



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

**Evaluación del deterioro y propiedades físicas de las rocas del
Edificio J y Edificio de los Danzantes en la Zona arqueológica de
Monte Albán, Oaxaca**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias en Geología Aplicada

Presenta:

Lidia Miroslava Lerma Pérez

Becaria del CONACYT (CVU: 926121)

Asesor:

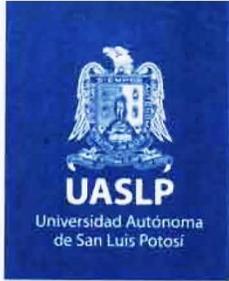
Dr. Rubén Alfonso López Doncel



San Luis Potosí, S. L. P.



Abril de 2021



FACULTAD DE INGENIERÍA

17 de diciembre de 2020

**DR. RUBÉN ALFONSO LÓPEZ DONCEL
P R E S E N T E.**

De conformidad con las facultades que el H. Consejo Técnico Consultivo otorgó a esta Secretaría, le comunico que ha sido propuesto como *Asesor del Trabajo de Tesis* que deberá desarrollar la **Ing. Lidia Miroslava Lerma Pérez**, para obtener el grado de **Maestra en Ciencias en Geología Aplicada**. Se le indica que es obligatoria la participación del Asesor en los Exámenes Previo y Final de Grado.

El tema propuesto para dicho trabajo es el siguiente:

"Evaluación del deterioro y propiedades físicas de las rocas del Edificio J y Edificio de los Danzantes en la Zona arqueológica de Monte Albán, Oaxaca"

Solicito a Usted tome nota que dicho Tema ha quedado registrado y que su vigencia es de un año a partir de la fecha; si transcurrido ese lapso su asesorada no concluye el trabajo, deberá hacer nuevo trámite de registro y/o solicitar **prórroga** para la terminación del mismo.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E



DR. RICARDO ROMERO MÉNDEZ
SECRETARIO DEL CONSEJO
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
SECRETARÍA

Copia. ASESORADO.
COORDINADOR ACADÉMICO DEL POSGRADO.
CONSEJERO MAESTRO DEL POSGRADO.
H. CONSEJO TÉCNICO CONSULTIVO.
*etn.

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

"1945-2020: 75 años de formación de profesionales en la Facultad de Ingeniería"



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA

17 de diciembre de 2020

ING. LIDIA MIROSLAVA LERMA PÉREZ

P R E S E N T E.

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Rubén Alfonso López Doncel** Asesor 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 17 de diciembre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Evaluación del deterioro y propiedades físicas de las rocas del Edificio J y Edificio de los Danzantes en la zona arqueológica de Monte Albán, Oaxaca”

Introducción.

1. Generalidades
2. Marco histórico y geológico de Monte Albán
3. Propiedades geológicas, físicas y químicas de las rocas de construcción de Monte Albán
4. Deterioro de las rocas de construcción de Monte Albán; causas y efectos
5. Resultados y discusión

Conclusiones

Referencias

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E



Handwritten signature of Dr. Emilio Jorge González Galván

DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION

www.uaslp.mx

Copia. Archivo
*etn.

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

“1945-2020: 75 años de formación de profesionales en la Facultad de Ingeniería”



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

Área de Investigación y Estudios de Posgrado

Aclaración

El presente trabajo que lleva por título:

Evaluación del deterioro y propiedades físicas de las rocas del Edificio J y Edificio de los Danzantes en la zona arqueológica de Monte Albán, Oaxaca

se realizó en el periodo febrero de 2019 a febrero de 2021 bajo la dirección del Dr. Rubén Alfonso López Doncel.

Originalidad

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

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

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

Este documento no ha sido sometido como tesis a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total.

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


Lidia Miroslava Lerma Pérez

Dedicatoria

Para mis papás Enrique & Enedelia

Mis hermanos Enrique Guadalupe, Lidia Margarita & Juan Antonio

Son todo para mí

Para mi persona única y especial, Alejandro

Agradecimientos

A mis padres Enrique Lerma y Enedelfía Pérez gracias por todo su gran apoyo, su comprensión y confianza, cada palabra de motivación, son lo más importante para mí. Gracias a mis hermanos Enrique Guadalupe, Lidia Margarita y Juan Antonio, a la esposa de mi hermano Enrique, Tere y mi sobrinita Sara, mi beba hermosa, por todo su apoyo, comprensión y cariño incondicional.

Agradezco a Alejandro, por todo su apoyo, comprensión y cada palabra para seguir esforzándome. Por vivir juntos esta etapa de la maestría, espero poder acompañarte en todos tus logros y apoyarte tanto de la misma manera, te quiero tanto.

También agradezco a los papás de Alejandro y hermanos por su apoyo y comprensión. Agradezco a Lucy y Julio por su apoyo y ayuda incondicional.

A mi asesor el Dr. Rubén Alfonso López Doncel por su tiempo, orientación, apoyo y cada una de sus enseñanzas para la realización de este trabajo.

A mi comité evaluador Dr. Luis Sedano Rodríguez y M.C. Marco Antonio Rojas por cada una de sus observaciones y consejos proporcionados durante la elaboración de esta tesis.

Así mismo a los sinodales Dr. Alfredo Aguillón Robles y Dr. Damiano Sarocchi por sus comentarios, observaciones y recomendaciones para mejorar el escrito.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca proporcionada durante la maestría (CVU: 926121).

