras de brechas (BRE-02 y BRE-03) para poder observar más claramente las fases minerales distintas a la calcita, para ello se realizó un ataque ácido con HCl al 10% y se filtró el sedimento sobrante, se secó a 40°C en horno y posteriormente se introdujo de nuevo al difractómetro. Esta vez se observó la presencia de cuarzo y clinocloro ($\text{Mg-Fe-Al-Si-Al-O-OH}$), no se indicó la existencia de almandina ni diópsido, pero sí de cloritoide en ambas muestras ($\text{Fe}_{1.81}\text{Mg}_{0.27}(\text{Al}_{3.92}\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4)$) (ver Figura 44).

Cabe aclarar que no se terminó de disolver por completo el carbonato presente en las muestras, por lo tanto, podría enmascarar las señales de los otros minerales presentes. El cloritoide es un nesosilicato, común en la formación de rocas metamórficas, no sedimentarias, por lo que se teoriza que puede tratarse en realidad de clorita por sus composiciones semejantes (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mg, Mn y Ni, Cr o Al) incluso son difíciles de distinguir uno de otro (Duda y Rejl, 1989: 148, 416; Klein et al., 2002:491,505). La clorita es un filosilicato que sí puede ser asociada a la calcita y al cuarzo, además de tener la posibilidad de ser de génesis sedimentaria (Duda y Rejl, 1989:148). El resultado del clinocloro puede tratarse de un caso parecido, aunque este mineral sí se considera dentro del grupo de las cloritas (Duda y Rejl, 1989:148).

Aun así, los resultados de DRX concuerdan con los valores altos en las brechas de SiO_2 , Fe_2O_3 y Al_2O_3 de la técnica ICP-OES y SiO_2 , Fe_2O_3 de Fluorescencia de rayos X; la presencia de estos minerales puede indicar la presencia de arcillas en las muestras (Barnoos et al., 2020), esto se examinará más a fondo en la sección de discusión.

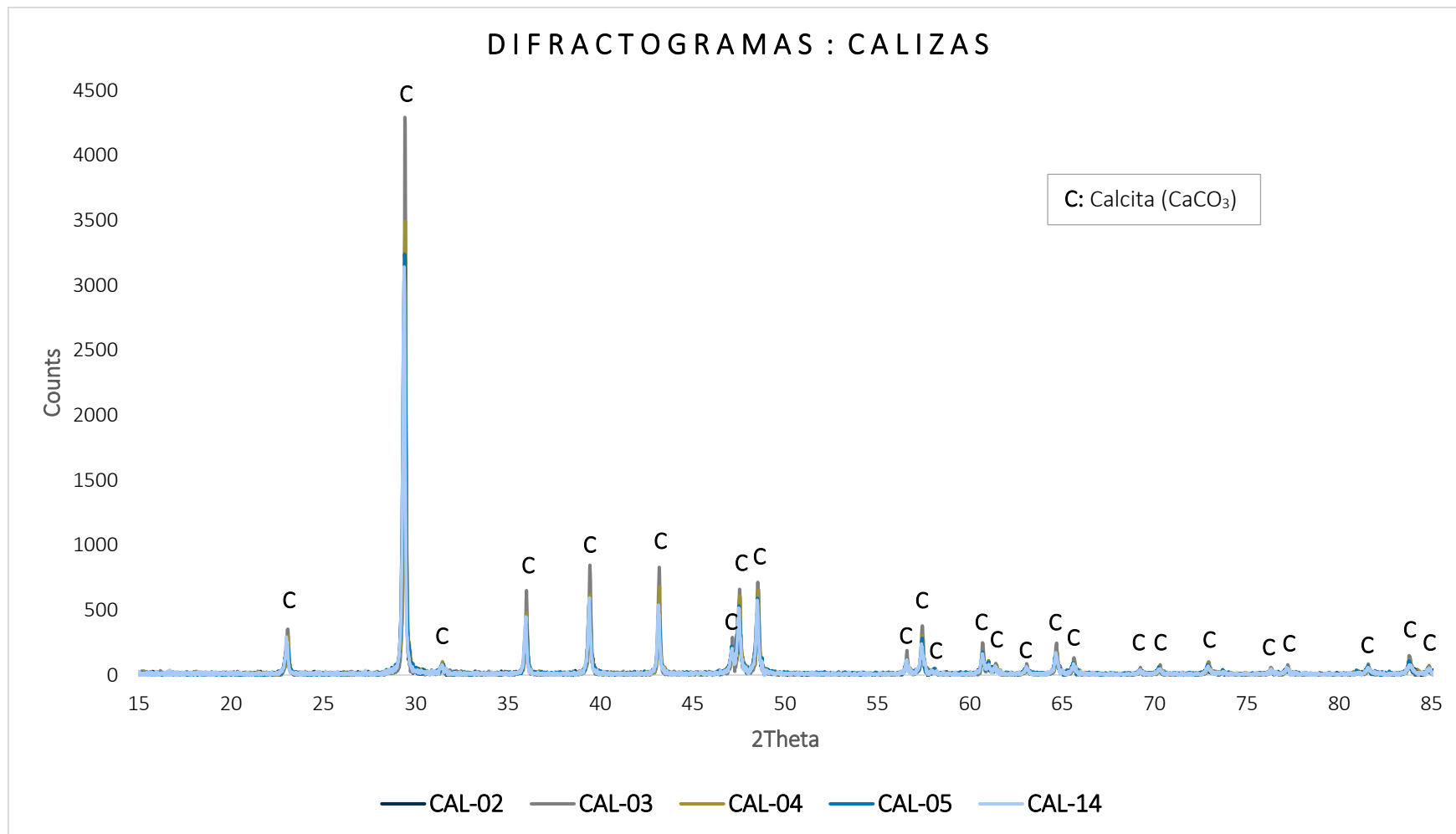


Figura 42. Difractogramas de muestras de rocas calizas.

DIFRACTOGRAMAS : BRECHAS CALCÁREAS

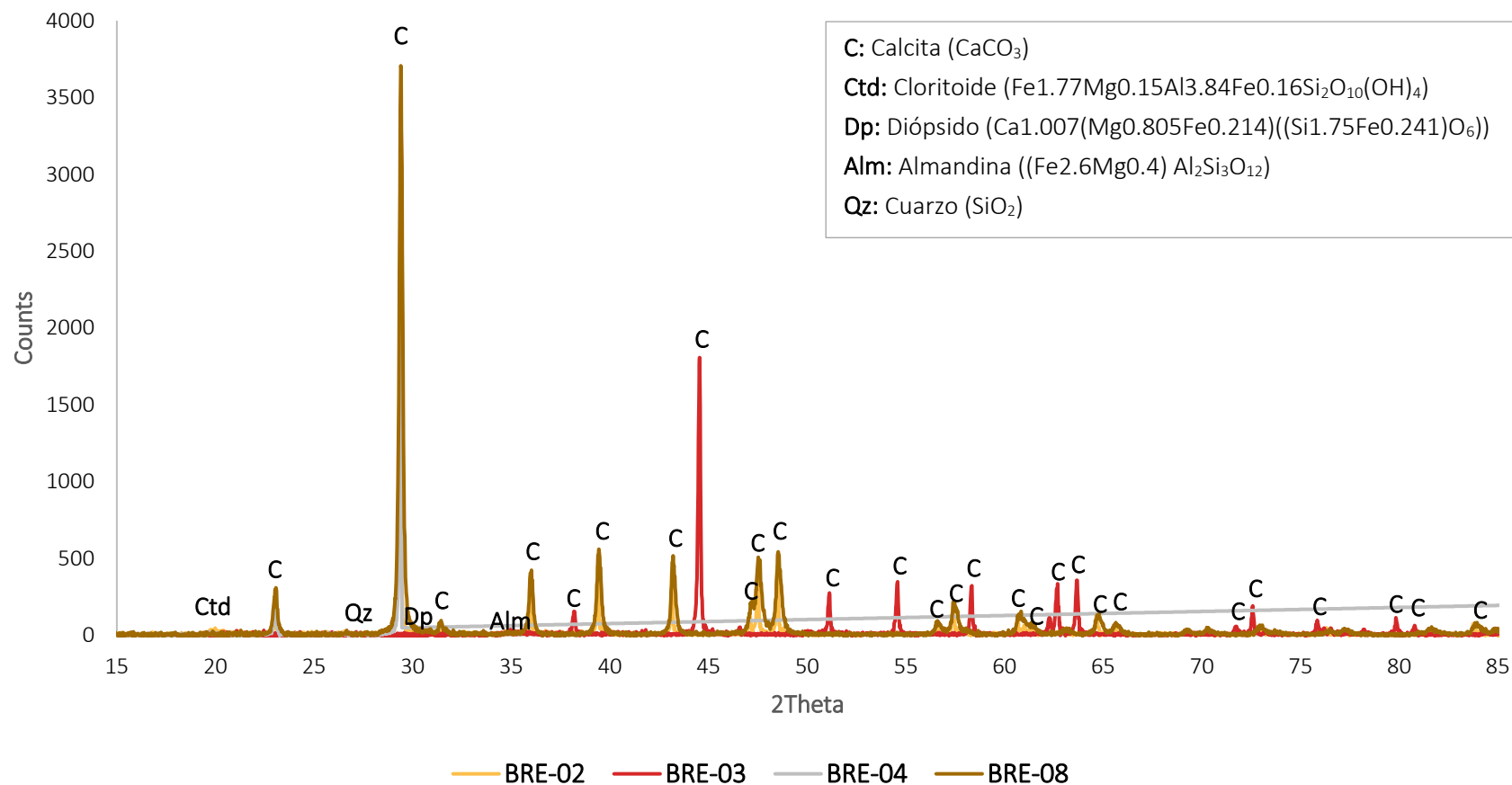


Figura 43. Difractogramas de muestras de brechas calcáreas.

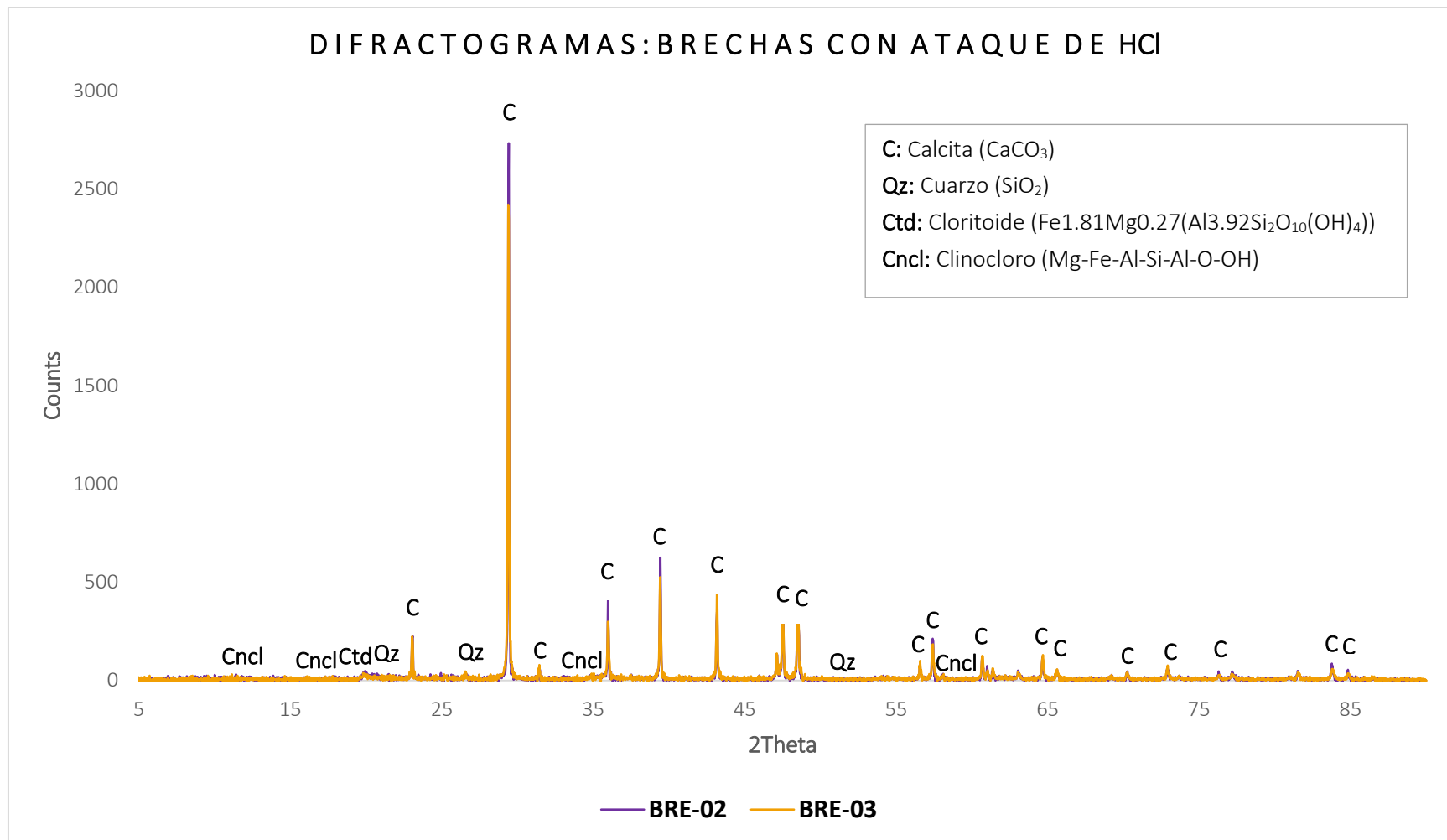


Figura 44. Difractogramas de brechas calcáreas con ataque de HCl.

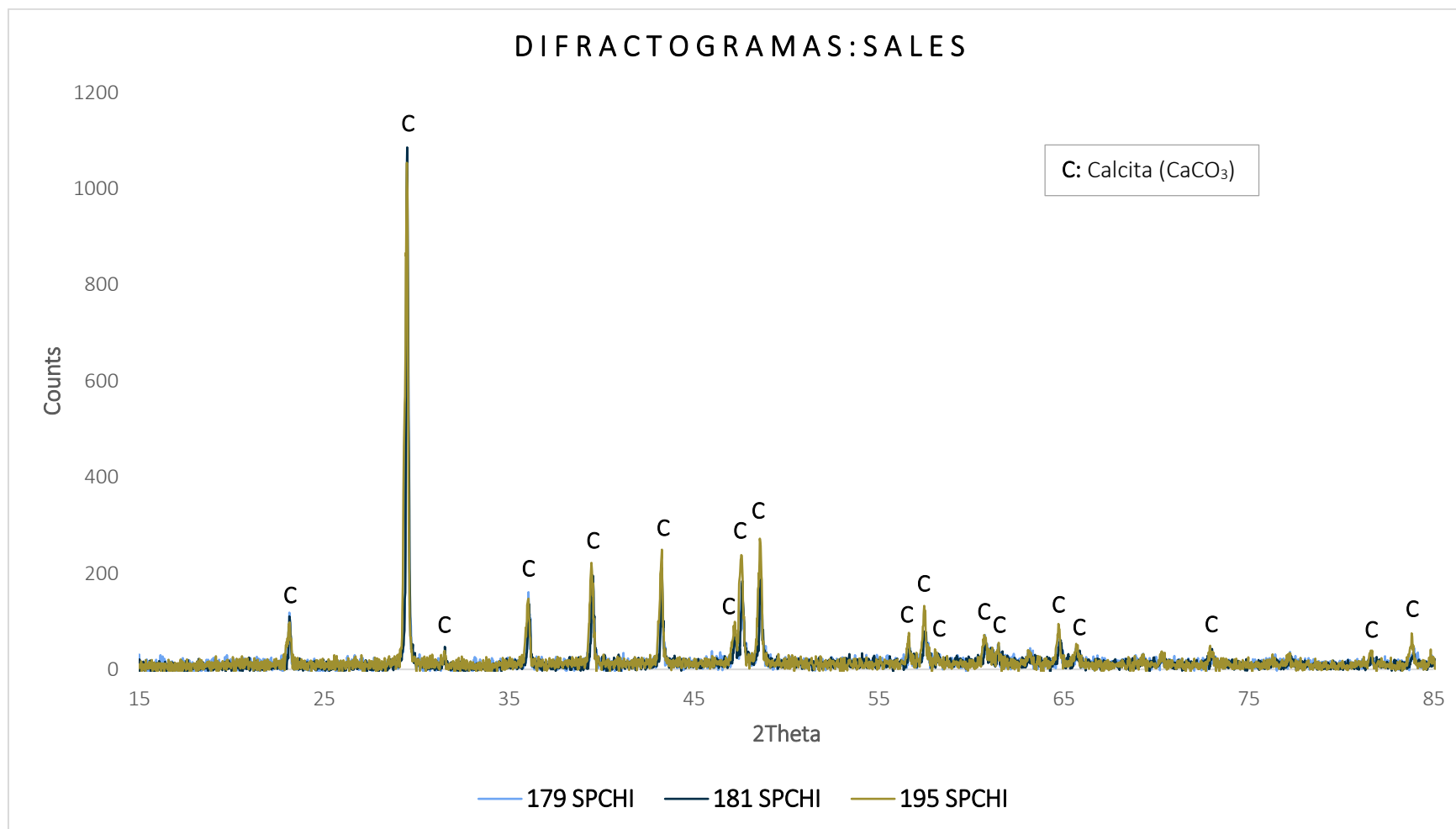


Figura 45. Difractogramas de muestras de sales del Templo Norte.

4.6 Petrografía y análisis de microfacies

Se elaboraron fichas de descripción para cada una de las 19 láminas delgadas analizadas (CAL-01, CAL-02, CAL-03, CAL-04, CAL-05, CAL-10, CAL-15, CAL-16, CAL-17, CAL-19, CAL-20, CAL-21, BRE-02, BRE-03, BRE-04, BRE-05, BRE-06, BRE-10 y BRE-11) donde se indica lo encontrado al observarlas al microscopio como las características de su masa básica y componentes, su clasificación según las pautas de Folk y Dunham y posible ambiente de depósito. Estos reportes se adjuntan en el capítulo de anexos para proporcionar una información más detallada y la información resumida se adjunta en la Tabla 13.

Al realizar la clasificación de Dunham (1962) de cada una de las láminas se determinó que las muestras de brechas calcáreas son en su mayoría floatstones, solo se identificó una wackestone. En cuanto a las rocas calizas los resultados fueron más variados, se observó la presencia de grainstones de foraminíferos (Figura 46 E), packstones, wackestones y bindstones.