A cada uno de los profesores que impartieron las materias para la maestría Dr. José Rafael Barboza Gudiño, Dr. Rubén Alfonso López Doncel, Dr. Alfredo Aguillón Robles, Dr. Yam Zul Ernesto Ocampo Díaz, Dr. José Ramón Torres Hernández Dr. Miguel Morales Gámez gracias por sus enseñanzas.

Al personal del Instituto de Geología por su amabilidad y siempre atentos en especial a Charlie y el señor Efrén.

Un especial agradecimiento para dos amigos por sus consejos, motivaciones y apoyo siempre, el Dr. Javier Aguilar y la Dra. Yolanda Pichardo.

Agradezco al director de Monte Albán Dr. David Andrade Olvera por permitirme realizar este trabajo en Monte Albán. Así mismo, muy profundamente agradecida por las muestras donadas para la realización de los análisis para este trabajo. De igual manera a los Arqs. José Luis Tenorio Rodríguez y Julio Manlio Zuñiga Cruz por su atención, a todos ellos por su tiempo, trabajo, conocimientos y apoyo en Monte Albán.

También a todo el personal de Monte Albán, por su amabilidad, con su apoyo fue más placentero el trabajo llevado a cabo durante esos días.

Doy gracias al director de la Facultad de Ciencias de la Tierra Dr. Sostenes Méndez Delgado y al Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández por otorgarme el permiso para utilizar el Laboratorio de mineralogía.

A la Ing. Claudia Hernández Galván del Instituto de Metalurgia por el análisis de difracción de rayos X de las muestras.

Agradezco también al Ing. Erasmo Mata Martínez por la elaboración de las láminas delgadas y el corte de las muestras.

A todas las personas que de una u otra manera contribuyeron a la formación de mi carrera, así como al de la realización de este trabajo.

Índice

	Página
Resumen	IX
Abstract	X
Introducción	1
1. Generalidades	5
1.1. Justificación del trabajo	5
1.2. Hipótesis	5
1.3. Objetivos	7
1.4. Metas	7
1.5. Materiales y métodos	8
2. Marco histórico y geológico de Monte Albán	12
2.1. Monte Albán: fundación y posterior abandono	12
2.2. Los Danzantes, Edificio L	13
2.3. El Observatorio, Edificio J	15
2.4. Descubrimiento, reconstrucción y restauración de Monte Albán	16
2.5. Marco geológico regional	21
2.6. Geología de Monte Albán	24
3. Propiedades geológicas, físicas y químicas de las rocas de construcción de Monte Albán	29
3.1. Geología y geoquímica de las rocas de construcción	29
3.2. Propiedades físicas de las rocas de construcción	30
3.2.1. Densidad	30
3.2.2. Porosidad y distribución de tamaño de poro	31
3.2.3. Absorción de agua por capilaridad	33

3.2.4. Absorción de agua por inmersión total	34
3.2.5. Expansión hídrica	35
3.2.6. Resistencia a la cristalización de sal	37
4. Deterioro de las rocas de construcción de Monte Albán; causas y efectos	38
4.1. Procesos físicos	39
4.2. Procesos químicos	39
4.3. Procesos biológicos	40
4.4. Formas del deterioro	41
5. Resultados y discusión	53
5.1. Resultados	53
5.1.1. Mapeos litológicos y de daños	53
5.1.2. Difracción de rayos X y petrografía	85
5.1.3. Experimentos petrofísicos	100
5.2. Discusión	110
5.2.1. Mapeos litológicos y de daños	110
5.2.2. Difracción de rayos X y petrografía	120
5.2.3. Experimentos petrofísicos	121
5.2.4. Conservación y restauración	125
Conclusiones	126
Referencias	128

Índice de figuras

	Página
Figura 1. Plaza Principal de la zona arqueológica de Monte Albán, Oaxaca, con el Edificio J en el centro. Vista desde la Plataforma Sur.	1
Figura 2. Localización de Monte Albán en el estado de Oaxaca y en el área del Valle de Oaxaca.	3
Figura 3. Localización de la Galería de los Danzantes en el Edificio L y el Edificio J en Monte Albán.	4
Figura 4. Contraste entre la construcción original y la reconstrucción del siglo XX.	6
Figura 5. Esquema de las representaciones conocidas como Danzantes en la Galería de los Danzantes, Edificio L (tomado de Winter, 2011).	15
Figura 6. Varios ejemplos de las losas de conquista utilizadas en la construcción del Edificio J.	16
Figura 7. Dibujo del Edificio J a principios del siglo XIX hecho por Guillermo Dupaix (tomado de Robles-García <i>et al.</i> , 2009).	17
Figura 8. Ruinas de Monte Albán durante las primeras décadas del siglo XX (tomado de Caso, 1932).	18
Figura 9. Edificio J antes de la reconstrucción en 1936 (tomado de Balkansky, 1998).	19
Figura 10. Contraste entre el relleno prehispánico original (parte inferior) y el colocado durante la reconstrucción.	20
Figura 11. Colocación de la cubierta sobre la Galería de los Danzantes (tomado de Robles-García & Landa-Alarcón, 2009).	21
Figura 12. Mapa geológico de la zona del Valle de Oaxaca y de la zona arqueológica de Monte Albán.	22
Figura 13. Estratos de arenisca en la parte inferior en contacto con conglomerado/brecha calcárea en la parte superior.	25
Figura 14. Afloramiento de arenisca de grano medio-fino con finas capas de limolita intercaladas.	26
Figura 15. Capas de arenisca de grano fino con intercalaciones de limolita y horizontes de lutita.	26

Figura 16. Depósitos de tipo <i>slump</i> caracterizados por deformación interna.	27
Figura 17. Posible flujo detrítico (<i>debris flow</i>) arcilloso-calcáreo en la parte inferior. Nótese la deformación de las capas en la parte superior.	27
Figura 18. Complejo de transporte en masa conformado por <i>slumps</i> y flujos detríticos.	28
Figura 19. Ejemplo de la prueba de absorción capilar de agua en el plano XZ, es decir, con la laminación en forma vertical.	34
Figura 20. Ejemplo de la medición de expansión hídrica.	36
Figura 21. Grieta que atraviesa toda la estructura debido a la carga diferente entre ambos lados (Edificio J).	42
Figura 22. Ampolla probablemente generada por humedad, ya que no se observa cristalización de sal (Edificio J).	43
Figura 23. El bloque con laminación colocado de forma no paralela a la superficie del muro no presenta deslaminación.	44
Figura 24. Descamación en un bloque de arenisca de grano grueso-medio sin laminación.	45
Figura 25. Erosión diferencial por pérdida de componentes en un bloque de conglomerado calcáreo (Edificio J).	46
Figura 26. Microkarstificación en un bloque de conglomerado calcáreo con clastos de tamaño pequeño (Edificio J).	46
Figura 27. Punteado milimétrico denominado <i>pitting</i> . Puede estar relacionado con la colonización biológica de líquen.	47
Figura 28. Depósito de material de restauración (Edificio J).	48
Figura 29. Incrustación formada por la infiltración de agua y posterior precipitación de material.	49
Figura 30. Enmugrecimiento de la parte superior del muro debido a la escorrentía de agua de lluvia mezclada con partículas (Edificio J).	50
Figura 31. Colonización biológica de la roca por arañas y telarañas (Edificio J).	51
Figura 32. Colonización biológica de líquen sobre los bloques de roca y también en la mampostería debido a la presencia de humedad (Edificio J).	51
Figura 33. La colonización biológica de plantas y líquen en este caso se produce en la mampostería.	52

Figura 34. Esquema del Edificio J donde se muestra la división de las paredes usada en este trabajo para los mapeos litológicos y de daños.	53
Figura 35. A. Pared 1 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida.	55
Figura 36. A. Pared 2 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida.	58
Figura 37. A. Pared 3 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida.	60
Figura 38. A. Pared 4 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida.	63
Figura 39. A. Pared 5 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida.	65
Figura 40. A. Pared 6 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida.	67
Figura 41. A. Pared 7 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida.	69
Figura 42. A. Pared 8 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida.	71
Figura 43. A. Pared 9 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida.	72
Figura 44. A. Pared 10 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida.	74
Figura 45. A. Pared 11 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida.	77
Figura 46. A. Pared 12 de abajo del Edificio J con su orientación y ubicación.	79
Figura 47. A. Pared 12 de arriba del Edificio J con su orientación y ubicación.	81
Figura 48. A. Pared 13 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida.	83
Figura 49. A. Pared de la Galería de los Danzantes en el Edificio L. B. Mapeo litológico.	84
Figura 50. Difractogramas para las muestras de los afloramientos MA-A1, MA-A2 y MA-A3.	86

Figura 51. Difractogramas para las muestras MA-EA1, MA-EA2, MA-EA3 y MA-EA4.	87
Figura 52. Difractogramas para las muestras MA-EA5, MA-EA6, MA-EA7 y MA-EA8.	88
Figura 53. Diferentes tipos de cuarzos. A. Cuarzo policristalino de fábrica tectónica reconocible por sus contactos serrados (muestra MA-A2).	92
Figura 54. A. Microclina caracterizada por su maclado enrejado (muestra MA-EA6). B. Microclina deformada (muestra MA-EA5). C. Plagioclasa.	93
Figura 55. Variaciones en los líticos plutónicos. A. Lítico plutónico con cuarzo y feldespato (muestra MA-EA5). B. Lítico plutónico.	94
Figura 56. A y B. Líticos volcánicos félsicos (muestra MA-EA3 y MA-EA5 respectivamente).	95
Figura 57. A. Lítico sedimentario de caliza micrítica (muestra MA-EA7). B. Lítico sedimentario de caliza micrítica con un foraminífero.	95
Figura 58. Líticos metamórficos de origen sedimentario. A. Lítico metapelítico de grado 2 (muestra MA-EA5). B. Lítico metacarbonatado.	96
Figura 59. A. Lítico metafélsico de grado 1 (muestra MA-EA6). B. Lítico metafélsico de grado 3 (muestra MA-EA1). C. Lítico metabásico.	97
Figura 60. A-D. Cuatro diferentes tipos y cortes de foraminíferos bentónicos (A, B y D muestra MA-EA2. C muestra MA-EA3).	98
Figura 61. A. Fragmento de alga (muestra MA-EA2). B. Ooides simples dentro de cemento esparítico (muestra MA-EA2). C. Ostrácodo.	99
Figura 62. A. Mica, probablemente flogopita (muestra MA-EA7). B. Calcita bien cristalizada (muestra MA-EA2).	100
Figura 63. Valores de porosidad comparados con las diferentes litologías.	101
Figura 64. Valores de absorción de agua al vacío comparados con las diferentes litologías.	102
Figura 65. Histogramas con la distribución de radio de poro de todas las muestras.	103
Figura 66. Valores de absorción capilar en el plano XZ comparados con las diferentes litologías.	105
Figura 67. Valores de absorción capilar en el plano XY comparados con las diferentes litologías.	106