Entre los componentes de las calizas se observó la presencia de foraminíferos bentónicos, concretamente orbitolinas de las especies *fallotella causae* Berlanga y *pseudofallotella drobneae* n.sp. (Vicedo et al., 2014)(Figura 46 A); además se encontraron foraminíferos miliólidos (Figura 46 B), uniseriales y biseriales (Figura 46 C y D), también se detectan algas, restos de bivalvos y algunos *birdeyes* rellenos de yeso (Figura 46 F).

Por otro lado, varias de las brechas presentaron una matriz peloidal y entre sus componentes se percibieron minerales de color rojo (Figura 47 A), algunos ooides (Figura 47 E) restos de bivalvos (Figura 47 B) y macrofósiles de gasterópodos (Figura 47 C), además se observaron clastos de mudstone, packstone y grainstone (Figura 47 D y F).

Se cotejó la información recabada con los diagramas de zonas de microfacies estándar (SMF) y de rampa (RMF) elaborados por Flügel (2010:721-722), modificados de Wilson (1975). La mayoría de las muestras se pueden clasificar dentro de una plataforma o rampa interior (BRE-02, BRE-03, BRE-04, BRE-05, BRE-06, BRE-10, BRE-11, CAL-01, CAL-02, CAL-03, CAL-04, CAL-10, CAL-15, CAL-16, CAL-17, CAL-19, CAL-20, CAL-21) con excepción de CAL-05 (Figura 48).

Los sedimentos de rampa interior son estratificados y forman secuencias delgadas e irregulares, se pueden encontrar wackestones, packstones y grainstones bioclásticas, además de boundstones con algas coralinas (Flügel, 2010:719). De igual manera, los carbonatos de zonas marinas poco profundas tropicales y subtropicales suelen consistir en lodo carbonatado y varios granos (material biogénico, peloides, ooides, litoclastos e intraclastos) (Flügel, 2010:36).

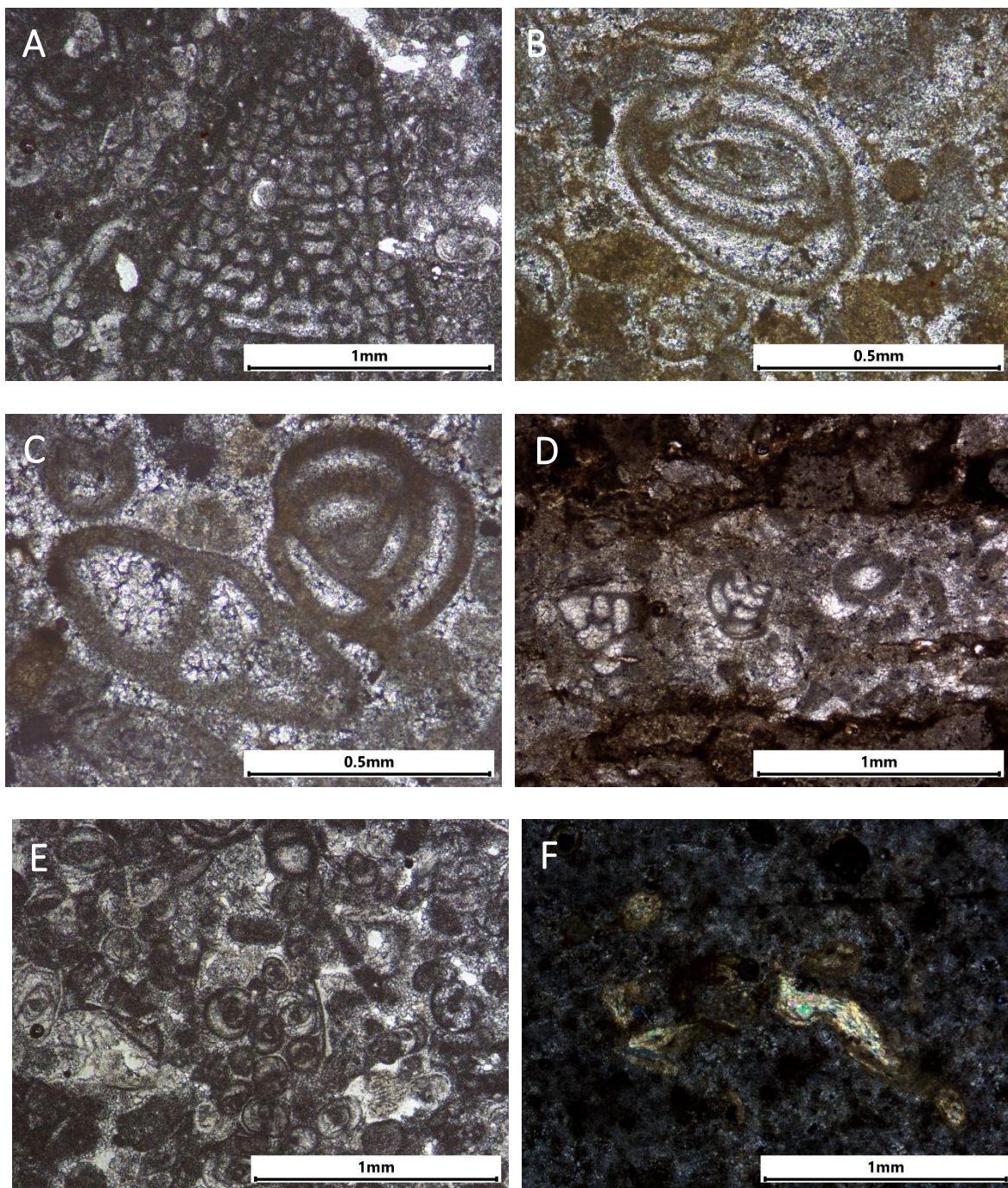


Figura 46. A) Orbitolina en muestra CAL-04; B) Foraminífero miliólido en muestra CAL-01; C) Foraminífero uniserial y foraminífero miliólido en muestra CAL-01; D) Foraminíferos biseriales en muestra CAL-02; E) Grainstone de foraminíferos (CAL-04); F) Birdeye en muestra CAL-21.

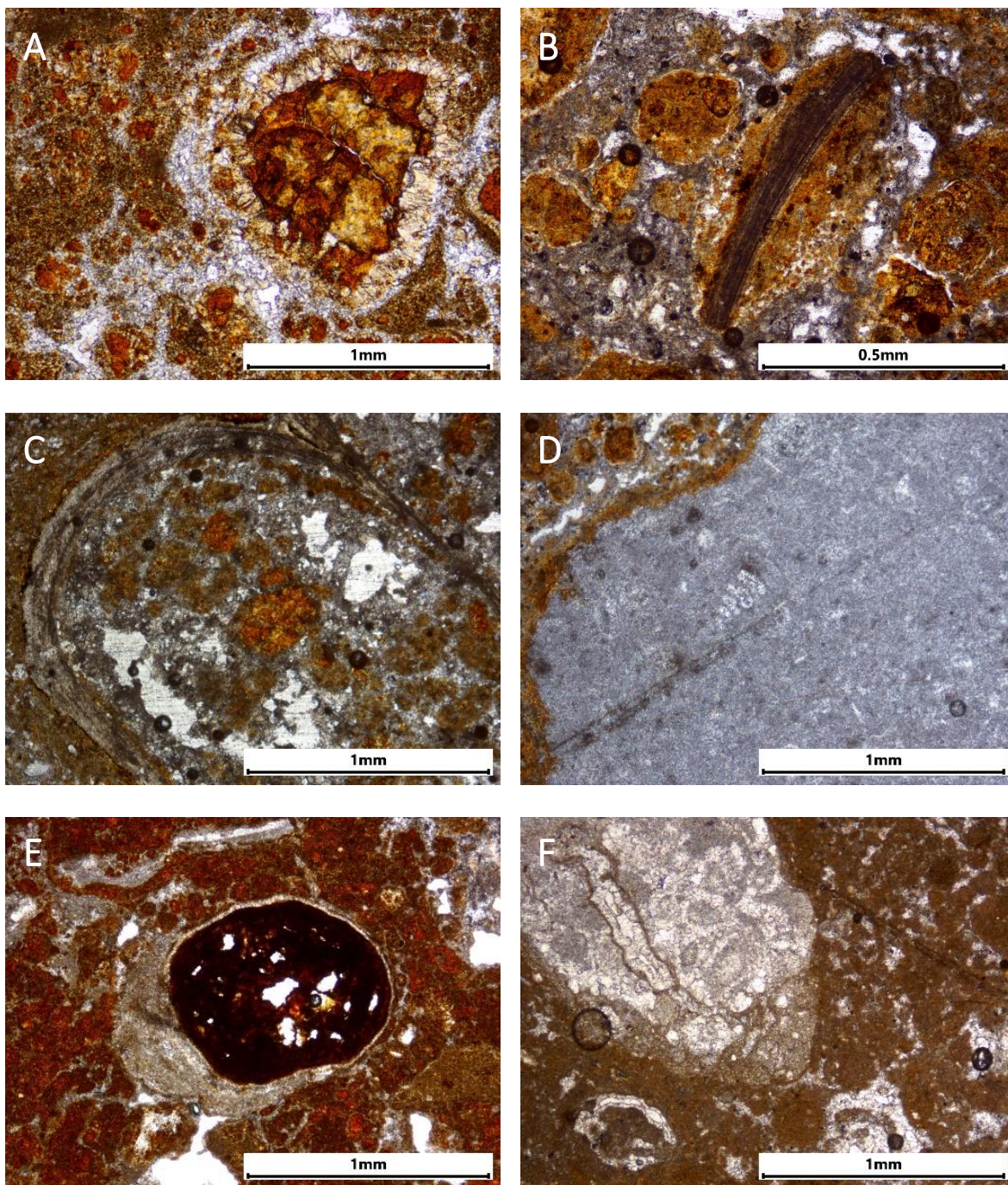
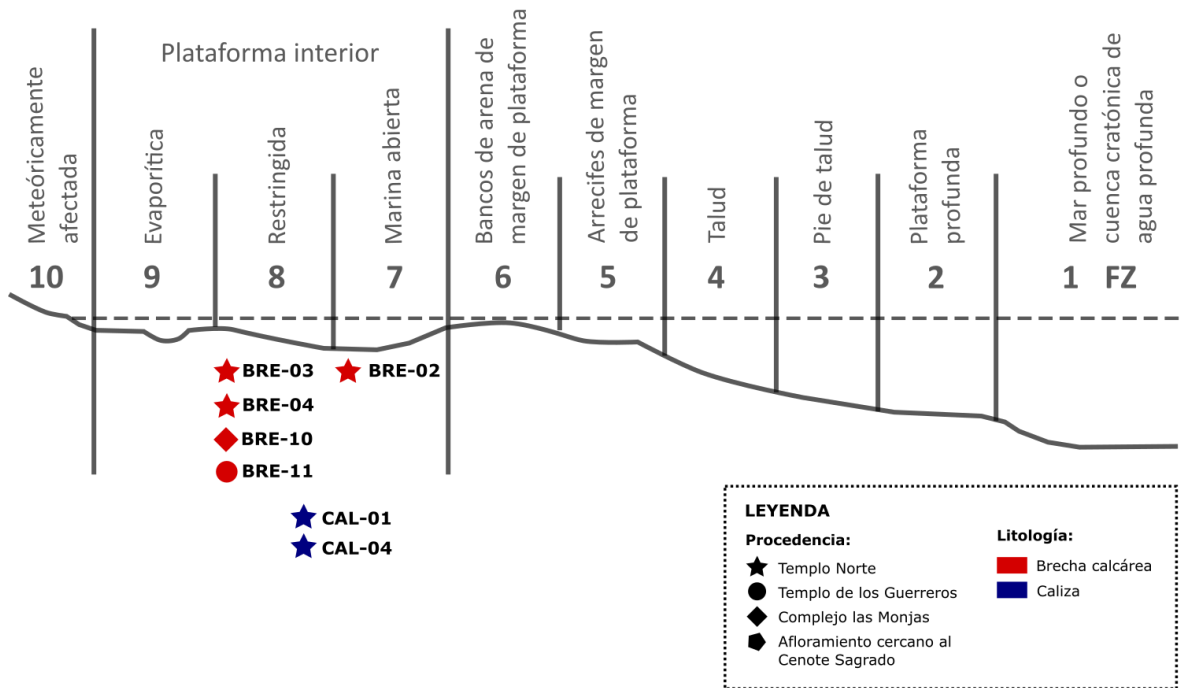


Figura 47. A) Mineral rojo rodeado de calcita en muestra BRE-02; B) Resto de bivalvo en muestra BRE-03; C) Fragmento de gasterópodo en muestra BRE-04; D) Intraclasto de mudstone con un foraminífero uniserial dentro en muestra BRE-03; E) Ooide en muestra BRE-02; F) Intraclasto de grainstone en muestra BRE-11.

TIPOS DE MICROFACIES ESTÁNDAR (SMF)



TIPOS DE MICROFACIES DE RAMPA (RMF)

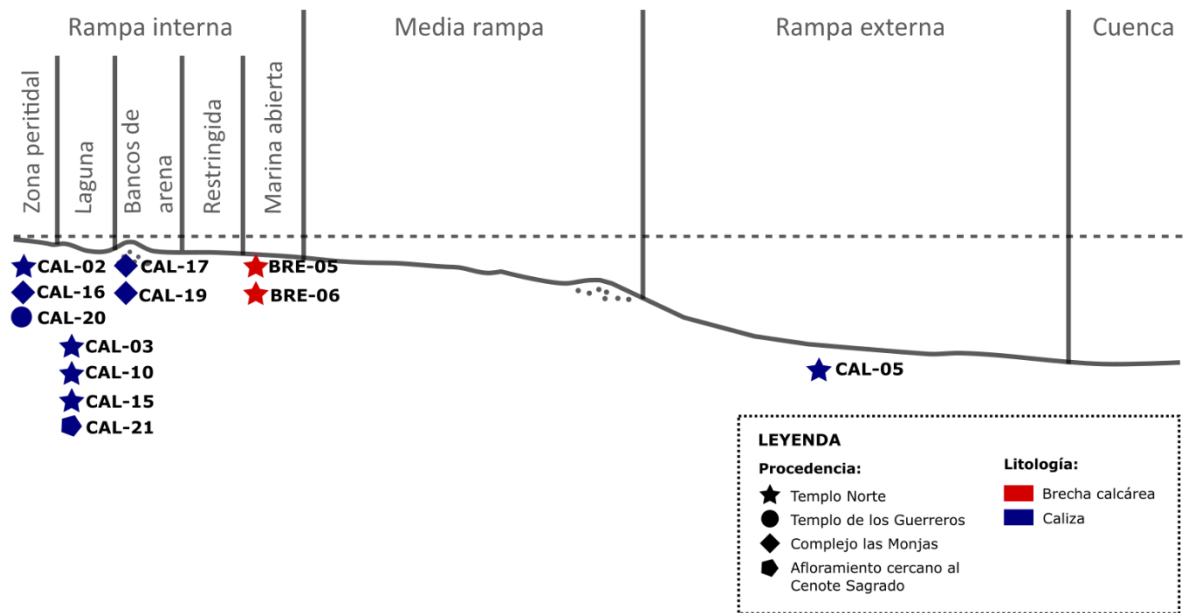


Figura 48. Cinturones de facies estándar de las láminas delgadas de roca de la zona arqueológica de Chichén Itzá, modificados de Flügel (2010:721-722).

Tabla 13. Resumen de análisis de facies y porosidad de las muestras del Templo Norte de Chichén Itzá.

MUES- TRA	MASA BÁSICA (%)	COMPO- NENTES (%)	POROSI- DAD (%)	CLASIFICACIÓN DE DUNHAM	AMBIENTE DE DEPÓSITO	
					SMF	RMF
CALIZAS						
CAL-01	40	60	15.30	Grainstone de foraminíferos	18 Plataforma interior restringida o abierta marina	
CAL-02	70	30	25.59	Bindstone		23 Zona peritidal
CAL-03	85	15	13.35	Wackestone de foraminíferos		20 Laguna
CAL-04	30	70	11.95	Grainstone de foraminíferos	18 Plataforma interior restringida o abierta marina	
CAL-05	80	20	12.31	Wackestone		4 Rampa externa
CAL-10	80	20	9.86	Packstone		20 Laguna
CAL-15	85	15	13.12	Wackestone		20 Laguna
CAL-16	65	35	16.54	Wackestone		24 Zona peritidal
CAL-17	40	60	11.85	Grainstone de foraminíferos		26 Banco de arenas
CAL-19	30	70	17.97	Grainstone de foraminíferos		26 Banco de arenas
CAL-21	90	10	8.61	Wackestone		20 Laguna
CAL-20	85	15	15.94	Bindstone		23 Zona peritidal
BRECHAS						
BRE-02	90	10	9.43	Wackestone	8 Plataforma interior marina abierta	
BRE-03	70	30	20.94	Floatstone	24 Plataforma interior restringida	
BRE-04	25	75	4.77	Floatstone	24 Plataforma interior restringida	
BRE-05	90	10	25.05	Floatstone		15 Rampa interna marina abierta
BRE-06	90	10	22.18	Floatstone		15 Rampa interna marina abierta
BRE-10	70	30	-	Floatstone	24 Plataforma interior restringida	
BRE-11	75	25	7.27	Floatstone	24 Plataforma interior restringida	

Además de las microfacies, se realizó un estudio de poros, observando su longitud, forma y tipo según la clasificación de Choquette y Pray (1970). Aparte, se ordenaron de mayor a menor valor los resultados obtenidos en la prueba petrofísica de porosidad y se separaron las muestras con las que se contaba con lámina delgada con la finalidad de realizar una correlación sobre el porcentaje de absorción y la forma y distribución de los poros (Tabla 14).

Acorde a Flügel (2010), la porosidad de las rocas sedimentarias puede dividirse en dos grupos, la primaria, que se forma durante antes y durante el depósito de sedimentos que forman el material pétreo y la secundaria, creada después del depósito durante los procesos de diagénesis que implican disoluciones, dolomitización y fracturas.

Los tipos de porosidad que se encontraron fueron los siguientes, las definiciones se extrajeron de las publicaciones de Flügel (2010:280-281) y Scholle (2003).