Figura 68. Valores durante el experimento de resistencia a la cristalización de sal para las muestras con pérdida de peso.	108
Figura 69. Evolución de las muestras MA-EA1, MA-EA2 y MA-EA3 durante el experimento de resistencia a la cristalización de sal.	109
Figura 70. Valores durante el experimento de resistencia a la cristalización de sal para las muestras con aumento de peso.	110
Figura 71. Evolución de las muestras MA-EA4, MA-EA5, MA-EA6 y MA-EA7 durante el experimento de resistencia a la cristalización de sal.	111
Figura 72. Pérdida de peso total para el experimento de resistencia a la cristalización de sal comparada con las diferentes litologías.	112
Figura 73. Relación entre porosidad y el porcentaje de cemento determinado con el conteo petrográfico.	122
Figura 74. Comparación entre el porcentaje de poros capilares y el valor máximo de absorción capilar promedio de los planos XZ y XY.	123
Figura 75. Relación entre porosidad y la pérdida máxima de peso. Nótese cómo estas propiedades varían de acuerdo con la litología.	124

Índice de tablas

	Página
Tabla 1. Experimentos y análisis realizados con cada una de las muestras de los afloramientos y del relleno del Edificio A.	10
Tabla 2. Resultado del conteo de 500 puntos de componentes minerales en las secciones delgadas de cada muestra.	90
Tabla 3. Valores de porosidad, densidad de matriz, densidad aparente y de la absorción de agua al vacío.	101
Tabla 4. Porcentaje de microporos y poros capilares obtenidos del experimento con el porosímetro de mercurio.	102
Tabla 5. Máxima cantidad de agua absorbida por capilaridad para los planos XZ (perpendicular a la laminación) y XY (paralelo a la laminación).	104
Tabla 6. Valores máximos de expansión hídrica para cada muestra con el tiempo necesario para alcanzarlos.	106
Tabla 7. Peso de las muestras para los diferentes ciclos del experimento de resistencia a la cristalización de sal.	107
Tabla 8. Cantidad de bloques mapeados con su respectiva litología para el Edificio J y la Galería de los Danzantes.	113

Resumen

Los edificios de la zona arqueológica de Monte Albán en Oaxaca, al estar compuestos por rocas, están sujetos al deterioro causado por agentes físicos, químicos, biológicos y antropogénicos, así como a los daños ocasionados por fenómenos naturales como los sismos. Este deterioro depende de las propiedades mineralógicas, petrográficas y petrofísicas de las rocas y también de la manera en la que están acomodadas en las fachadas y con los materiales de mampostería.

Para determinar de qué forma influyen estos factores se realizaron mapeos litológicos y de daños en dos edificios de Monte Albán: el Edificio J conocido como El Observatorio y en la Galería de los Danzantes del Edificio L. Estos mapeos son importantes herramientas para encontrar patrones en las formas de deterioro y para la planeación de trabajos de conservación y restauración. Se demostró que los conglomerados y conglomerados calcáreos son propensos a erosionarse y experimentar *pitting*. Por otra parte, el desprendimiento está más relacionado con el acomodo de los bloques, de la laminación y por el área expuesta a la intemperie. Se determinó que el enmugrecimiento es el daño que ocupa la mayor superficie en el Edificio J. Además, los materiales de mampostería controlan la distribución de la colonización biológica, incrustaciones y eflorescencias.

En cuanto a las propiedades mineralógicas y petrofísicas de las rocas, se realizó un estudio petrográfico, difracción de rayos X y el cálculo de porosidad, densidad, distribución de radio de poro, absorción total y capilar de agua, expansión hídrica y resistencia a la cristalización de sal en muestras de afloramientos y rocas del relleno del Edificio A, las cuales representan adecuadamente las propiedades de los monumentos seleccionados ya que fueron construidos con el mismo tipo de roca.

Los resultados indican que las rocas más porosas son los conglomerados y conglomerados calcáreos, aunque en general la porosidad es baja, ya que no supera el 6 % debido al cemento de carbonato de calcio. Esta porosidad baja influye en las demás propiedades, haciendo que las rocas no tengan una gran absorción de agua, evitando así expansión hídrica y el ingreso de sales.

Abstract

The buildings of the archaeological zone of Monte Albán in Oaxaca, being composed of rocks, are subject to deterioration caused by physical, chemical, biological and anthropogenic agents, as well as damage caused by natural phenomena such as earthquakes. The deterioration depends on the mineralogical, petrographic and petrophysical properties of the rocks, also on the way they are arranged in the facades and the masonry materials.

To determine how is the influence of these factors, lithological and deterioration mappings were carried out in two buildings in Monte Albán: Building J known as El Observatorio and Galería de los Danzantes in Building L. These mappings are important to find patterns in deterioration and for the planning of conservation and restoration works. Results show that rocks such as conglomerates and calcareous conglomerates are prone to erosion and *pitting*. On the other hand, detachment is more related to the arrangement of the blocks, the lamination and the area exposed. Soiling was determined to be the most widespread damage in Building J. Additionally, masonry materials control the distribution of biological colonization, encrustation and efflorescence.

A petrographic study, X-ray diffraction and several petrophysical tests were carried out (porosity, density, pore radii distribution, capillary water absorption, water absorption by total immersion, hydric expansion and salt crystallization strength) in samples of outcrops and rocks from Building A, which adequately represent the properties of the Building J y L since they were built with the same type of rock.

The results indicate that the most porous rocks are the calcareous conglomerates and conglomerates, although the porosity is low, since it does not exceed 6% due to the calcium carbonate cement. This low porosity influences other properties, causing the rocks not to have a great water absorption, thus preventing hydric expansion and the entry of salts into pores.

Introducción

Por todo el mundo, la mayoría de los monumentos históricos y muchos de los edificios recientes han sido construidos a partir de rocas naturales de construcción (Siegesmund & Török, 2014). Este tipo de rocas han sido utilizadas debido a su cercanía, accesibilidad (Snethlage, 2014a) y por su durabilidad, lo cual implica que cuentan con las propiedades físicas adecuadas para poder resistir fenómenos como la meteorización (Siegesmund & Dürrast, 2014).

En México, las rocas dimensionables son uno de los materiales más usados en las construcciones patrimoniales (Padilla-Ceniceros *et al.*, 2017) que incluyen monumentos y sitios arqueológicos como Monte Albán, Oaxaca (Fig. 1).



Figura 1. Plaza Principal de la zona arqueológica de Monte Albán, Oaxaca, con el Edificio J en el centro. Vista desde la Plataforma Sur.

Estas construcciones que forman parte del patrimonio cultural experimentan diversos patrones de deterioro que dependen de las propiedades físicas, mecánicas, mineralógicas y de las estructuras de las rocas, por ejemplo, laminación sedimentaria. Las propiedades físicas más importantes son: densidad, porosidad,

distribución del tamaño de poro, absorción de agua por capilaridad y por inmersión total, difusión de vapor de agua, conductividad termal, expansión termal, velocidad de onda y resistencia a diferentes parámetros como la compresión, tensión, flexión, abrasión y a la cristalización de sal (Siegesmund & Dürrast, 2014).

Las propiedades físicas mencionadas se pueden evaluar con experimentos petrofísicos, como lo han hecho numerosos investigadores en rocas de construcción en México, por ejemplo: evaluación de expansión hídrica (López-Doncel *et al.*, 2013; Wedekind *et al.*, 2013), determinación de la resistencia a la cristalización de sal y expansión termal (López-Doncel *et al.*, 2016, 2018), absorción de agua y resistencia a la compresión (Wedekind *et al.*, 2011; Pötzl, 2015; Molina-Maldonado, 2016; Padilla-Ceniceros *et al.*, 2017; Martínez-Martínez *et al.*, 2018). Además de estas pruebas, se pueden llevar a cabo métodos indirectos no invasivos que son importantes porque no destruyen el patrimonio cultural para cuantificar el grado de deterioro. Ejemplos de este tipo de estudios son los realizados en México por Mora-Navarro (2015), Orenday-Tapia *et al.* (2018) y Méndez-Gaona (2020). Finalmente, los mapeos litológicos y de deterioro de las rocas de las fachadas de las construcciones son importantes herramientas para encontrar patrones en los tipos de daño y para la planeación durante trabajos de conservación y restauración (Goudie & Viles, 2010; Siedel & Siegesmund, 2014; Snethlage, 2014b).

Para este trabajo de tesis se seleccionó la zona arqueológica de Monte Albán que se encuentra aproximadamente a 10 km al suroeste de la ciudad de Oaxaca de Juárez, en el estado de Oaxaca, México (Fig. 2). Fue fundado en la cima de un cerro en el centro del Valle de Oaxaca por los zapotecas alrededor de 500 a. C. y fue abandonado en 900 d. C., pero continuó su uso como una ciudad mortuoria (Gunn & Adams, 1981; Spencer *et al.*, 2008; Martínez-Lira & Corona-Martínez, 2016; Carter, 2017; Campagno, 2019; Ortega-Avilés *et al.*, 2020). Para su establecimiento fue necesario nivelar el terreno, utilizando las rocas extraídas, esencialmente rocas sedimentarias de la Formación Jaltepetongo (Williams & Heizer, 1965; Herrera *et al.*, 1999; Loaeza-García & Mendoza-Torres, 2007; Duverger & Letouzé, 2017), para construir diferentes tipos de edificios, plataformas ceremoniales, plazas y complejos funerarios (Fig. 3) (ICOMOS, 1987; Blanton *et al.*, 2005; Elson & Sherman, 2007;

Blomster, 2008; Blomster & Glascock, 2011; World Heritage Committee, 2013; Gendron *et al.*, 2019).