- Fenestral: porosidad primaria, poros alargados que se generan por unión de granos, formación de burbujas de gas debido a la descomposición de materia orgánica o actividad biológica. Se asocia a zonas peritidales.
- Inter cristalina: se forman entre cristales de más o menos igual tamaño, se relacionan a procesos de recristalización y dolomitización. Puede llegar a ser imposible observarla adecuadamente con un microscopio estándar.
- Interpartícula: porosidad primaria, se refiere a las aberturas entre partículas o granos esqueléticos, está asociada con permeabilidades más altas debido a las conexiones que se crean entre los poros.
- Intrapartícula: porosidad primaria, se forma por las cámaras que componen los granos esqueléticos.
- Mólida: porosidad secundaria, se genera a través de la disolución selectiva de bioclastos u ooides.
- Fractura: porosidad secundaria, su origen es debido a la rotura de las rocas, conecta poros que de otra manera estarían aislados, por ello tienen una gran importancia para la permeabilidad de la roca.

Se encontró que las características de los poros juegan un papel fundamental en la absorción de agua de las rocas. Por ejemplo, en la Figura 49 A puede observarse la muestra BRE-06, una de las de mayor porcentaje de absorción de agua, presenta porosidad fenestral, los poros son alargados y de mayor tamaño en contraposición a los de la muestra BRE-04 (Figura 49 B) la menos porosa de las rocas analizadas, los cuales son pequeños y de formas irregulares.

Así pues, se puede concluir que la permeabilidad de las rocas calizas se ve fuertemente asociada a la longitud y tipo de poro. En el acomodo y análisis de las imágenes al microscopio, se puede deducir que la porosidad fenestral e

interpartícula generan una mayor permeabilidad al conectar un mayor volumen de poros.

Las propiedades fisicoquímicas de las calizas están controladas por procesos de sedimentación y diagénesis (May, 1994), esta última ocasiona la disminución o ampliación de los poros por cementación de calcita (Figura 49 C). Además, los deterioros de la roca también pueden influir en generar mayor conexión entre los poros o agrandar los preexistentes, por ejemplo, en el caso de la muestra CAL-03 (Figura 49 D) que presenta alveolización, se puede notar al microscopio que en varias zonas se ha perdido material, dejando atrás huecos amplios (*vugs*), esto puede ser causado por disolución del material al estar expuesto a la intemperie (Flügel, 2010).

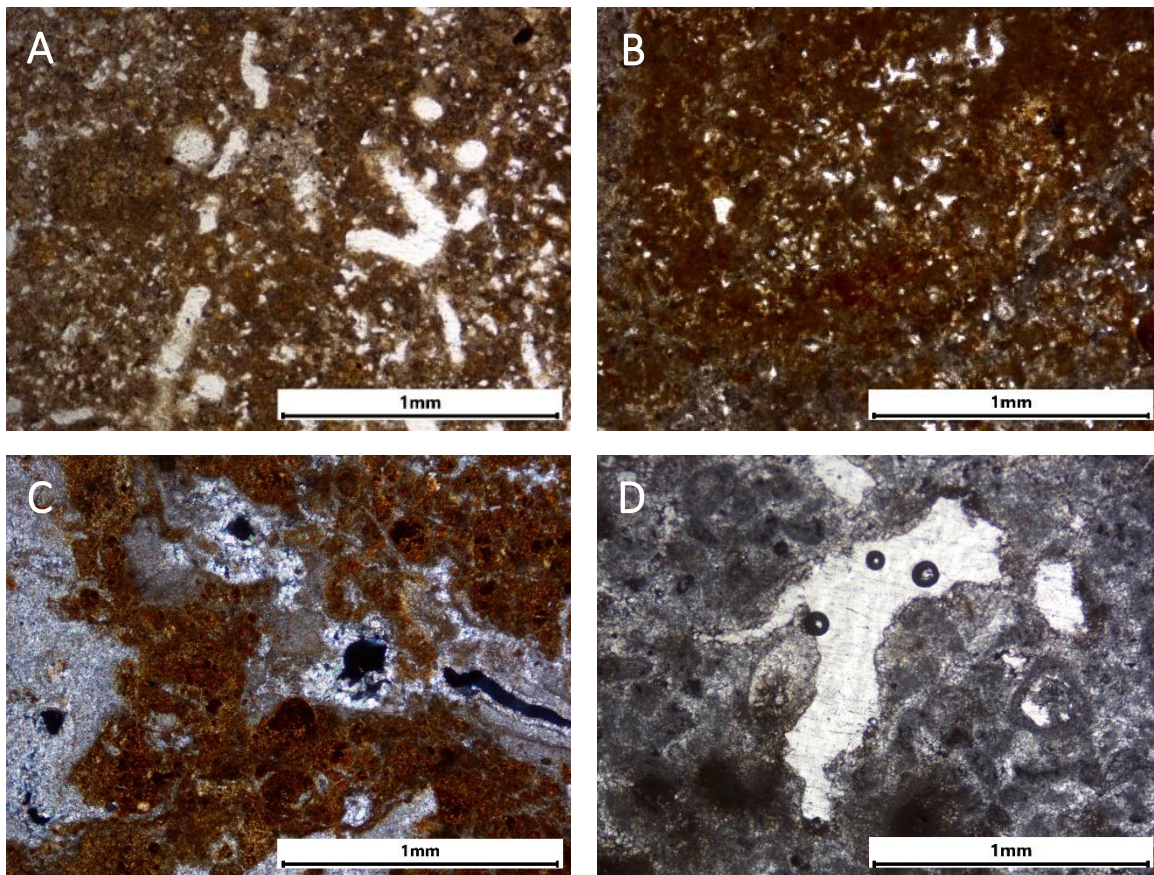
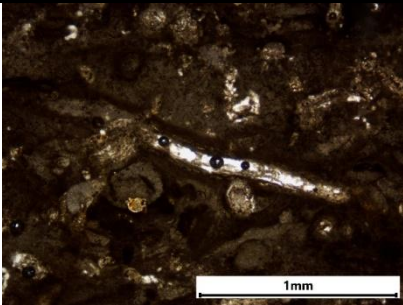
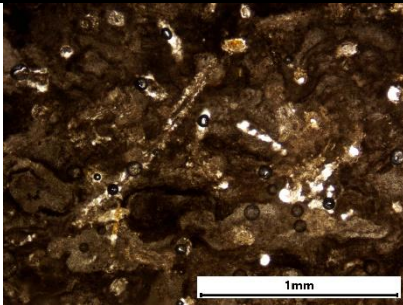
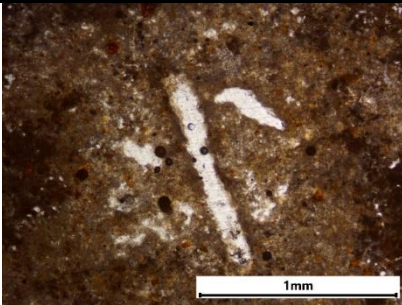
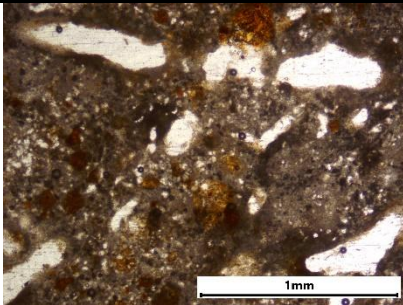
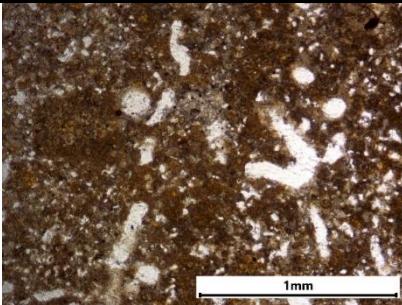
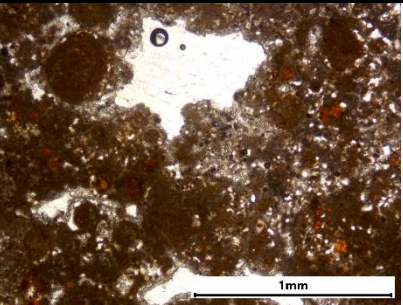
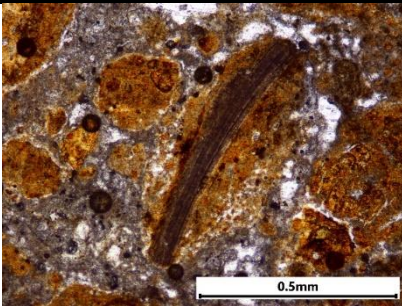
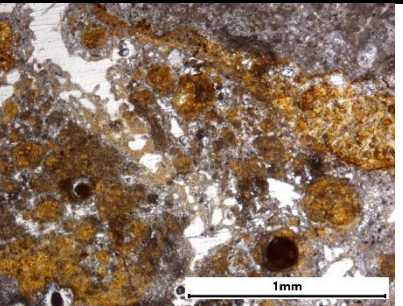
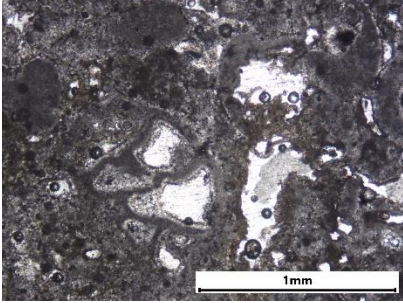
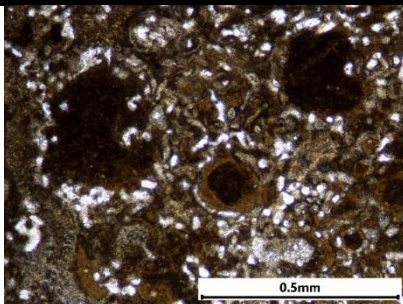
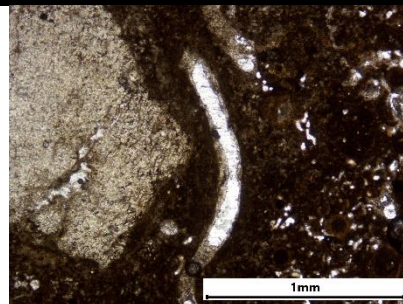
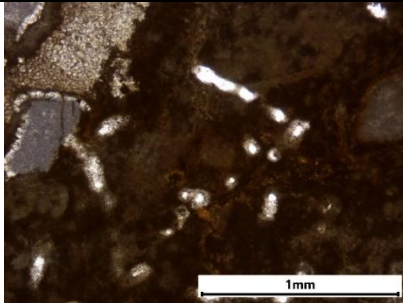
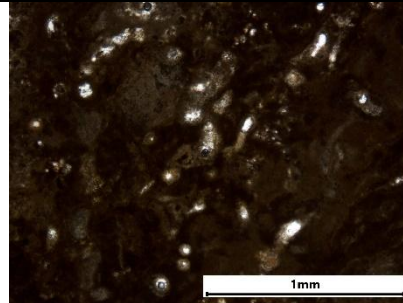
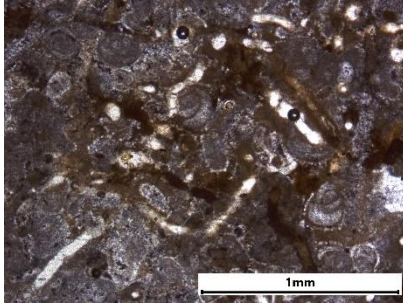
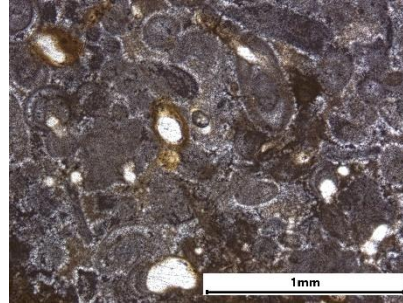
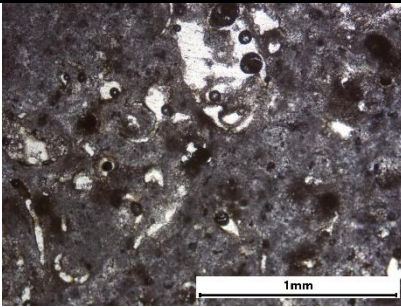
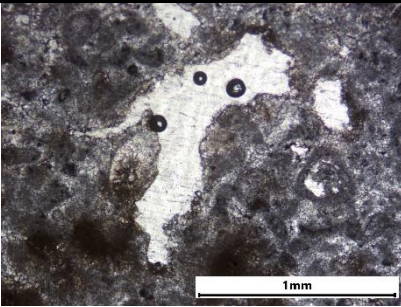
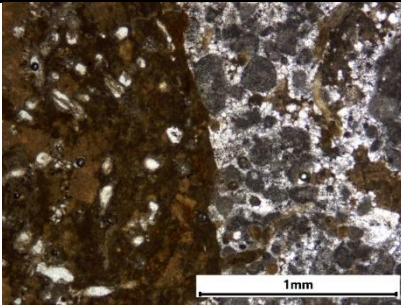
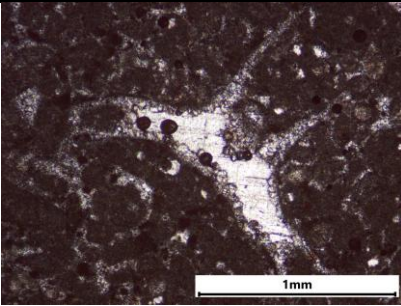
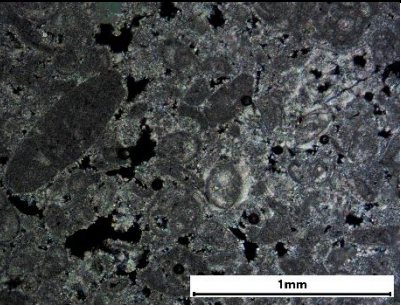
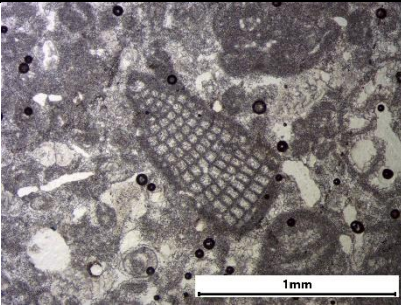
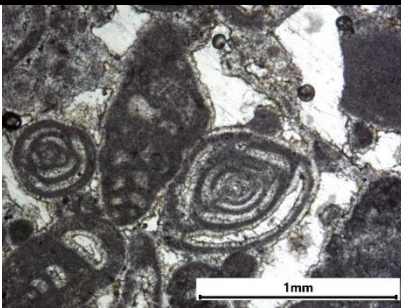


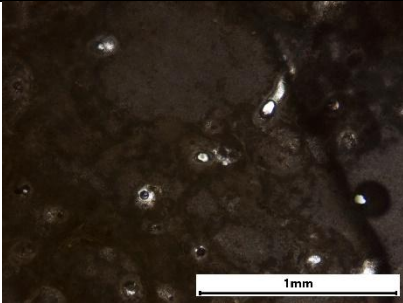
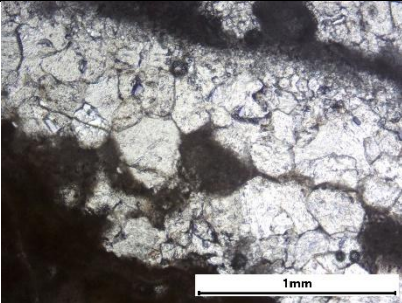
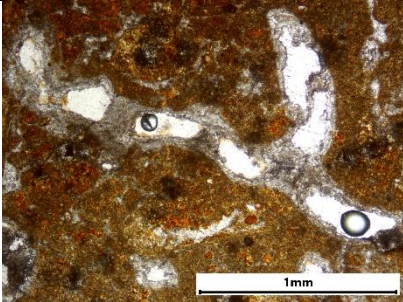
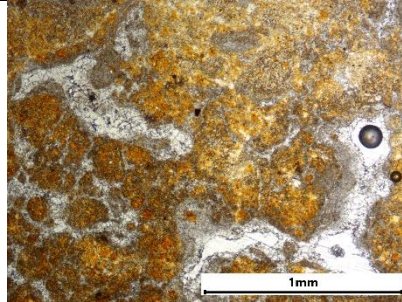
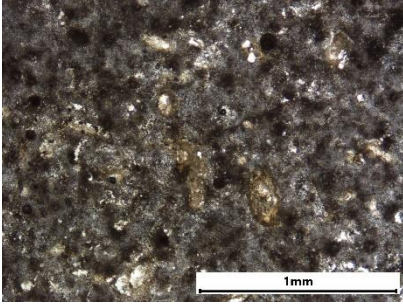
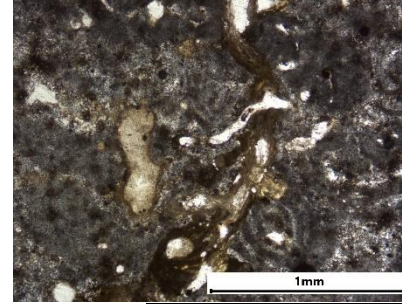
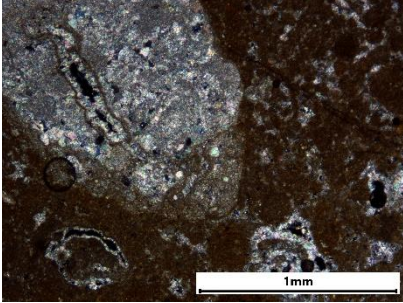
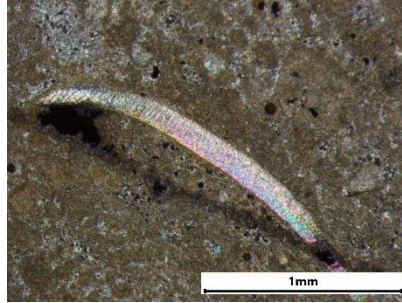
Figura 49. A) Porosidad fenestral en muestra BRE-06, B) Porosidad intercristalina en muestra BRE-04, C) Poros interpartícula reducidos por cementación en muestra BRE-02 y D) 'Vug' ocasionado por disolución en muestra CAL-03.

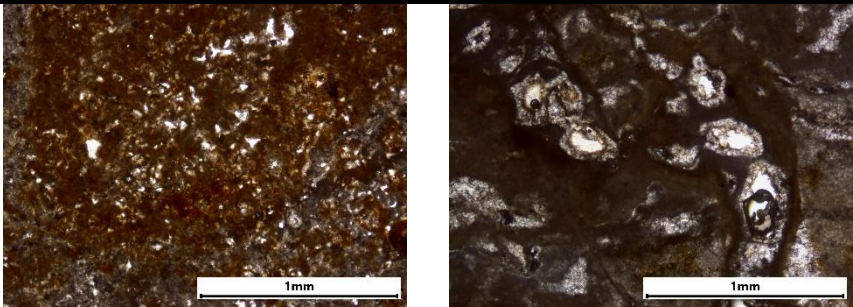
Tabla 14. Tipo y porcentaje de porosidad, absorción de agua e imágenes al microscopio de muestras del Templo Norte de Chichén Itzá.