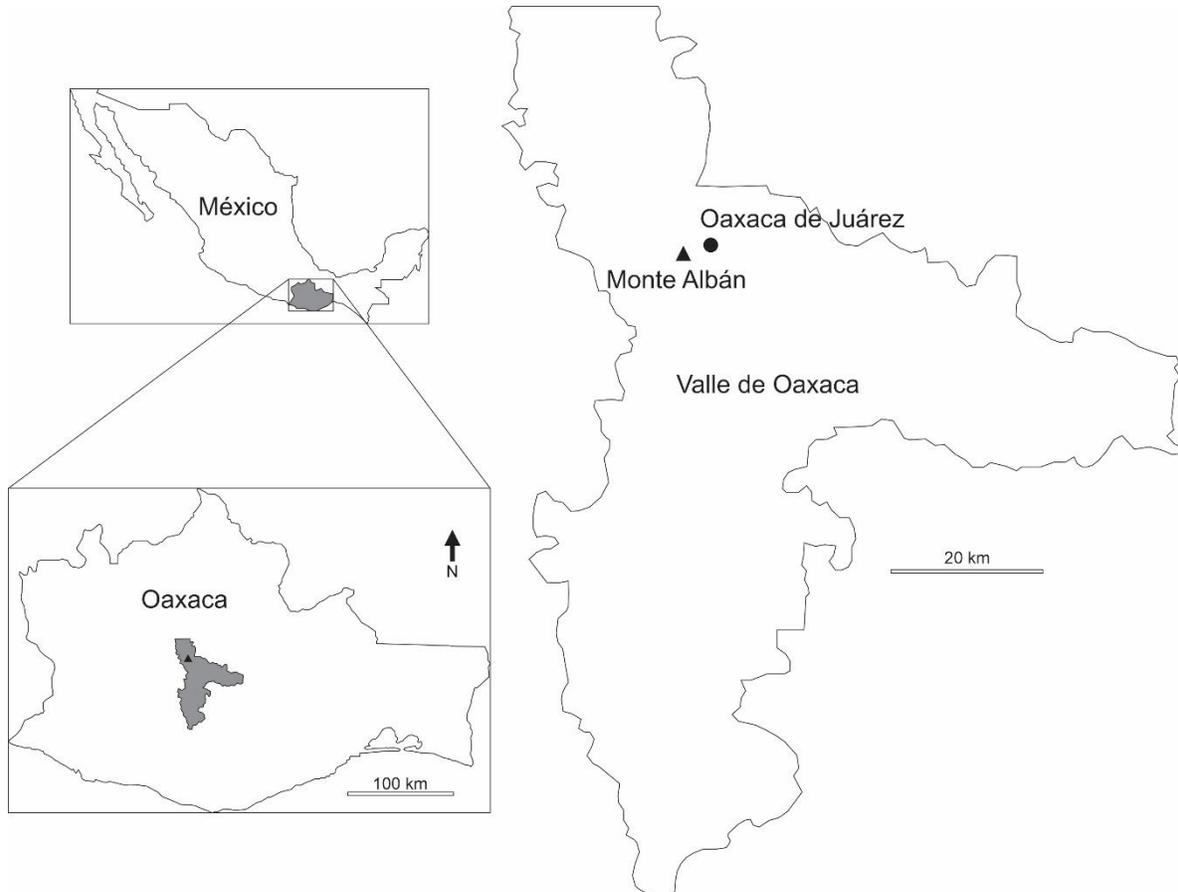


Figura 2. Localización de Monte Albán en el estado de Oaxaca y en el área del Valle de Oaxaca (modificado de Feinman & Nicholas, 2016 y Campagno, 2019).

Conocer el tipo de litología y los daños que presentan las construcciones de Monte Albán es indispensable para planear labores de conservación y restauración, por lo que se seleccionaron el Edificio J (Fig. 3) y la llamada Galería de los Danzantes en el Edificio L (Fig. 3). Además, con petrografía y experimentos petrofísicos de rocas tomadas de afloramientos alrededor de Monte Albán y de rocas de relleno de los edificios, se puede determinar cómo influyen las diferentes propiedades en el tipo de deterioro.

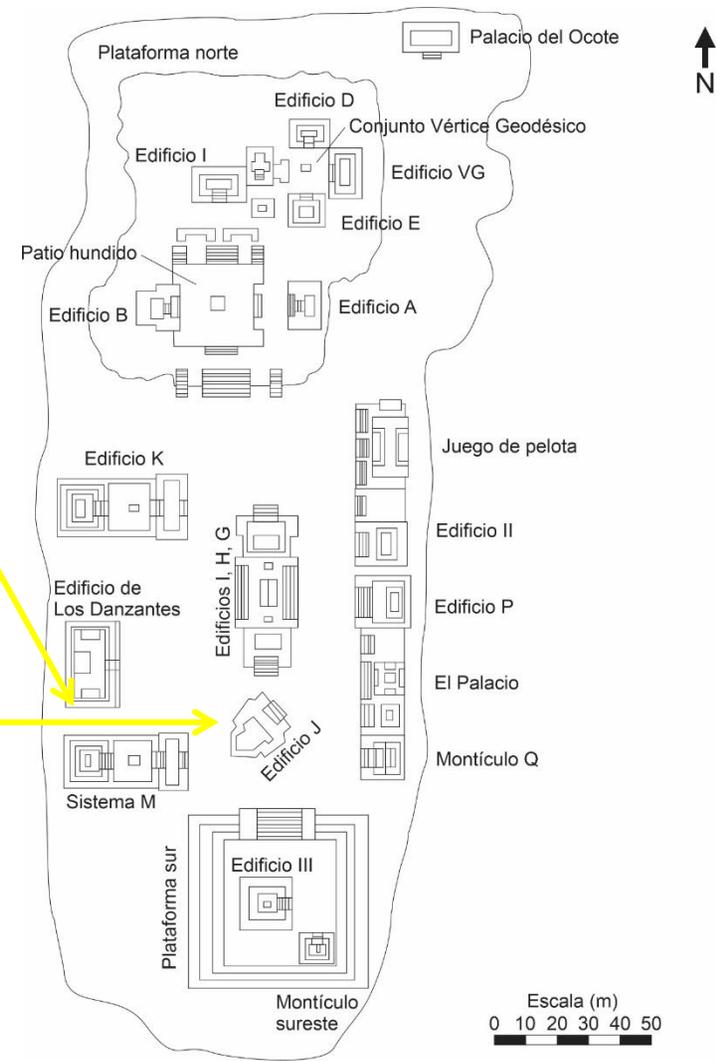


Figura 3. Localización de la Galería de los Danzantes en el Edificio L y el Edificio J en Monte Albán. Plano de Monte Albán modificado de Fahmel-Beyer (2005).

1. Generalidades

1.1. Justificación del trabajo

En la zona arqueológica de Monte Albán se construyeron monumentos con rocas dimensionables que, a lo largo de toda su historia, han experimentado deterioro por procesos de meteorización, situación que continúa en la actualidad. Debido a la existencia de estos fenómenos, es indispensable que se efectúen trabajos de conservación y restauración en los edificios. Además, Monte Albán fue designado como Patrimonio de la Humanidad en 1987 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, UNESCO) (ICOMOS, 1987; Charlton *et al.*, 2009), por lo que su conservación debería apegarse a los estándares mundiales.

Por estas razones, en primer lugar, es necesario identificar el tipo de roca con el que están contruidos los edificios de Monte Albán, llevar a cabo un registro detallado de los daños y, en segundo lugar, realizar experimentos petrofísicos. Esto permitirá obtener la relación entre la litología y el deterioro para que, en futuras restauraciones o reconstrucciones, se elijan los bloques de roca con la mayor durabilidad o las propiedades físicas más apropiadas. De esta manera, mediante el conocimiento geológico de este material principal de construcción y otras disciplinas, se puede planificar adecuadamente la conservación de la zona arqueológica de Monte Albán.

1.2. Hipótesis

Durante la reconstrucción de los edificios de Monte Albán en las primeras décadas del siglo XX se volvieron a utilizar las mismas rocas con las que se habían construido originalmente (Robles-García *et al.*, 2009), sin embargo, los bloques se posicionaron de forma diferente (Fig. 4). Por lo tanto, la hipótesis propuesta es que el acomodo de las rocas está condicionando los patrones de deterioro. Además de este factor, otros elementos que pudieran estar relacionados son el tipo de roca, las estructuras sedimentarias, el relleno y los materiales de mampostería.



Figura 4. Contraste entre la construcción original y la reconstrucción del siglo XX (identificable por la técnica de rejoneo o rajueleo que involucra la colocación entre los bloques de pequeñas rocas) (Robles-García *et al.*, 2009) en el Edificio J marcado por la línea negra.

En el caso del Edificio J, ha tenido varias etapas de reconstrucción y restauraciones, entre las más actuales están las realizadas debido a los daños ocasionados por el sismo del 30 de septiembre de 1999 (Bautista-Hernández *et al.*, 2009). Dependiendo de las paredes que fueron tratadas, se espera que haya diferencias

entre el deterioro de las fachadas no restauradas y las restauradas. Debido a esto mismo, se espera que los daños entre el Edificio J y en la Galería de los Danzantes sean diferentes. Aún más, la Galería de los Danzantes fue techada como medida para evitar su exposición a los agentes climáticos, lo cual es un factor que posiblemente afecte los patrones de deterioro.

1.3. Objetivos

Uno de los objetivos principales de este trabajo es identificar y describir el tipo de roca usado en los monumentos del sitio arqueológico de Monte Albán, así como los principales tipos de daños e intensidad del deterioro que muestran las rocas con base en el estudio de dos edificios representativos de la zona: el Edificio J y una parte del Edificio L, la Galería de los Danzantes.

También se tiene como objetivo determinar las características petrofísicas y petrográficas de las rocas utilizadas en los edificios de Monte Albán y de los afloramientos de los que fueron obtenidas.

1.4. Metas

Las metas planteadas para la realización de las actividades de esta tesis fueron:

Reconocer los diferentes tipos de rocas usadas en el Edificio J y en la Galería de los Danzantes para realizar un mapeo litológico detallado.

Identificar los tipos de daños en las fachadas de ambos monumentos con la finalidad de hacer un mapeo del deterioro de las paredes de ambos edificios.

Encontrar el sitio probable de donde se extrajeron las rocas usadas para la construcción de los edificios de Monte Albán.

Obtener muestras de los edificios y de los afloramientos para efectuar análisis de difracción de rayos X, hacer láminas delgadas y cortar cubos de las rocas para llevar a cabo pruebas petrofísicas.

Identificar los constituyentes minerales principales realizando un análisis petrográfico y hacer un conteo de 500 puntos en una lámina delgada de cada muestra.

Hacer experimentos petrofísicos de densidad, porosidad, distribución de radio de poro, absorción de agua por inmersión total y por capilaridad, expansión hídrica y resistencia a la cristalización de sal con cubos de las muestras.

Integrar los resultados de todos los mapeos con las propiedades de las rocas para identificar los factores que controlan el deterioro.

1.5. Materiales y métodos

Para realizar el mapeo litológico, el primer paso fue tomar fotografías de cada pared del Edificio J y en la Galería de los Danzantes del Edificio L. Dichas fotografías se imprimieron para registrar cada cambio litológico observado. Se tomaron en cuenta las variaciones en el tamaño de grano, desde conglomerado y conglomerado calcáreo hasta arenisca de grano fino y limolita, además de estructuras sedimentarias como laminación y otros componentes que estaban presentes, por ejemplo, calcita recristalizada en fracturas.

El mapeo de daños involucró el registro de cada forma diferente de deterioro tomando como base el criterio del glosario ilustrado del *International Council on Monuments and Sites-International Scientific Committee for Stone* (ICOMOS-ISCS) (2011), el cual divide los daños en cinco tipos: grietas y deformación, alteración cromática y depósito, rasgos inducidos por la pérdida de material, desprendimiento y colonización biológica. Cada uno se subdivide en más formas, pero en el mapeo de deterioro solo se representaron los daños que abarcan una mayor superficie. La definición y las características de cada forma de daño se incluyen en el Capítulo 4: Deterioro de las rocas de construcción de Monte Albán; causas y efectos.