		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Fenestral	13.12	25.59
CAL-02	Bindstone/Biomicrita			
		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Fenestral	12.62	25.05
BRE-05	Floatstone/Biomicrudita			
		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Fenestral e intercrystalina	10.77	22.18
BRE-06	Floatstone/Biomicrudita			
		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Interpartícula, fractura (en los clastos)	10.00	20.94
BRE-03	Floatstone/Biomicrudita			

		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Interpartícula e intrapartícula	8.22	17.97
CAL-19	Grainstone de foraminíferos/Bioesparita			
		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Fractura en clastos, móldica (reducida por cementación) e interpartícula	7.62	16.54
CAL-16	Wackestone/Biomicrocrítica			
		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Interpartícula y fenestral (reducida por cementación)	7.15	15.94
CAL-20	Bindstone/Biomicrocrítica			
		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Fenestral e interpartícula	6.73	15.30
CAL-01	Grainstone de foraminíferos/Bioesparita			

		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Fenestral, interpartícula e intrapartícula	5.77	13.35
CAL-03	Wackestone de foraminíferos/Biomicrita			
		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Móldica, intrapartícula e interpartícula (reducidas por cementación)	5.26	12.31
CAL-05	Wackestone/Biopelmicrita			
		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Fenestral (reducida por cementación), intrapartícula, interpartícula e intercrystalina	5.10	11.95
CAL-04	Grainstone de foraminíferos/Bioesparita			
		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Intrapartícula e interpartícula	5.03	11.85
CAL-17	Grainstone de foraminíferos/Bioesparita			

		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Inter cristalina	4.05	9.86
CAL-10	Packstone/Biomicro			
		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Fenestral, interpartícula (reducidos por cementación) y por fractura	3.92	9.43
BRE-02	Wackestone/Biomicro			
		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Fenestral e interpartícula	3.54	8.61
CAL-21	Wackestone/Biomicro			
		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Intrapartícula (reducida por cementación) e interpartícula	3.00	7.27
BRE-11	Floatstone/Biomicro			

		Tipo de porosidad:	Abs. de agua [Gew. %]:	Porosidad efectiva [%]:
		Interpartícula, por fractura (reducidas por cementación) e intercristalina	1.92	4.77
BRE-04	Floatstone/Biomicrodita			

5. LOS EFECTOS DE LOS FACTORES EXTERNOS Y LA TEXTURA Y COMPOSICIÓN DE LA ROCA CALIZA EN LA CONSERVACIÓN DEL TEMPLO NORTE DE CHICHÉN ITZÁ

El siguiente capítulo presenta una relación entre los resultados obtenidos en las técnicas analíticas, trabajo de campo y gabinete, con la finalidad de obtener conclusiones que ayuden a comprender los procesos de degradación de las rocas calizas pertenecientes a los sillares Templo Norte del Gran Juego de Pelota de Chichén Itzá.

5.1 Humedad, porosidad y permeabilidad

La presencia de agua en forma de precipitación, condensación o evaporación es un agente importante en cuanto a la degradación de material pétreo, esta ingresa por medio de los poros o intersticios y puede acarrear otras sustancias como sales o contaminantes (Coremans, 1969:37-39). Por otro lado, la distribución, tamaño, forma, tipo y textura deposicional de las rocas afectan su porosidad y permeabilidad, estos a su vez son responsables de la capacidad de almacenamiento de agua y gases (Flügel, 2010:897). Es por esta razón que se hizo especial observación en los resultados de la porosidad, absorción de agua, capilaridad, dilatación hídrica y análisis microfacial de las muestras.

En el experimento de expansión hídrica ninguna de las calizas cambió su dimensión al sumergirlas en agua y solo dos de las cuatro brechas analizadas sí lo hicieron, la muestra BRE-03 se expandió 0.29 mm/m al terminar el experimento (180 minutos) y el prisma BRE-05, 0.24 mm/m. En la prueba de capilaridad las muestras de caliza y una de brecha (BRE-06) absorbieron agua rápidamente pero el peso quedó estático después del minuto 1 a 3 de haber iniciado el experimento; en el caso de la muestra BRE-05 el agua ascendió más lentamente por el material, aumentando todavía hasta el minuto 36. Esto puede indicar que, en lo general, la litología de brecha calcárea tiende a presentar una mayor porosidad y por lo tanto una alta permeabilidad.

La prueba de envejecimiento por explosión salina refuerza el hecho que las brechas calcáreas son más susceptibles al deterioro pues la muestra analizada soportó 42 ciclos mientras que la caliza más del doble y sin haber concluido el experimento hasta su rotura. Cabe mencionar que frecuentemente la brecha presentó costras gruesas de sales al terminar cada periodo de secado, pero la caliza solo en contadas ocasiones mostró un velo delgado. Siegesmund y Dürrast (2011:113) reportan que en experimentos de explosión salina realizados anteriormente se ha observado que las rocas con valores de porosidad más altos son más sensibles a la cristalización de sales.

Ambas litologías presentaron una tendencia casi lineal a aumentar su absorción de agua mientras así lo hiciera la porosidad, sin embargo, resaltaron cuatro casos que

difieren de lo anterior, las muestras de CAL-02, BRE-04, BRE-11 y BRE-02. Esta observación sugirió que tal vez la susceptibilidad a la absorción de agua la define la forma y distribución de los poros de la roca y, al observar las muestras al microscopio en lámina delgada, se pudo concluir que efectivamente el tipo y forma de los poros juegan un papel importante en el transporte de agua en las rocas, especialmente aumenta la permeabilidad si presenta porosidad fenestral o interpartícula. De igual manera la diagénesis interfiere en agrandar o reducir los poros, pues la recristalización o cementación de calcita rellena estos espacios, mientras que las fracturas o disoluciones del mineral por intemperización, los agrandan. Siegesmund y Dürrast, p. (2011:109) incluso clasifican a la “porosidad de degradación” como un tipo de porosidad secundaria.

El incremento de la porosidad por intemperización se ve respaldado por las mediciones *in situ* de humedad de la cámara, pues se encontró que las calizas erosionadas podían presentar porcentajes de absorción iguales a los de una brecha.

Los registros termo-higrométricos *in situ* muestran que el porcentaje de humedad de los sillares disminuye por evaporación al aumentar la temperatura e insolación, por ejemplo, en la fachada norte la temperatura a las 8:00 am es de casi 30°C en promedio y la humedad de 0.30%, a las 2:00 pm aumenta el calor a 38.6 °C y la humedad disminuye a 0.05%, a las 6:30 pm la temperatura decrece a 31°C y la humedad acrecienta a 0.36%. Esto concuerda con lo dicho por Coremans (1969:37), indica que los valores máximos de humedad relativa suceden poco antes de salir el sol y los mínimos al inicio de la tarde, lo contrario ocurre con la temperatura.

Por otro lado, en las gráficas del capítulo de resultados se observa que en el interior del inmueble las brechas calcáreas y las calizas erosionadas presentan porcentajes mayores de humedad; por ejemplo, en el muro norte a las 6:30 pm la caliza deteriorada llega a una cantidad de 1.90% mientras que el bloque sano presenta uno de 0.75%. Los sillares de brecha en general tienden a retener más humedad sin importar la temperatura ni hora del día; en el muro oeste a las 2:00 pm el sillar sano de caliza está seco, por otro lado, el de brecha tiene un porcentaje de 0.46%. Este aumento de humedad puede deberse a que el interior recibe más sombra durante el día a comparación del exterior, además de que durante la época de lluvias la cámara tiende a almacenar más agua por los escurrimientos y encharcamientos en los muros y el suelo debido a la falta de la mitad sur de la bóveda.

En el exterior se encontró un comportamiento similar, los bloques de brecha también retienen mayor humedad en comparación a las calizas, como muestra, en la fachada sur a las 8:00 am el porcentaje del bloque de caliza dañado es de 0.40% y el de brecha de 0.61%, aunque en esta ocasión no necesariamente influye el estado de conservación del sillar, esto podría deberse a que las rocas del exterior no presentan tanta pérdida de material en comparación con las relativas a la cámara.

Los ciclos de humedad están relacionados con la aparición de deterioros como eflorescencias, alveolización y disgregación de material pétreo. La hidratación de sales ejerce un aumento de presión en el interior de los poros de la roca, lo que ocasiona roturas del material (Sneyers y Henau, 1969:230).

La alveolización es un tipo de erosión diferencial, se trata de uno de los daños más importantes que afectan a la cámara del Templo Norte y que ha ocasionado la pérdida de gran parte de los bajorrelieves. Alonso et al. (2013:119) señalan que sus causas principales son los aerosoles marinos reforzados por el viento, además que las rocas granulares y porosas son propicias a este deterioro. Torraca (2005:34) señala que la cristalización de sales juega un papel muy importante en la alveolización, explica que el mecanismo es el siguiente, el proceso de evaporación se da a tal velocidad que el agua contenida en los poros no alcanza a llegar a la superficie lo suficientemente rápido, por lo que el secado se lleva a cabo debajo de la superficie y no sobre ella, la evaporación conlleva un efecto de cristalización de sales (subflorescencias) y genera tensiones internas, por lo tanto, estos granos comienzan a disgregarse. El deterioro se ve progresivamente acelerado cuando se forma una cavidad pues la velocidad del viento se intensifica dentro de ellas así que se exacerba la evaporación. Este efecto del viento sobre los muros interiores del Templo Norte ya se ha reportado en los diagnósticos de conservación del sitio (García-Solís et al., 2006). La proveniencia de la sales puede explicarse por los morteros de cemento utilizados en las intervenciones anteriores ya que se evidenció la presencia de sulfatos en los exámenes elementales (altos niveles de S), particularmente en las muestras que provenían directamente de los muros del Templo Norte.

La humedad también ocasiona disolución de minerales y crea presión intergranular al cambiar de estado físico, lo que se traduce en disgregación de granos y partículas del material pétreo, esto se ve acentuado en rocas porosas (Alonso et al., 2013:123).

5.2 Erosión y su relación con las características de sedimentación

La textura heterogénea, la existencia de laminaciones y estratificaciones finas pueden ocasionar una menor resistencia al deterioro en rocas calizas, pues los patrones de erosión suelen seguir estos planos de depósito (Emmanuel y Levenson, 2014; Flügel, 2010:897; May, 1994).

Anteriormente Grimm (1990) realizó estudios sobre las rocas comúnmente utilizadas en monumentos alemanes, encontrando que las calizas soportadas por granos (*grain-supported*) pueden tener muy buena o muy baja resistencia a la degradación, esto se puede deber a las diferencias litológicas en la composición de la roca (por ejemplo, si existen otros sedimentos además del carbonato o tienen distintos grados de dureza), tamaños de grano, porosidad y disolución selectiva de bioclastos por su mineralogía (Flügel, 2010:897-898). Otra investigación de 1994

también llevada a cabo en Alemania encontró que las calizas bioclásticas, grano soportadas y con una alta cantidad de cemento esparítico son más resistentes a la degradación causada por procesos de congelamiento y derretimiento, mientras que el deterioro de facies de matriz micrítica es más alto (May, 1994). En 2014 también se analizaron procesos de degradación en las rocas carbonatadas del Muro de los Lamentos en Jerusalén, que respaldan la tendencia de las calizas de matriz micrítica a ser menos resistentes a la erosión, señalando que esto puede deberse a la rápida disolución a lo largo de los límites de los granos de calcita seguida por la separación de partículas de la superficie, dando a la superficie de los sillares una textura granular (Emmanuel y Levenson, 2014).

En las muestras de roca de Chichén Itzá puede observarse que en CAL-03 y CAL-19 que presentan erosión (ver Tabla 14), se percibe una pérdida selectiva de la matriz micrítica, lo que concuerda con los estudios anteriormente citados, mientras los microfósiles se mantienen conformando la estructura del material o bien, podría ocurrir que una vez que se debilita la matriz, los microfósiles y otros componentes se desprendan, esta erosión diferencial podría causar los patrones irregulares en la superficie de los sillares de los inmuebles.

5.3 Cambios de temperatura, luz del sol y expansión térmica

Las variaciones de temperatura son una de las mayores causas que influyen en las características intrínsecas de las rocas, alterando sus propiedades mecánicas al cambiar su microestructura (González-Gómez et al., 2015). En regiones tropicales ocurren grandes diferencias de temperatura a lo largo del día, estas modifican la humedad contenida en las rocas, la solubilidad de sales y gases y aceleran las reacciones químicas (Sneyers y Henau, 1969:229-230). En edificaciones también debe tomarse en cuenta que la expansión térmica puede cambiar la dimensión de altitud, longitud y grosor de piezas o sillares individuales que generan tensiones entre las rocas que conforman un inmueble (López-Doncel et al., 2018).

Los sillares de calizas y brechas del Templo Norte se encuentran sujetos a cambios de temperatura diariamente, condicionados a la irradiación solar. Las variaciones diurnas de temperatura, bruscas y pronunciadas como lo son en las zonas tropicales, resultan más perjudiciales para las rocas de construcción que las variaciones estacionales debido a su efecto acumulativo (Coremans, 1969:37). En las mediciones *in situ* se observa que el calor tiende a disminuir en las zonas sombreadas y cuando comienza a atardecer; por ejemplo, la fachada oeste, después de haber pasado alrededor de 3 horas bajo el sol, a las 2:00 pm presenta un promedio de temperatura de 42°C, mientras que la fachada este, a la misma hora tiene una media de 37°C ya que con el avance del día comienza a recibir sombra desde la 1:00 pm (ver Figura 50). Estas medidas se tomaron al inicio del tiempo de lluvias, pero se podría suponer su incremento en la época de secas que va de febrero a principios de mayo.

Las rocas son malos conductores de calor, por lo que las diferencias de las tensiones generadas entre ellas se acentúan (Sneyers y Henau, 1969:230), de igual manera, existe una discrepancia de temperaturas entre la superficie de la roca y sus capas profundas donde es más fría (a partir de 5 cm de profundidad) (Coremans, 1969:37; Torraca, 2005:25).

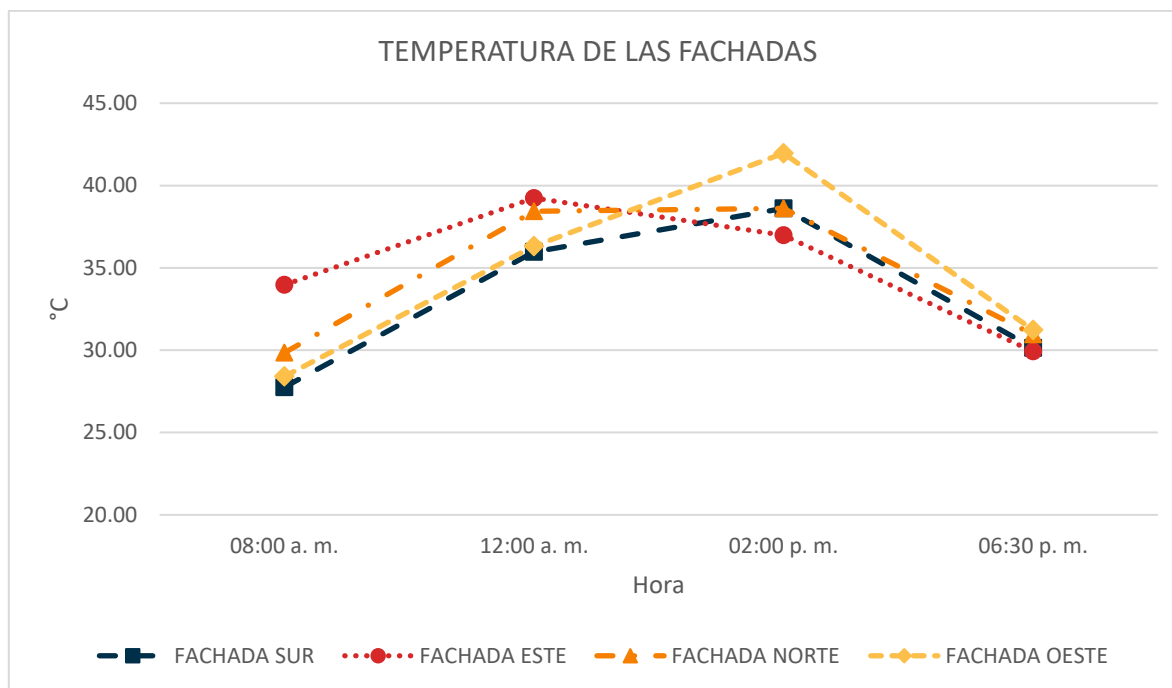


Figura 50. Temperaturas de las fachadas del Templo Norte durante el día.

Estos ciclos son una fuente de estrés interno porque las calizas y brechas se expanden al calentarse y se contraen al enfriarse (Torraca, 2005:25), sin regresar a sus dimensiones originales, como se observó en los experimentos de expansión térmica, donde las variaciones de longitud comenzaban a partir de los 40°C aproximadamente. Se llegó a cuantificar una expansión de hasta 3.86 mm/m en uno de los prismas de caliza (CAL-02) a los 200°C. La contracción de las muestras comenzaba a partir de disminuir la temperatura de la parrilla a alrededor de los 180°C.

Este comportamiento se explica debido al contenido de calcita de las rocas, que es el mineral que compone la mayor parte de las muestras de brechas y calizas, como se distingue en los análisis por DRX. La calcita es un mineral que presentan un alto coeficiente de expansión térmica, este cambia de acuerdo con la dirección del cristal, ya que se expande en uno de sus ejes y se contrae en el otro, esto genera tensión o separación entre los cristales (Torraca, 2005:27-28). De igual manera, debido a la presión, las moléculas de los cristales pueden deslizarse unas sobre otras para encontrar un nuevo equilibrio, lo que implica una deformación permanente del material (Sneyers y Henau, 1969:230).

El estrés resulta en grietas, fisuras, microfisuras, deformación del material pétreo y pérdida de cohesión, que conllevan a la larga una pérdida de material constituyente (González-Gómez et al., 2015; López-Doncel et al., 2018; Torraca, 2005:25-26). Con anterioridad, se han realizado estudios sobre calizas de la península de Yucatán, las muestras se trataron térmicamente y se realizaron experimentos de compresión, se concluyó que las rocas porosas disminuyen su resistencia mecánica entre más aumenta la temperatura del tratamiento térmico (González-Gómez et al., 2015).

Otro aspecto que considerar es el deterioro ocasionado por expansión térmica diferencial, este se presenta debido a las desigualdades entre coeficientes de expansión entre los materiales; el cemento, utilizado en una intervención anterior para resanar juntas, tiene un coeficiente de expansión casi dos veces mayor (0.3-0.4 mm/m) al de las calizas (0.15 mm/m); algo similar ocurre con el hierro (0.3 mm/m), empleado en las varillas del dintel de concreto armado sobre las columnas de la fachada principal del recinto. El resultado de estas tensiones internas es que el material más débil cede (la roca caliza), rompiéndose o deformándose (Torraca, 2005:28-29).

5.4 Composición geoquímica de las muestras de calizas y brechas

Como se mencionó anteriormente, no se tiene certeza sobre la identificación de los compuestos insolubles de las brechas calcáreas, sólo de la presencia de cuarzo, por ser un mineral común en la formación de rocas sedimentarias y carbonatadas (Barnoos et al., 2020), el resto se sospecha que podría ser clorita o algún tipo de arcilla. En un estudio del año 2010 sobre la composición de Calcisoles en humedales del noreste de la península de Yucatán se encontraron compuestos como la caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), bohemita (AlOOH) y gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) (Duda & Rejl, 1989:62,104,186; Solleiro-Rebolledo et al., 2011). También, en el 2014 se realizaron estudios sobre rocas provenientes de algunas canteras del estado de Yucatán donde se analizaron sus componentes con la técnica de DRX; además de un alto contenido de calcita, se encontró cuarzo, arcillas como la tosudita ($\text{Na}_{0.5}(\text{Al},\text{Mg})_6(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{18}(\text{OH})_{12}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$), caolinita, montmorillonita ($\text{Ca}_{0.2}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$), y otros minerales como la anatasa (TiO_2), ortoclasa (KAlSi_3O_8), goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$) y hematita (Fe_2O_3) (González-Gómez et al., 2015). Con esta información presente, no se descarta la posibilidad de encontrar minerales similares en las muestras de Chichén Itzá, una vez que se elimine correctamente el contenido de calcita.

Es importante agregar que la heterogeneidad de las rocas, como los compuestos no carbonatados e insolubles, pueden reducir la resistencia a la degradación de las calizas (May, 1994; Varti-Matarangas y Matarangas, 2000). Además, si estos minerales son arcillas, logran disminuir la resistencia física de las calizas y tienden a aumentar de volumen con la presencia de agua y “lavarse” creando huecos; los cambios diarios y estacionales de la humedad pueden inducir tensiones dentro de

la estructura de las rocas, generando fracturas, fisuras y desprendimientos (Barnoos et al., 2020; Varti-Matarangas y Matarangas, 2000).

En cuanto al alto contenido de azufre de las muestras del Templo Norte, las rocas porosas pueden contaminarse con sales solubles como los sulfatos por medio de distintas fuentes, por ejemplo, contaminación atmosférica, aerosoles marinos, deyecciones de animales, por ascensión capilar de agua subterránea o a nivel del suelo y por algunos materiales de construcción o aditivos (Kloppmann et al., 2011; Rösch et al., 1993). Este último es la fuente más probable de las muestras del Templo Norte, debido a localización del inmueble, el deterioro presente y a la utilización de cemento como consolidante en la restauración de mediados del siglo XX; estudios anteriores han señalado que los morteros empleados en intervenciones solían contener yeso, del cual provienen los sulfatos que contribuyen a desintegrar las rocas circundantes al lugar de su aplicación, especialmente si se trata de calizas porosas (Kloppmann et al., 2011). Un caso análogo es una investigación del año 2020 sobre los mecanismos de deterioro en las rocas carbonatadas del Templo de Anahita en Kangavar, Irán, donde se describe que se llevaron a cabo intervenciones en el pasado donde se empleó cemento como consolidante, resultando en un mayor deterioro de los sillares debido al aporte de sales solubles y a procesos de encogimiento del material (Barnoos et al., 2020).

5.5 Actividad biológica

El clima tropical y subhúmedo de la Península de Yucatán favorece el crecimiento de microorganismos, vegetación y la proliferación de fauna local, esto se ve reflejado en los muros del Templo Norte, donde en determinadas zonas se observan organismos vegetales y anidación de avispas. Las criptógamas encuentran sus condiciones óptimas para proliferar a temperaturas entre 25 a 30°C y humedad relativa de 70% o más (Coremans, 1969:36). Esta actividad biológica genera alteraciones estéticas y reacciones químicas que dañan la superficie de las rocas.

Los microorganismos producen ácidos orgánicos (ej. ácido oxálico) como producto de su metabolismo lo que favorece la formación de nuevos minerales, como la precipitación de oxalatos al reaccionar los ácidos con el carbonato de calcio de las calizas; estos ácidos también contribuyen a la disolución de otros minerales (González-Gómez et al., 2018; Torracca, 2005:51).

Por otro lado, la actividad biológica de cianobacterias, algas, hongos y líquenes generan presiones en la roca y favorecen la creación de sustratos para el crecimiento de otros organismos. Es frecuente encontrar líquenes en el exterior de los inmuebles y en ambientes poco contaminados, lo que se ve reflejado en el registro de deterioros del Templo Norte, donde los líquenes proliferan mayormente en las fachadas.

En 2018 el INAH llevó a cabo un análisis sobre las biopelículas que se encuentran en algunos de los monumentos de Chichén Itzá, entre ellos el Tzompantli y el Templo Inferior de Jaguares, ambos pertenecientes a la zona oeste de la Plataforma de la Gran Nivelación donde también se encuentra el Gran Juego de Pelota. En el estudio se identificaron los géneros de líquenes *Cryptothecia* sp. y *Lithothelium* sp.; en el Tzompantli la actividad metabólica de estos organismos ocasionó biomineralización de la superficie rocosa, se crearon oxalatos de calcio (wedellita y whewellita), este compuesto puede ocasionar pátinas de colores naranjas o marrones en calizas. Además, se identificaron cianobacterias de coloración oscura y algas anaranjadas conocidas como *Trentepohlia*, especialmente en áreas con menor exposición al sol y mayor humedad. La investigación resalta que la aparición, las características de las biopelículas y por lo tanto los productos resultantes de la biomineralización están determinados por la cantidad de irradiación solar que recibe el monumento (González-Gómez et al., 2018), encontrándose biopelículas más gruesas y con mayor adhesión a la roca en zonas que reciben más luz solar a lo largo del día con los índices de humedad adecuados (Alonso et al., 2013:133; González-Gómez et al., 2018; ICOMOS-ISCS, 2008:66 y 68).

Con base en la información anterior, se puede inferir que las mismas especies de cianobacterias, algas y líquenes están presentes en el Templo Norte, mientras que las biopelículas de coloración oscura (posiblemente cianobacterias) se ubican en zonas húmedas y que reciben poca irradiación solar, como los cantos inferiores de la mampostería de piedra bruta en los muros este y oeste. Las algas *Trentepohlia* se ubican principalmente en el exterior en las fachadas norte, oeste y este, la fachada sur al estar insolada constantemente durante el día y no tener vegetación cercana ocasiona que exista poca evidencia de algas y líquenes.

Es importante añadir que la colonización por microorganismos se localiza particularmente en rocas sin mayor deterioro aparente, alejándose de los sillares más erosionados, por ejemplo, en el muro norte de la cámara que exhibe una mayor pérdida material muestra pocos rastros de biopelícula, solo algunas áreas en la parte superior que se une con la bóveda. Lo anterior dicho puede explicarse debido a los agentes ambientales que ocasionan la erosión, como el viento o la cristalización de sales, que no permiten el depósito de microorganismos.

En adición, se identificó la presencia de musgo en el muro este sobre el canto superior de los sillares a aproximadamente 1.5 metros de altura, este organismo vegetal aparece en lugares frecuentemente húmedos y sombreados, en zonas horizontales, puede crear un sustrato fértil que favorezca la aparición de plantas superiores (Alonso et al., 2013:133; ICOMOS-ISCS, 2008:70). Se ha identificado que su crecimiento se ve favorecido por superficies alcalinas como las calizas y que aparece cerca de áreas donde se ha utilizado cemento para consolidación (Torraca, 2005:51).

Las plantas superiores en el Templo Norte se encuentran mayormente en el exterior y donde ha habido pérdidas en resanes de juntas, sus raíces se extienden e hinchan, en un fenómeno llamado turgescencia, pudiendo ampliar fracturas y generando presiones que pueden romper la caliza, también ayudan a mantener las áreas húmedas (ICOMOS-ISCS, 2008:74; Sneyers y Henau, 1969:231).

Con base en lo anteriormente discutido, se crearon matrices de deterioros, señalando el factor, agente, causa y mecanismo de cada deterioro encontrado en el registro de conservación del Templo Norte de Chichén Itzá (Tablas 15 a 18).

Tabla 15. Matriz de deterioros de las grietas y fisuras del Templo Norte de Chichén Itzá.

FACTOR	AGENTE	CAUSA	MECANISMO	DETERIORO	EFECTO
Intrínseco	Propiedades del material pétreo	Expansión térmica de la calcita Heterogeneidad en los componentes minerales	Los cambios térmicos a lo largo del día ocasionados por la irradiación solar generan procesos de expansión y contracción en el mineral calcita que conforma la roca, lo que ocasiona fallas dentro de los sillares. La diferencia entre los coeficientes de expansión térmica entre el cemento de las intervenciones anteriores y la roca caliza ocasiona que esta última se disgregue. Las imperfecciones, textura no homogénea y la orientación de componentes, además de las fuerzas de carga de la estructura ocasionan que las calizas presenten grietas.	Grietas y fisuras	Disminución de estabilidad de la roca. Aumento en la permeabilidad, ya que las grietas conectan poros.
	Estructural	Cargas y tensiones dentro de la construcción			
Extrínseco	Ambiental	Oscilaciones de temperatura e insolación	Las raíces de las plantas superiores se extienden e hinchan en grietas, juntas y huecos de la roca, lo que genera presiones internas. Contaminación por sales solubles, sulfatos originados por usar cemento como consolidante.		
	Biológico	Crecimiento de organismos vegetales			
	Antropogénico	Intervenciones anteriores			

Tabla 16. Matriz de deterioros de las pérdidas de material rocoso del Templo Norte de Chichén Itzá.

FACTOR	AGENTE	CAUSA	MECANISMO	DETERIORO	EFFECTO
Intrínseco	Propiedades del material pétreo	Microfacies y composición sedimentaria de la roca Contenido de fases insolubles	La porosidad y heterogeneidad en los granos y matriz de los sillares causan que la roca se erosione más fácilmente en alguno de sus componentes o planos de sedimentación, por ejemplo, debilitando la masa básica y permitiendo que se desprendan los microfósiles, generando una textura irregular en la superficie.	Alveolización Erosión diferencial	Pérdida de material constitutivo (matriz y clastos). Desgaste de bajorrelieves. Disminución de estabilidad de los sillares.
Extrínseco	Ambiental	Viento Luvia Ciclos de humedad y secado	La fricción y arrastre ocasionados por las partículas llevadas por el viento y la lluvia desgastan los sillares, principalmente en el interior del recinto.		
			Al circular el agua, disuelve y transporta los componentes químicos de los minerales, sin embargo, no alcanza a llegar a la superficie para evaporarse, las sales cristalizan dentro de la roca y generan presiones intergranulares lo que ocasiona disgregación.		
			Al circular el agua, aumenta el volumen de las arcillas, estas pueden desprenderse con el flujo o causar desprendimientos.		
	Antropogénico	Intervenciones anteriores	El cemento utilizado como mortero para consolidación es fuente de sales de sulfatos que migran hacia las rocas calizas y cristalizan en sus poros.	Perforaciones	
		Falta de cuidados adecuados	Existen huecos hechos por una herramienta afilada al colocar una instalación de luz, o bien otros más fueron realizados por la anidación de avispas.		
	Biológico	Anidación de insectos			

Tabla 17. Matriz de deterioros de los daños a la superficie de los sillares del Templo Norte de Chichén Itzá.

FACTOR	AGENTE	CAUSA	MECANISMO	DETERIORO	EFFECTO
Extrínseco	Ambiental	Ciclos de humedad y secado	El agua contenida en la roca migra a través de los poros de la piedra, arrastrando las sales en disolución contenidas, aflorando hasta la superficie donde cristalizan en forma de depósitos blanquecinos por un alza de temperatura o secado por viento.	Velos salinos	Afecta estéticamente los muros.
	Antropogénico	Intervenciones anteriores	El cemento utilizado como mortero para consolidación es fuente de sales de sulfatos que migran hacia las rocas calizas y cristalizan en sus poros.		Al rehidratarse y recrystalizar su presión ocasiona disgregación de material pétreo.
		Falta de cuidados adecuados	Se encuentra un depósito de hollín producto de la combustión en el muro norte.	Restos de ignición	Afecta estéticamente los sillares y su correcta lectura.

Tabla 18. Matriz de deterioros de la colonización biológica del Templo Norte de Chichén Itzá.

FACTOR	AGENTE	CAUSA	MECANISMO	DETERIORO	EFFECTO
Extrínseco	Biológico	Anidación de insectos	Las avispas anidan en las cavidades de la roca o entre las juntas de los sillares que han perdido mortero.	Colmena de avispas	Afecta estéticamente el muro. Contribuye a la reproducción de insectos que ocasionan perforaciones en los sillares.
		Crecimiento de microorganismos y organismos vegetales	Las condiciones de alta temperatura y humedad relativa propias de la región, además de las condiciones de asoleamiento o sombra favorecen la reproducción de organismos vegetales en distintas zonas del Templo. Su actividad biológica genera cavidades milimétricas o submilimétricas en la superficie (<i>pitting</i>), biomineralización y pátinas de coloración naranja, además de mantener las áreas húmedas por más tiempo.	Biopelícula (líquenes, hongos y bacterias)	Afecta estéticamente los muros. Provoca pérdida de material pétreo. Contribuye a mantener las áreas húmedas por más tiempo.
	Ambiental	Agua directa o humedad relativa alta Clima tropical de la región	La alcalinidad de las calizas, las intervenciones anteriores con cemento sumado a los sitios sombreados, húmedos y en posición horizontal, como el canto superior de los sillares del muro este, facilitan la aparición de musgo.	Musgo	Afecta estéticamente los sillares. Genera un sustrato para el crecimiento de plantas superiores. Contribuye a mantener la humedad en las rocas.
			Las semillas que se esparcen con el viento, junto con la presencia de agua provocan el crecimiento de plantas superiores entre las juntas de los sillares. El hinchamiento y crecimiento de sus raíces genera tensiones internas que pueden crear roturas.	Plantas superiores	Afectan estéticamente los muros. El crecimiento de sus raíces ocasiona grietas y fisuras.

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

Con la información anteriormente analizada se concluye que la hipótesis planteada al inicio de este trabajo de investigación es correcta, los factores ambientales a los que los sillares están expuestos como las variaciones de humedad, temperatura, insolación y ataque biológico además de las propiedades intrínsecas de la rocas calizas y brechas están relacionados con su grado y tipo de deterioro.

La composición mineralógica de los sillares, mayormente por calcita, ocasiona que el material se expanda con la irradiación solar y el aumento de temperatura desde aproximadamente los 40°C, contrayendo cuando el sillar recibe sombra o anochece, este proceso genera tensiones internas que ocasionan fracturas y deformaciones en el material el cual no vuelve a sus dimensiones originales.

El tipo, forma y conexión de poros es también un factor intrínseco importante que determina la permeabilidad de la roca y por lo tanto la manera en que el agua se evapora y las sales cristalizan. En general, se encontró que las brechas calcáreas tienden a ser más porosas y presentar más conexiones capilares que las calizas, lo que facilita su erosión y pérdida de material como puede observarse en los muros internos del Templo Norte. A lo anterior se añade la probabilidad de que en la composición de las brechas se encuentren minerales arcillosos, los cuales aumentan o reducen su volumen dependiendo de las condiciones de humedad, lo que ocasiona disgregaciones.

Por otro lado, al ubicarse el sitio arqueológico en una zona subtropical es común encontrar colonización biológica en prácticamente todo el inmueble, especialmente en zonas constantemente húmedas y con pérdida de mortero entre juntas, esto ocasiona alteraciones estéticas, pérdidas materiales y la generación de nuevas fracturas y tensiones en las rocas. Un programa periódico y puntual de mantenimiento para controlar el crecimiento de vegetación y/o anidación de insectos o aves en el Templo podría ser útil para asegurar su estabilidad.

Un punto importante que destacar es que durante la intervención y reconstrucción del edificio durante la primera mitad del siglo XX no se emplearon los materiales idóneos; como se mencionó en el apartado de discusión, el uso de cemento y hierro ocasionan que el material rocoso ceda y se disgregue, debido a que son materiales de características muy distintas a las rocas sedimentarias. Por ejemplo, los diferentes coeficientes de expansión térmica y porcentajes de porosidad resultan en tensiones y aumento de retención de humedad en las calizas, además de ser fuente de sales como los sulfatos. Afortunadamente, durante el proyecto de conservación del año 2023 estos resanes de cemento fueron retirados y un nuevo mortero de sascab se aplicó, el cual es compatible con los sillares.

Algunas recomendaciones en cuanto a la conservación a futuro del Templo Norte son asegurar la compatibilidad de materiales en cualquier nueva intervención, pues el uso de un material incorrecto puede ocasionar nuevas alteraciones o agravar

deterioros preexistentes, especialmente se insta a no utilizar cemento, yeso o sus derivados por el acarreo de sustancias nuevas y dañinas para las rocas porosas. Se aconseja verificar periódicamente el estado del dintel de varillas de hierro, ya que durante la última restauración del inmueble fue recubierto con mortero nuevo y puede volver a desprenderse, por consiguiente, la herrumbre caería sobre los sillares, además de que sus tensiones internas pueden ocasionar nuevas fracturas alrededor del área.

De igual manera, se aconseja velar particularmente por la preservación de los sillares que contengan brechas calcáreas, porque son las más sensibles a la erosión y pérdida de material. Además, se debe cuidar de las áreas muy dañadas, pues el deterioro de los sillares es acumulativo, ya que la generación de fracturas, la apertura de huecos y alveolos permiten una mayor absorción de humedad, se aceleran los ciclos de humedad-secado y por consiguiente se disgrega la roca.

Otro aspecto significativo que se propone es comenzar a elaborar un plan de intervención para el estado de la cubierta del Templo Norte, ya que la falta de la mitad sur de la bóveda permite el ingreso de lluvia, viento y las partículas de materiales que este acarrea al interior del recinto donde se encuentran los bajorrelieves, el contacto directo con estos agentes, sumado a las fluctuaciones ambientales está deteriorando la cámara.

Por último, se sugiere la profundización en una investigación futura sobre los experimentos de compresión en las calizas y brechas, pues se considera que las muestras fueron insuficientes para obtener conclusiones más certeras. Resultaría de provecho analizar la capacidad de compresión de ambas litologías en distintos estados de alteración, estando secas y húmedas y en sus tres ejes (x, y, z), ya que también se pueden generar daños debido a las presiones estructurales. De igual manera, es recomendable repetir los análisis de DRX, esta vez asegurándose de que los carbonatos se encuentren totalmente eliminados de la muestra en polvo, con la finalidad de afirmar la presencia e identificación de arcillas.

Lo anteriormente descrito es con la finalidad de asegurar la estabilidad y duración de la roca que constituye los sillares de construcción del Templo Norte, una gran parte de los bajorrelieves de la cámara se ha perdido con el tiempo, con lo cual se ha perdido valiosa información sobre la historia y costumbres del sitio, además de mermar su gran valor estético. Los resultados presentes en esta investigación también podrían ser aplicables a otros inmuebles de Chichén Itzá, como se observó, las rocas muestreadas tienden a presentar un comportamiento y composición similar sin importar la temporalidad o ubicación de los templos y complejos estudiados, aunque se sugiere profundizar en el contexto de cada uno en un futuro.

REFERENCIAS

- Almaguer-Rodríguez, J. (2010). *Estudio geoquímico de elementos traza en unidades volcánicas del CVSLP: Método ICP-MS (validación del método)* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Alonso, F. J., Ordaz, J., & Esbert, R. Ma. (2013). Indicadores del deterioro en los materiales pétreos de edificación. Clasificación y análisis de los daños. En I. Argerich, F. Benito, A. Carrassón, S. Díaz, M. Domingo, G. Enríquez de Salamanca, A. García, L. Martín, A. Muñoz, & M. Timón (Eds.), *Proyecto COREMANS: Criterios de intervención en materiales pétreos* (pp. 111–142). Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.
- Ashurst, J., & Dimes, F. (1998). *Conservation of building and decorative stone* (2a ed.). Butterworth-Heinemann.
- Barnoos, V., Oudbashi, O., & Shekofteh, A. (2020). The deterioration process of limestone in the Anahita Temple of Kangavar (West Iran). *Heritage Science*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00411-1>
- Barrera Rubio, A. (1999). La arqueología en Yucatán. En P. A. Chico Ponce de León (Ed.), *Atlas de procesos territoriales de Yucatán* (1a ed., Vol. 1, pp. 309–312). Universidad Autónoma de Yucatán Facultad de Arquitectura.
- Bíró, P., & Pérez de Heredia, E. (2021). Los rituales de entronización de los príncipes “Turbante de Serpiente” de Chichén Itzá y Hunac Ceel de Mayapán. *Latin American Antiquity*, 32(2), 292–309. <https://doi.org/10.1017/laq.2020.95>
- Bonet, F., & Butterlin, J. (1979). Reconocimiento geológico de la Península de Yucatán. En F. Luna Kan (Ed.), *Enciclopedia Yucatanense* (1a ed., Vol. 10, pp. 9–31). Gobierno de Yucatán.
- Bueno, I. (2018). *Chichén Itzá* (E. Nualart & M. Eguaras, Eds.; 1a ed.). Gredos.
- Çelik, M. Y., & Aygün, A. (2019). The effect of salt crystallization on degradation of volcanic building stones by sodium sulfates and sodium chlorides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5), 3509–3529. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1354-y>
- Choquette, P. W., & Pray, L. C. (1970). Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 54, 207–250.
- Cobos, R. (2008). Chichen Itzá. *Arqueología: Diálogos con el pasado*.
- Coremans, P. (1969). Clima y microclima. En *La conservación de los bienes culturales* (1a ed., pp. 31–44). UNESCO.

- Deutsches Institut für Normung. (1988). *DIN 52103 Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen-Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert*.
- Deutsches Institut für Normung. (1998). *DIN EN 772-4 Prüfverfahren für Mauersteine-Teil 4: Bestimmung der Dichte und der Rohdichte sowie der Gesamtporosität und der offenen Porosität von Mauersteinen aus Naturstein*.
- Deutsches Institut für Normung. (1999). *DIN EN 12370 Prüfverfahren für Naturstein-Bestimmung des Widerstandes gegen Kristallisation von Salzen*.
- Deutsches Institut für Normung. (2004). *DIN EN 772-11 Prüfverfahren für Mauersteine-Teil 11: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Mauersteinen sowie der anfänglichen Wasseraufnahme von Mauerziegeln*.
- Deutsches Institut für Normung. (2007). *DIN EN 1926 Prüfverfahren für Naturstein-Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit*.
- Duda, R., & Rejl, L. (1989). *Minerals of the world*. Arch Cape Press.
- Emmanuel, S., & Levenson, Y. (2014). Limestone weathering rates accelerated by micron-scale grain detachment. *Geology*, 42(9), 751–754.
<https://doi.org/10.1130/G35815.1>
- Evident Corporation. (s/f). *Analizador XRF portátil DELTA Professional*. Página web. Recuperado el 9 de abril de 2024, de <https://www.olympus-ims.com/es/xrf-xrd/delta-handheld/delta-prof/>
- Flügel, E. (2010). *Microfacies of Carbonate Rocks* (2a ed.). Springer.
- Gallareta Negrón, T. (1999). Los sitios arqueológicos del estado de Yucatán. En P. A. Chico Ponce de León (Ed.), *Atlas de procesos territoriales de Yucatán* (1a ed., Vol. 1, pp. 305–309). Universidad Autónoma de Yucatán Facultad de Arquitectura.
- García-Fortes, S., & Flos-Travieso, N. (2008). *Conservación y restauración de bienes arqueológicos*. Editorial Síntesis.
- García-Solís, C. A. (2006). *Diagnóstico general de conservación del área de visita del sitio arqueológico de Chichén Itzá Anexo 1*.
- García-Solís, C. A., Quintana-Owen, P., López-Doncel, R. A., & Illescas-Salinas, J. F. (2023). 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., Schmidt, P., Pérez, E., Eúan, G., García, L., Burgos, F., & Quiñones, B. (2006). *Diagnóstico general de conservación del área de visita del sitio arqueológico de Chichén Itzá*.

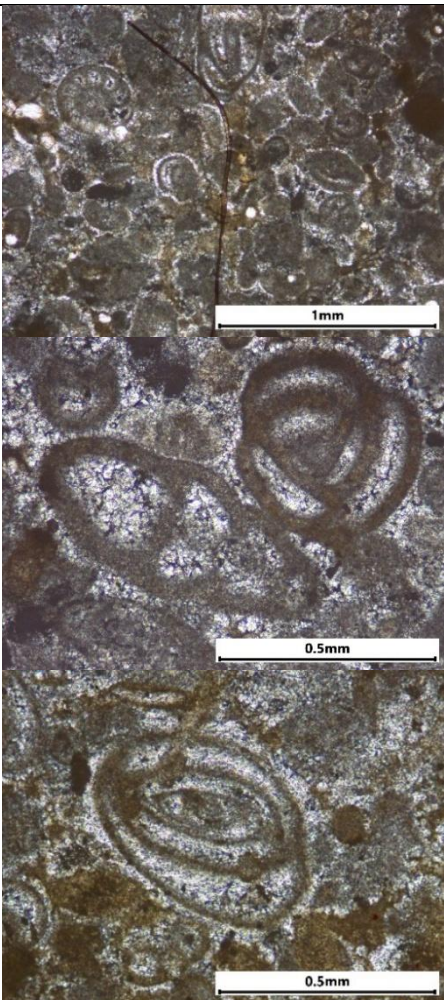
- González-Gómez, W. S., Quintana, P., Gómez-Cornelio, S., García-Solis, C. A., Sierra-Fernandez, A., Ortega-Morales, O., & De la Rosa-García, S. (2018). Calcium oxalates in biofilms on limestone walls of Maya buildings in Chichén Itzá, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 77(6). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7406-6>
- González-Gómez, W. S., Quintana, P., May-Pat, A., Avilés, F., May-Crespo, J., & Alvarado-Gil, J. J. (2015). Thermal effects on the physical properties of limestones from the Yucatan Peninsula. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 75, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.12.010>
- Heinrich, E. WM. (1980). *Petrografía microscópica* (2a ed.). Ediciones Omega, S.A.
- ICOMOS-ISCS. (2008). *Illustrated glossary on stone deterioration patterns* (V. Vergès-Belmin, Ed.). ICOMOS-ISCS.
- INAH. (s/f). “Templo Norte antes de su reconstrucción” Ca. 1928. Mediateca INAH. Recuperado el 19 de noviembre de 2024, de <https://mediateca.inah.gob.mx/repositorio/islandora/object/fotografia%3A272307>
- INAH. (2011). *Plan de Manejo Zona de Monumentos Arqueológicos de Chichén Itzá*.
- Klein, C., Hurlbut, C. S., & Dana, J. D. (2002). *Mineral Science* (C. Mills, Ed.; 22a ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Kloppmann, W., Bromblet, P., Vallet, J. M., Vergès-Belmin, V., Rolland, O., Guerrot, C., & Gosselin, C. (2011). Building materials as intrinsic sources of sulphate: A hidden face of salt weathering of historical monuments investigated through multi-isotope tracing (B, O, S). *Science of the Total Environment*, 409(9), 1658–1669. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.01.008>
- López-Doncel, R., Wedekind, W., Aguillón-Robles, A., Dohrmann, R., Molina-Maldonado, S., Leiser, T., Wittenborn, A., & Siegesmund, S. (2018). Thermal expansion on volcanic tuff rocks used as building stones: examples from Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 77(9). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7533-0>
- López-Ramos, E. (1975). Geological summary of the Yucatan Peninsula. En A. E. M. Nairn & F. G. Stehli (Eds.), *The Ocean Basins and Margins* (1a ed., Vol. 3, pp. 257–282). Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8535-6>

- López-Ramos, E. (1979). Estudio geológico de la Península de Yucatán. En F. Luna Kan (Ed.), *Enciclopedia Yucatanense* (1a ed., Vol. 10, pp. 33–76). Gobierno de Yucatán.
- Marquina, I. (1951). *Arquitectura Prehispánica* (1a ed., Vol. 1). Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Matteini, M., & Moles, A. (2001). *Ciencia y restauración Método de investigación* (1a ed.). Editorial NEREA, S.A.
- May, A. (1994). Microfacies controls on weathering of carbonate building stones: Devonian (northern Sauerland, Germany). *Facies*, 30(1), 193–208. <https://doi.org/10.1007/BF02536897>
- Millet-Cámara, L. (1999, junio). Los mayas de Yucatán: Entre las colinas y el estero. *Arqueología mexicana*, 4–13.
- Pacheco-Martínez, J., & Alonzo-Salomón, L. (2003, abril). Caracterización del material calizo de la formación Carrillo Puerto en Yucatán. *Ingeniería Revista Académica*, 7(1), 7–19.
- Piña Chan, R. (1980). *Chichén Itzá. La ciudad de los brujos del agua* (1a ed.). Fondo de Cultura Económica.
- Reyes, J., Pérez, E., Pech, R., Alberto, C., Balam, R., & Téllez Vázquez, A. (2023). *Estado de conservación del Templo Norte de Chichén Itzá: Proyecto de conservación Chichén Itzá 2022-2023*.
- Rösch, H., Schwarz, H. J., & Rosch, H. (1993). Damage to Frescoes Caused by Sulphate-Bearing Salts: Where Does the Sulphur Come from? *Studies in Conservation*, 38(4), 224–230. <https://doi.org/10.2307/1506367>
- Sapper, C. (1896). Geology of Chiapas, Tabasco and the Peninsula of Yucatan. *The Journal of Geology*, 4(8), 938–947. <https://doi.org/https://doi.org/10.1086/607658>
- Schele, L. (s/f). *The Linda Schele drawings collection*. Foundation for the advancement of mesoamerican studies, Inc. Recuperado el 19 de noviembre de 2024, de <http://research.famsi.org/uploads/schele/hires/08/IMG0032.jpg>
- Schele, L., & Mathews, P. (1999). *The code of kings: The language of seven sacred maya temples and tombs* (1a ed.). Touchstone.
- Schmidt, P. J. (1999, junio). Chichén Itzá Resultados y proyectos nuevos (1992-1999). *Arqueología mexicana*, 32–39.
- Scholle, P. A., & Ulmer-Scholle, D. S. (2003). *A color guide to the petrography of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagenesis*. American Association of Petroleum Geologists.

- Siegesmund, S., & Dürrast, H. (2011). Physical and mechanical properties of rocks. En *Stone in Architecture: Properties, Durability* (pp. 97–225). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2_3
- Sneyers, R. V., & Henau, P. J. de. (1969). La conservación de la piedra. En *La conservación de los bienes culturales* (1a ed., pp. 223–249). UNESCO.
- Solleiro-Rebolledo, E., Cabadas-Báez, H. V., Pi, P. T., González, A., Fedick, S. L., Chmilar, J. A., & Leonard, D. (2011). Genesis of hydromorphic Calcisols in wetlands of the northeast Yucatan Peninsula, Mexico. *Geomorphology*, 135, 322–331.
- Steiger, M., Charola, A. E., & Sterflinger, K. (2011). Weathering and deterioration. En *Stone in Architecture: Properties, Durability* (pp. 227–316). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2_4
- Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física* (8a ed.). Pearson Prentice Hall.
- Torraca, G. (2005). *Porous building materials: Materials Science for Architectural Conservation* (3a ed.). International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property (ICCROM).
- UNESCO. (s/f). *Pre-Hispanic City of Chichen-Itza*.
- Varti-Matarangas, M., & Matarangas, D. (2000). Microfacies analysis and endogenic decay causes of carbonate building stones at the Asklepieion Epidauros monuments of Peloponnessos, Greece. *Journal of Cultural Heritage*, 1, 165–177.
- Vela, E. (2008, abril). Chichén Itzá, Yucatán. *Arqueología mexicana*, 5–19.
- Vicedo, V., Berlanga, J. A., & Serra-Kiel, J. (2014). Paleocene larger foraminifera from the Yucatán Peninsula (SE Mexico). *Carnets de Géologie*, 14(4), 41–68.
- Zarate-Barradas, R. G., Miranda-Huerta, A., Lemus-Bustos, O., Mendieta Flores, J. L., & Sánchez, P. J. M. (2006). *Carta geológico-minera Mérida F16-10 Yucatán, Campeche y Quintana Roo*. Servicio Geológico Mexicano.

ANEXOS

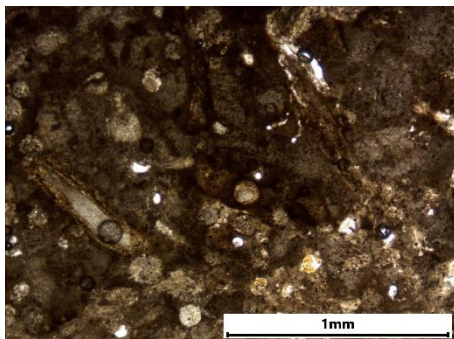
CALIZAS

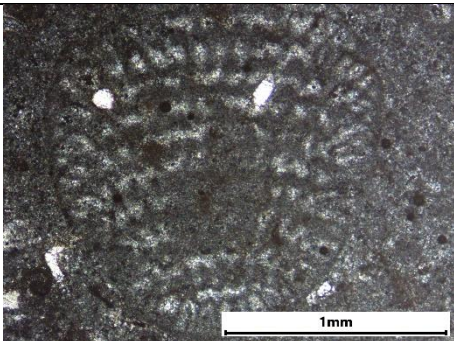
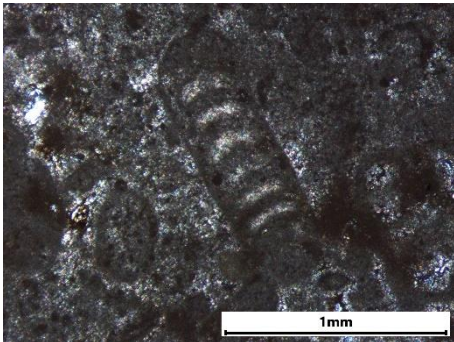
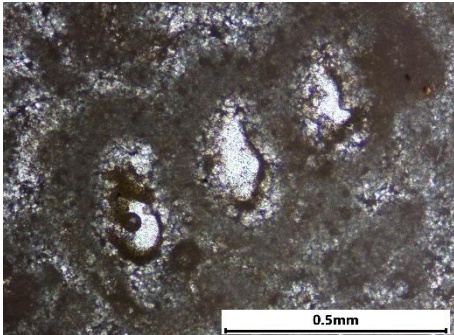
Clave:	CAL-01			Fotografías: 
Descripción de la roca:	Caliza color crema (710YR 8/1) con zonas grises y café claro.			
Descripción de la lámina:	Lámina de color beige, con algunos elementos en color marrón claro.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	40%	Porcentaje:	60%	
Descripción:	La masa básica original es micrita, pero está parcialmente recristalizada en cemento microesparítico por diagénesis.	Descripción:	En su mayoría los componentes están rodeados por “dog teeth” (cristales de calcita). -Pellets (algunos recristalizados) Bioclastos: -Foraminíferos uniseriales -Foraminíferos biseriales -Foraminíferos bentónicos (miliólidos y orbitolinas) - Algas (Dasycladaceae)	
			El 10 % de los componentes no son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Grain-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Bioesparita	Dunham	Grainstone de foraminíferos	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF	18 Grainstone/packstone con abundantes foraminíferos o algas (Plataforma interior restringida o abierta marina)	RMF		

Clave:	CAL-02			Fotografías:
Descripción de la roca:	Caliza color gris oscuro (2.5YR 5/1) con componentes ordenados de manera horizontal.			
Descripción de la lámina:	Lámina de color gris oscuro con bandas gris claro, sus componentes se ordenan de forma horizontal.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	70%	Porcentaje:	30%	
Descripción:	Micrita	Descripción:	-Pellets	
			Bioclastos (reellenos de esparita): -Foraminíferos biserials -Foraminíferos bentónicos (miliólidos y orbitolinas) -Algas coralinas	
			El 10% de los componentes no son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Biomicrita	Dunham	Bindstone	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF		RMF	23 Bindstone fenestral (Zona peritidal)	

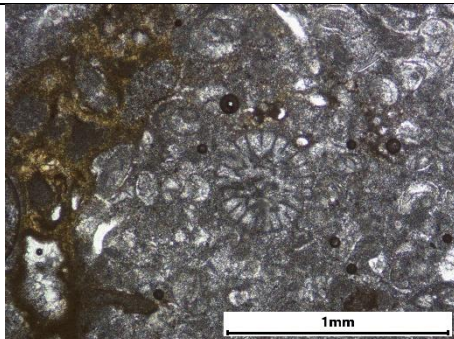


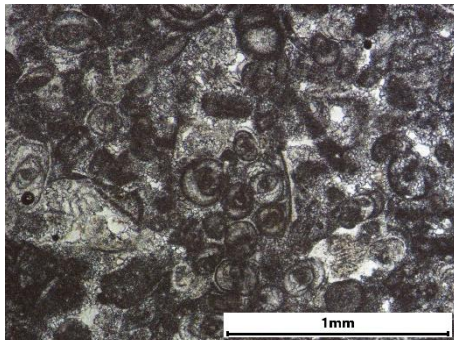


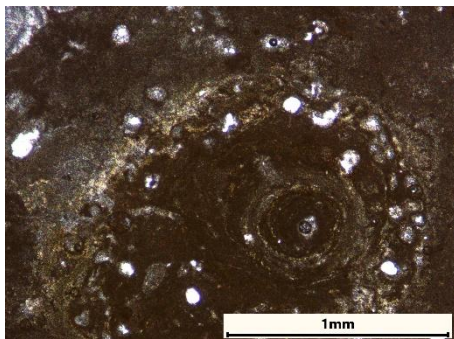


Clave:	CAL-03			Fotografías:
Descripción de la roca:	Caliza color crema (7.5YR 8/1) con algunas zonas con microporos.			  
Descripción de la lámina:	Lámina de color blanco translúcido con diminutos puntos blancos opacos.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	85%	Porcentaje:	15%	
Descripción:	Micrita	Descripción:	-Pellets Bioclastos (los fósiles están rellenos de esparita): -Foraminíferos uniseriales -Foraminíferos bentónicos (miliólidos y orbitolinas) -Algas (Dasycladaceae) El 10% de los componentes no son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Biomicrita	Dunham	Wackestone de foraminíferos	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF		RMF	20 Wackestone/packstone bioclástica con algas y foraminíferos bentónicos (Laguna)	

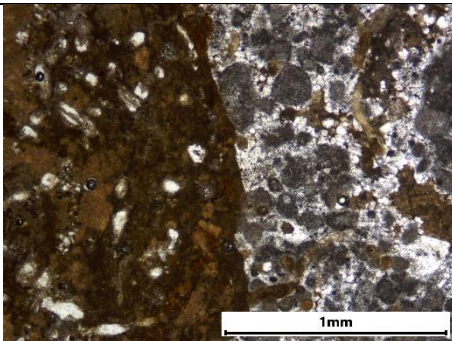
Clave:	CAL-04			Fotografías:
Descripción de la roca:	Caliza color crema (10YR 8/1) con bandas en color marrón, gris y beige.			
Descripción de la lámina:	Lámina color crema con dos bandas diagonales de color beige.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	30%	Porcentaje:	70%	
Descripción:	Esparita y micrita	Descripción:	-Ooides -Pellets -Intraclastos de mudstone Bioclastos (rodeados y rellenos de esparita): -Foraminíferos bentónicos (miliólidos y orbitolinas) -Algas (Dasycladaceae)	
			El 10% de los componentes no son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Grain-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Bioesparita	Dunham	Grainstone de foraminíferos	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF	18 Grainstone/packstone con abundantes foraminíferos o algas (Plataforma interior restringida o abierta marina)	RMF		



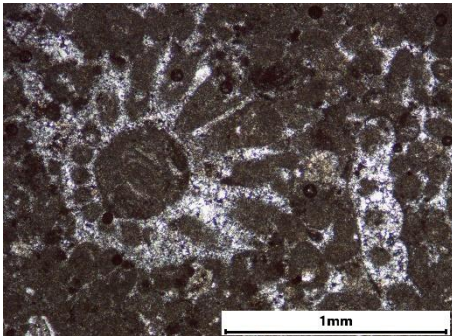


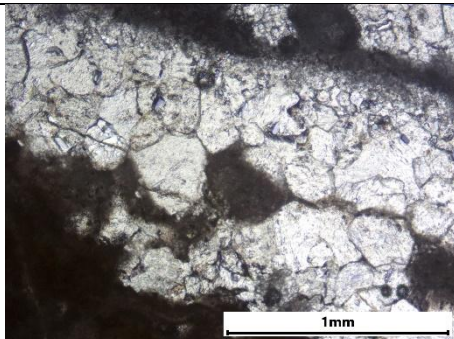


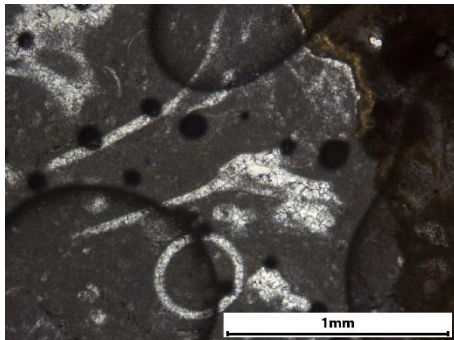
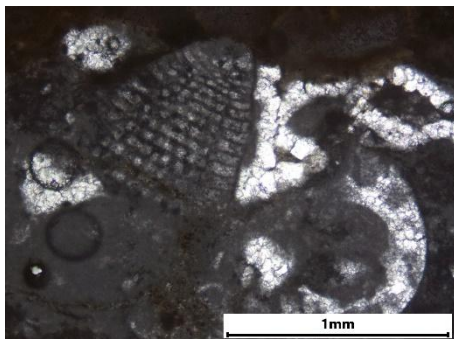
Clave:	CAL-05			Fotografías:
Descripción de la roca:	Caliza color crema (7.5YR 8/1) con bandas y componentes marrón claro.			
Descripción de la lámina:	Lámina color blanco con componentes en color beige-amarillento.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	80%	Porcentaje:	20%	
Descripción:	Matriz peloidal con esparita dentro de microfósiles Los huecos entre los pellets están rellenos de esparita	Descripción:	Bioclastos: -Foraminíferos bentónicos (miliólidos y orbitolinas) -Foraminíferos uniseriales -Foraminíferos biseriales -Gasterópodos -Algas coralinas *Tiene otros fragmentos de microfósiles que no se pueden identificar *Los fósiles tienden a ser más pequeños que en las otras láminas analizadas	
			El 10% de los componentes no son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Biopelmicrita	Dunham	Wackestone	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF		RMF	4 Wackestone/packstone peloidal (Rampa externa)	



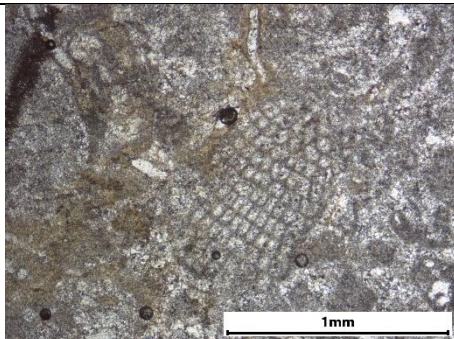


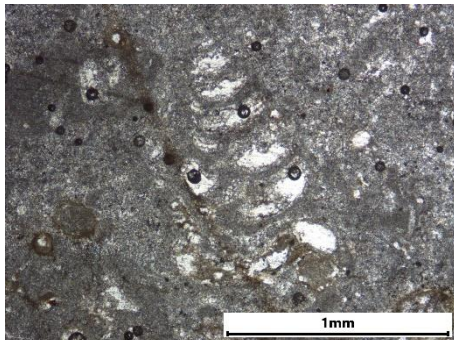


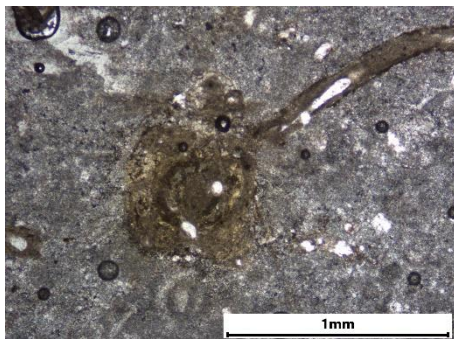
Clave:	CAL-10			Fotografías:
Descripción de la roca:	Caliza color crema (10YR 8/1) con bandas color beige y gris claro.			
Descripción de la lámina:	Lámina color crema y opaca, con bandas en color beige-amarillento y puntos translúcidos.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	80%	Porcentaje:	20%	
Descripción:	La masa básica original es micrita, pero está parcialmente recristalizada en esparita por diagénesis.	Descripción:	Bioclastos: -Foraminíferos bentónicos (miliólidos y orbitolinas) -Foraminíferos uniseriales -Foraminíferos biseriales -Calcisferas -Algas coralinas *Tiene otros fragmentos de microfósiles que no se pueden identificar	
			El 10% de los componentes no son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Biomicrita	Dunham	Packstone	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF		RMF	20 Wackestone/Packstone bioclástica con algas y foraminíferos bentónicos (Laguna)	

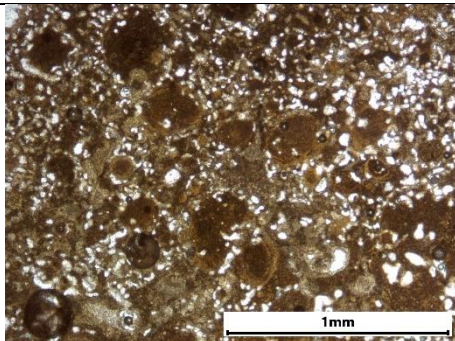
Clave:	CAL-15			Fotografías:
Descripción de la roca:	Roca caliza color crema (7.5YR 8/1), homogénea.			
Descripción de la lámina:	Lámina de color blanco, opaca y homogénea.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	85%	Porcentaje:	15%	
Descripción:	Micrita	Descripción:	-Ooides Bioclastos: -Foraminíferos bentónicos (miliólidos y orbitolinas) -Foraminíferos uniseriales y biseriales -Algas coralinas	
			El 10% de los componentes no son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Biomicrita	Dunham	Wackestone	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF		RMF	20 Wackestone/packstone bioclástica con algas y foraminíferos bentónicos (Laguna)	

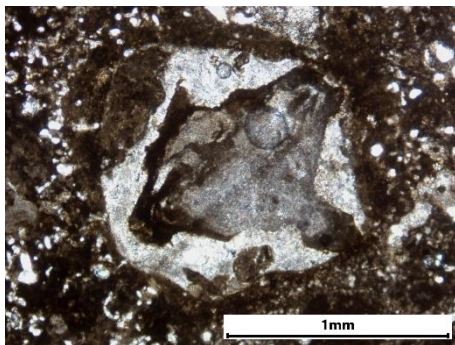


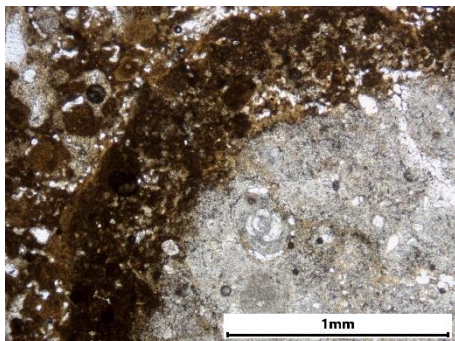




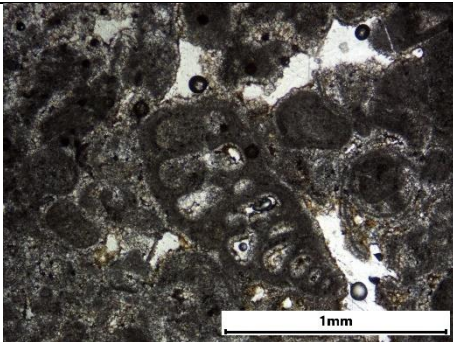
Clave:	CAL-16			Fotografías:
Descripción de la roca:	Roca caliza color gris oscuro (2.5YR 5/1) con escasos clastos (1 a 4 mm de longitud) en color gris oscuro.			
Descripción de la lámina:	Lámina color gris oscuro, con pocos clastos color gris claro y negro.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	65%	Porcentaje:	35%	
Descripción:	Micrita	Descripción:	-Ooides -Pellets -Intraclastos de grainstone y wackestone (uno de ellos tiene foraminíferos miliólidos dentro)	
			Bioclastos: -Restos de bivalvos	
			El 10% de los componentes no son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Biomicrita	Dunham	Wackestone	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF		RMF	24	Mudstone/wackestone con intraclastos (Zona peritidal)

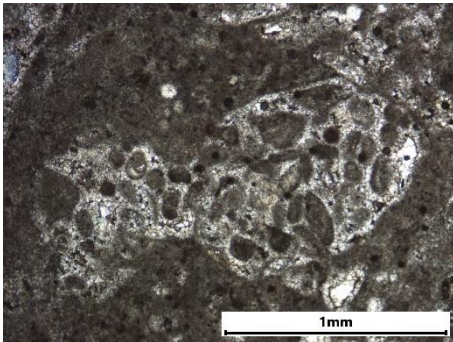


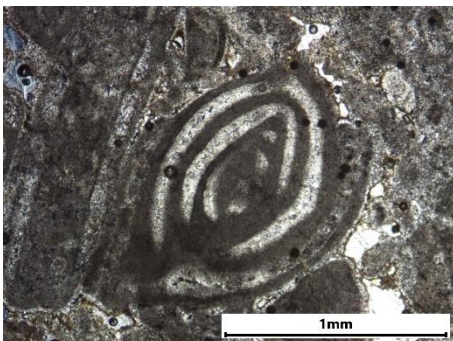




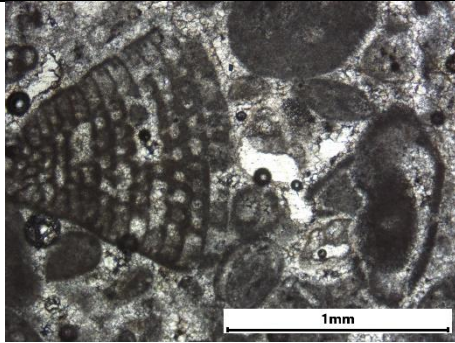
Clave:	CAL-17			Fotografías:
Descripción de la roca:	Roca caliza color blanco-grisáceo (10YR 8/1 y 10YR 7/1), ligeramente porosa.			
Descripción de la lámina:	Lámina color blanco con bandas delgadas en color marrón oscuro.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	40%	Porcentaje:	60%	
Descripción:	Esparita y micrita	Descripción:	-Pellets -Intraclastos (mudstone)	
			Bioclastos (contienen micrita o esparita): -Foraminíferos bentónicos (miliólidos y orbitolinas) -Foraminíferos uniseriales -Foraminíferos biseriales -Foraminíferos triseriales	
			El 10% de los componentes no son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Grain-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Bioesparita	Dunham	Grainstone de foraminíferos	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF		RMF	26 Grainstone/packstone bioclástica con diversos granos esqueléticos (Banco de arenas)	



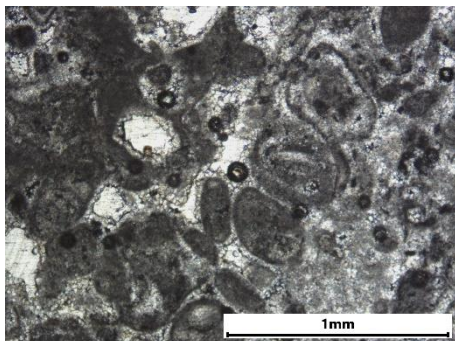




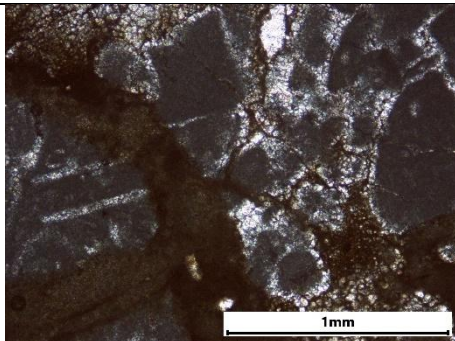
Clave:	CAL-19			Fotografías:
Descripción de la roca:	Roca caliza color crema (2.5Y 8/2), ligeramente porosa y afectada por líquenes.			
Descripción de la lámina:	Lámina color blanco con componentes opacos.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	30%	Porcentaje:	70%	
Descripción:	Esparita y micrita	Descripción:	-Pellets -Intraclastos (mudstone)	
			Bioclastos (contienen micrita o esparita): -Foraminíferos bentónicos (miliólidos y orbitolinas)	
			El 10% de los componentes no son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Grain-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Bioesparita	Dunham	Grainstone de foraminíferos	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF		RMF	26 Grainstone/packstone bioclástica con diversos granos esqueléticos (Banco de arenas)	

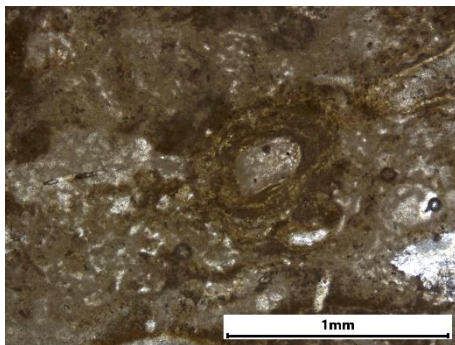


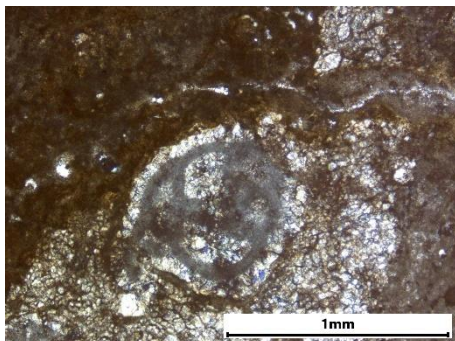




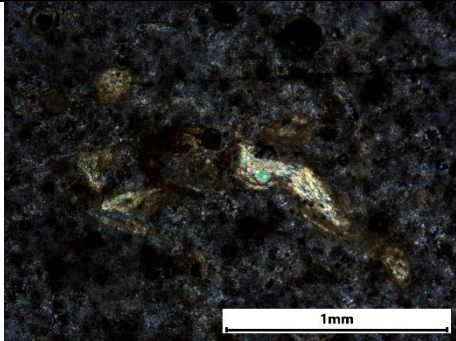
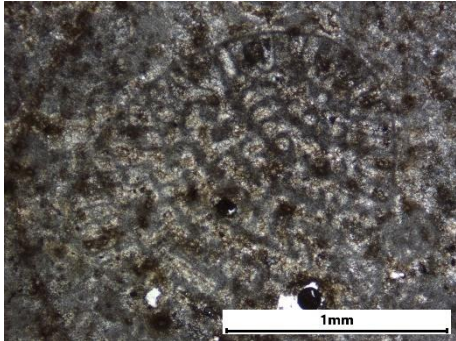
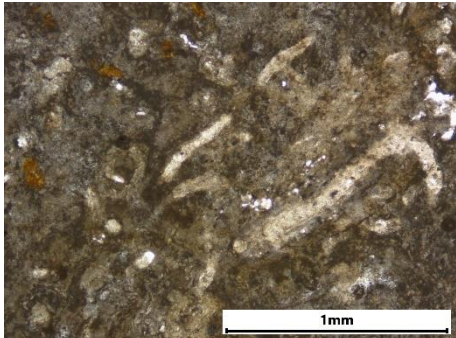
Clave:	CAL-20			Fotografías:
Descripción de la roca:	Roca color beige-marrón (10YR 6/2) con bandas café y gris. Se perciben unos puntos color rojo-anaranjado en algunas zonas. Tiene clastos que oscilan entre 1 a 5 mm de longitud.			
Descripción de la lámina:	Lámina color café claro con bandas marrón oscuro y componentes blanco traslúcido. Se observan también algunos puntos rojo-anaranjado.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	85%	Porcentaje:	15%	
Descripción:	Micrita y esparita	Descripción:	-Ooides -Pellets -Intraclastos (mudstone y packstone) -Minerales rojos -Algas coralinas	
			Bioclastos (se encuentran dentro de los intraclastos): -Foraminíferos bentónicos (miliólidos) -Foraminíferos biserials	
			El 10% de los componentes no son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Biomicrocrítica	Dunham	Bindstone	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF		RMF	23 Bindstone fenestral (Zona peritidal)	

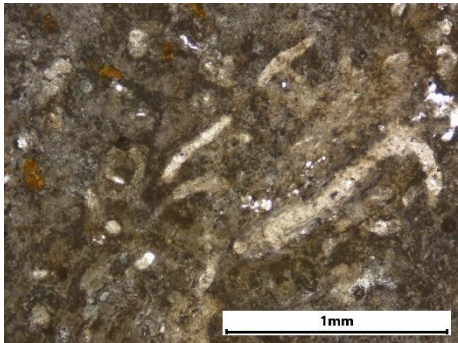
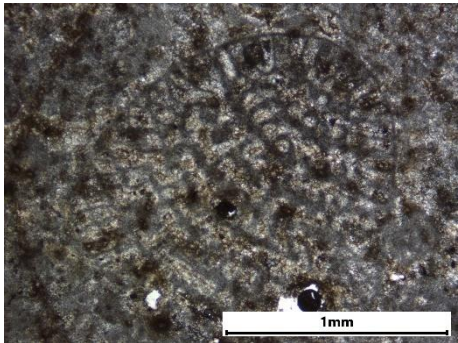
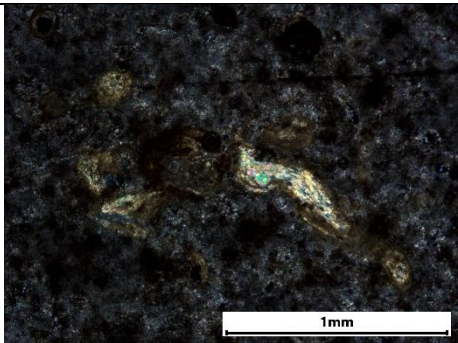






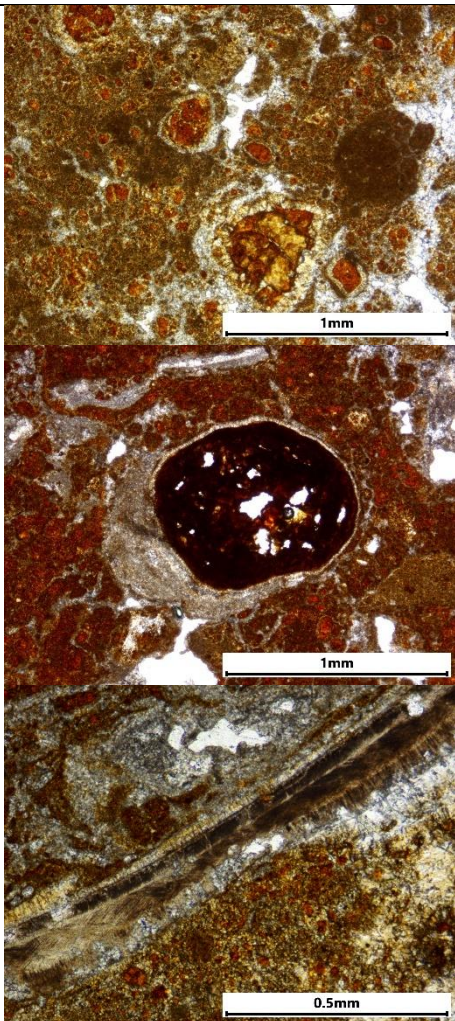
Clave:	CAL-21			Fotografías:
Descripción de la roca:	Roca caliza color crema (10YR 8/2) con bandas en color gris claro, beige y blanco.			
Descripción de la lámina:	Lámina color blanco con componentes color beige-amarillento.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	90%	Porcentaje:	10%	
Descripción:	Micrita	Descripción:	-Birdeyes rellenos de yeso	
			Bioclastos:	
			-Foraminíferos bentónicos (miliólidos y orbitolinas) -Algas coralinas	
			El 10% de los componentes no son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Biomicrita	Dunham	Wackestone	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF		RMF	20 Wackestone/packstone bioclástica con algas y foraminíferos bentónicos (Laguna)	

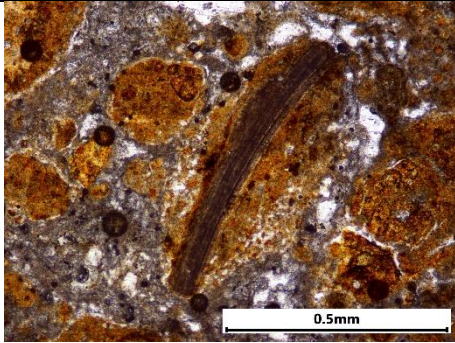


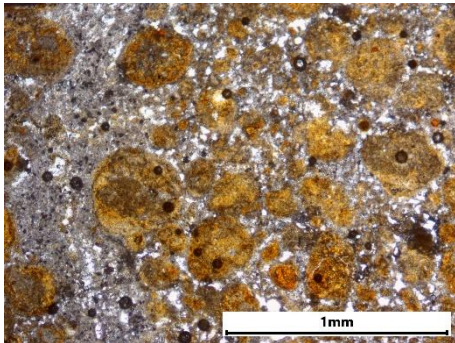
BRECHAS

Clave:	BRE-02			Fotografías:
Descripción de la roca:	Brecha calcárea color rojo oscuro (2.5YR 5/6) con clastos milimétricos color blanco. Se observan a simple vista algunos restos de fósiles en color blanco, entre 3 a 13 mm de longitud.			
Descripción de la lámina:	Lámina naranja oscuro con componentes translúcidos y algunos puntos color rojo oscuro.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	90%	Porcentaje:	10%	
Descripción:	Esparita y micrita con dolomitización en algunas zonas	Descripción:	-Ooides -Minerales rojos rodeados de calcita (dog teeth) -Intraclastos -Birdeyes rellenos de yeso Bioclastos: -Restos de bivalvos	
			El 10% de los componentes no son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Biomicrita	Dunham	Wackestone	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF	8 Wackestone/floatstone con fósiles enteros (Plataforma interior marino abierto)	RMF		



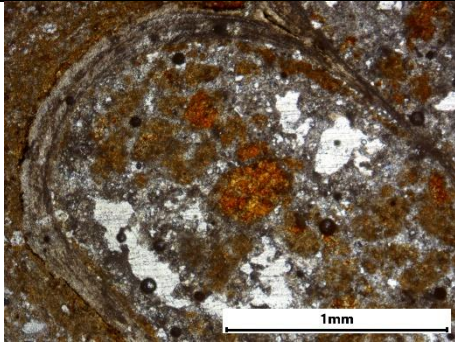
Clave:	BRE-03			Fotografías:
Descripción de la roca:	Brecha color naranja claro (7.5YR 6/6) con clastos milimétricos gris claro, gris oscuro, naranja y rojo oscuro que oscilan de 1 a 15 mm de longitud. Tiene también bandas delgadas blancas.			
Descripción de la lámina:	Lámina color naranja claro con componentes translúcidos en color blanco, llegan a medir hasta 10 mm de largo.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	70%	Porcentaje:	30%	
Descripción:	Matriz peloidal	Descripción:	-Intraclastos de mudstone (dentro de ellos se observan restos de foraminíferos uniseriales, biseriales y miliólidos) -Minerales rojos	
			Bioclastos: -Restos de bivalvos	
			El 10% de los componentes son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Biomicrudita	Dunham	Floatstone	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF	24 Brecha litoclástica (Plataforma restringida) interior	RMF		

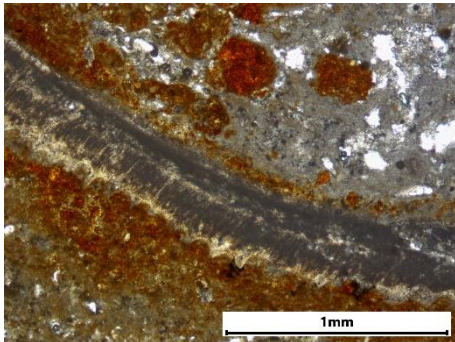


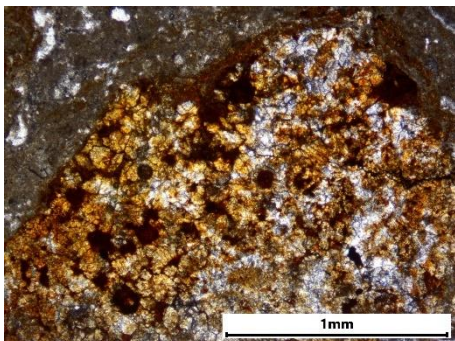




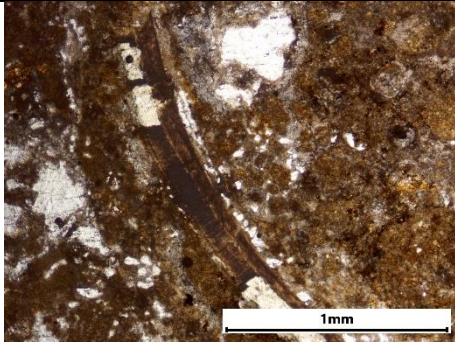
Clave:	BRE-04			Fotografías:
Descripción de la roca:	Brecha color rojo claro (7.5YR 5/6) con clastos en color beige y gris que oscilan entre 1 a 70 mm de longitud. También se perciben restos de fósiles de hasta 10 mm de largo, sin necesidad de microscopio.			
Descripción de la lámina:	Lámina color naranja-rojizo con componentes translúcidos en tonalidad blanco o beige. Se observa un fósil de 10 mm de largo.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	25%	Porcentaje:	75%	
Descripción:	Micrita y matriz peloidal	Descripción:	-Intraclastos de mudstone -Minerales rojos Bioclastos: -Restos de bivalvos -Gasterópodos	
			El 10% de los componentes son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Biomicrudita	Dunham	Floatstone	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF	24 Brecha litoclástica (Plataforma restringida) interior	RMF		

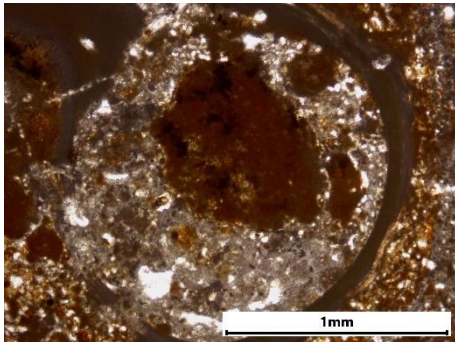


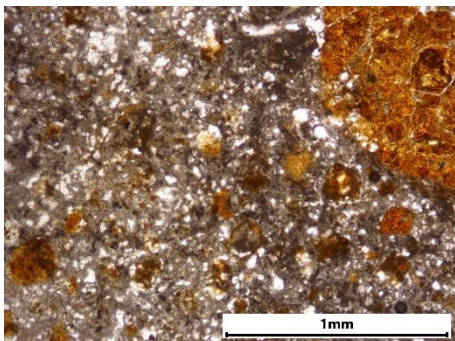




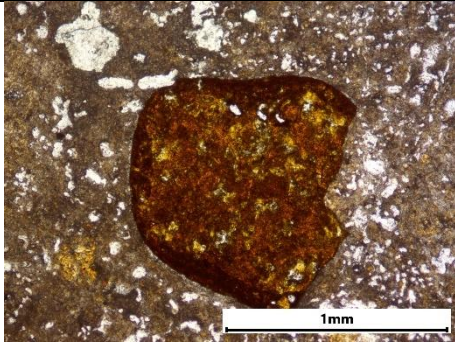
Clave:	BRE-05			Fotografías:
Descripción de la roca:	Brecha color naranja claro (10YR 7/4) con clastos en color gris oscuro, beige y naranja, oscilan entre 1 a 5 mm. Se perciben restos de fósiles de hasta 5mm de largo sin necesidad de microscopio.			
Descripción de la lámina:	Lámina color naranja claro con componentes en color gris oscuro, blanco y naranja.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	90%	Porcentaje:	10%	
Descripción:	Micrita		-Intraclastos de mudstone -Minerales rojos	
			Bioclastos: -Restos de bivalvos	
			El 10% de los componentes son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Biomicrudita	Dunham	Floatstone	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF		RMF	15 Floatstone bioclástica, material derivado de arrecife (Rampa interior marina abierta)	



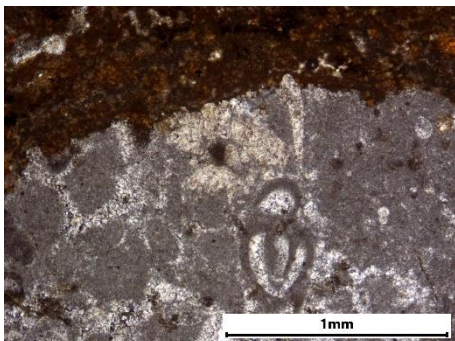




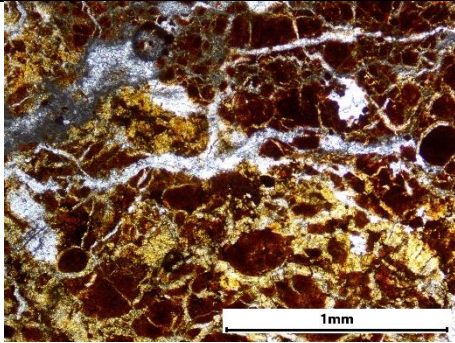
Clave:	BRE-06			Fotografías:
Descripción de la roca:	Brecha color naranja claro (10YR 7/4) con bandas blancas y clastos gris claro, beige y naranja; sus mediciones oscilan entre 1 a 28 mm. Se perciben algunos fósiles de hasta 2 mm de largo.			
Descripción de la lámina:	Lámina color naranja claro con clastos en color blanco translúcido y marrón.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	90%	Porcentaje:	10%	
Descripción:	Micrita y matriz peloidal	Descripción:	-Intraclastos de packstone (dentro se observan pellets, foraminíferos bentónicos y miliólidos)	
			-Minerales rojos	
			Bioclastos: -Restos de bivalvos	
		El 10% de los componentes son mayores a 2mm		
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Biomicrudita	Dunham	Floatstone	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF		RMF	15 Floatstone bioclástica, material derivado de arrecife (Rampa interna marina abierta)	

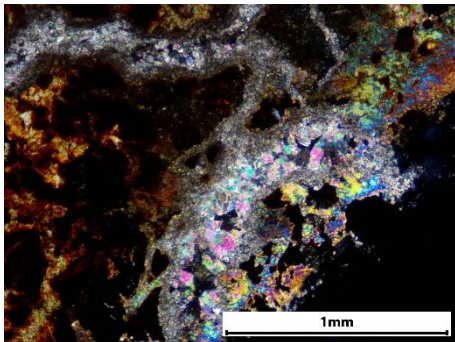


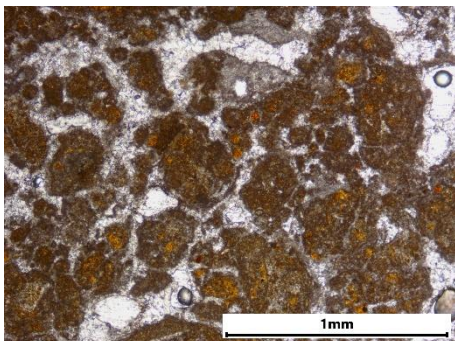




Clave:	BRE-10			Fotografías:
Descripción de la roca:	Brecha color rojo claro (7.5YR 6/4) con clastos en color rojo oscuro, oscilan entre 1 a 15 mm de longitud.			
Descripción de la lámina:	Lámina color naranja claro con clastos rojo oscuro y marrón de casi 10 mm de longitud.			
MASA BÁSICA		COMPONENTES		
Porcentaje:	70%	Porcentaje:	30%	
Descripción:	Matriz peloidal	Descripción:	-Intraclastos -Minerales rojos -Birdeyes con calcita	
			El 10% de los componentes son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Micrudita	Dunham	Floatstone	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF	24 Brecha litoclástica (Plataforma restringida) interior	RMF		







Clave:	BRE-11			Fotografías:
Descripción de la roca:	Brecha color rojo oscuro (5YR 6/4) con clastos color crema o gris que oscilan entre 1 a 15 mm de longitud. También se observan bandas en color beige y algunos restos de fósiles de 3mm de largo.			
Descripción de la lámina:	Lámina color naranja claro con componentes en color blanco translúcido.			
	MASA BÁSICA	COMPONENTES		
Porcentaje:	75%	Porcentaje:	25%	
Descripción:	Micrita y matriz peloidal	Descripción:	-Intraclastos de mudstone y grainstone (dentro se encuentran foraminíferos miliólidos)	
			Bioclastos: -Restos de bivalvos	
			El 10% de los componentes son mayores a 2mm	
FÁBRICA	Mud-supported			
CLASIFICACIÓN				
Folk	Biomicrudita	Dunham	Floatstone	
AMBIENTE DE DEPÓSITO				
SMF	24 Brecha litoclástica (Plataforma restringida) interior	RMF		