La importancia de estos mapeos, el litológico y de daños, radica en que juntos proporcionan una herramienta para determinar si un tipo de roca es más propenso

a experimentar cierto tipo de daño (Goudie & Viles, 2010; Siedel & Siegesmund, 2014, Snethlage, 2014b).

Una meta de este trabajo fue encontrar los afloramientos posibles de donde se extraían las rocas usadas para construir Monte Albán, por lo que se hizo un recorrido alrededor de la zona arqueológica y se ubicaron varios afloramientos con rocas similares a las identificadas en los edificios. De estos se tomaron muestras de arenisca de grano grueso y medio (MA-A1), conglomerado calcáreo de grano fino (MA-A2) y conglomerado calcáreo de grano grueso (MA-A3). Además, el personal de la zona arqueológica de Monte Albán donó ocho muestras del relleno del Edificio A que se encuentra en reparación por los daños causados por los sismos de septiembre de 2017. Estas rocas del relleno son del mismo tipo que las que se encuentran en el Edificio J y en la Galería de los Danzantes, por lo que los resultados obtenidos de las pruebas hechas a estas muestras son aplicables a dichos edificios, ya que lo que se requirió fue analizar sus características petrofísicas y petrográficas, mientras que el deterioro fue definido con base en los mapeos de daños. Las muestras donadas fueron conglomerado calcáreo de grano grueso (MA-EA1), conglomerado calcáreo de grano fino (MA-EA2), conglomerado (MA-EA3), conglomerado con arenisca de grano grueso (MA-EA4), arenisca de grano grueso (MA-EA5), arenisca de grano grueso y medio (MA-EA6) y arenisca de grano medio (MA-EA7, MA-EA8). Todo este material fue empleado para la realización de difracción de rayos X, petrografía y experimentos petrofísicos (Tabla 1).

Para la difracción de rayos X se pulverizó una parte de las muestras y se analizaron con un difractómetro Bruker D8 Advance en el Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). Otra parte fue utilizada para la elaboración de láminas delgadas y de esta manera realizar un estudio petrográfico mediante un conteo de 500 puntos con el método de Gazzi-Zuffa propuesto por Weltje (2002). Los líticos metamórficos fueron identificados de acuerdo con la clasificación de Garzanti & Vezzoli (2003) que toma en cuenta el desarrollo de la orientación de los cristales y el crecimiento de micas para dividir la evolución del grado de metamorfismo.

Tabla 1. Experimentos y análisis realizados con cada una de las muestras de los afloramientos y del relleno del Edificio A.

Muestra	Tipo de roca	Densidad	Porosidad	Distribución de tamaño de poro	Absorción capilar	Expansión hídrica	Resistencia a la cristalización de sal	Petrografía	Difracción de rayos X
MA-A1	Arenisca de grano grueso y medio	-	-	-	-	-	-	✓	✓
MA-A2	Conglomerado calcáreo de grano fino	-	-	-	-	-	-	✓	✓
MA-A3	Conglomerado calcáreo de grano grueso	-	-	-	-	-	-	✓	✓
MA-EA1	Conglomerado calcáreo de grano grueso	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MA-EA2	Conglomerado calcáreo de grano fino	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MA-EA3	Conglomerado	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MA-EA4	Conglomerado y arenisca de grano grueso	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
MA-EA5	Arenisca de grano grueso	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MA-EA6	Arenisca de grano grueso y medio	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MA-EA7	Arenisca de grano medio	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MA-EA8	Arenisca de grano medio	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓

Para los experimentos petrofísicos, se cortaron cubos de 6.5 cm x 6.5 cm de las muestras, de acuerdo con los estándares de estas pruebas (Siegesmund & Dürrast, 2014). Los experimentos petrofísicos realizados fueron: densidad, porosidad, distribución de tamaño de poro y absorción de agua por inmersión total (DIN 52102) (DIN, 2013), absorción de agua por capilaridad (DIN EN ISO 15148) (DIN, 2018), expansión hídrica con especímenes de 1.5 cm de ancho y 10 cm de largo según el procedimiento de López-Doncel *et al.* (2013) y resistencia a la cristalización de sal (DIN EN 12370) (DIN, 1999). Todas las pruebas fueron efectuadas en el laboratorio de petrofísica del Instituto de Geología de la UASLP, a excepción de la distribución de tamaño de poro que fue llevado a cabo en el Centro de Geociencias de la Universidad de Göttingen (*Geowissenschaftliches Zentrum Göttingen*), Alemania. Los detalles de estos experimentos se encuentran en el Capítulo 3: Propiedades geológicas, físicas y químicas de las rocas de construcción de Monte Albán.

2. Marco histórico y geológico de Monte Albán

2.1. Monte Albán: fundación y posterior abandono

Monte Albán se fundó alrededor del año 500 a. C. durante la fase denominada Monte Albán I temprana (500-300 a. C.). A partir de su fundación, se convirtió en el centro administrativo y militar más grande de la región (Blanton *et al.*, 1979; O'Brien *et al.*, 1980; O'Brien & Lewarch, 1992; McCafferty & McCafferty, 1994; Fargher, 2007; Feinman & Nicholas, 2016; Campagno, 2019; Sherman *et al.*, 2019). Es durante este período que se comenzó el proceso de urbanización nivelando el terreno y la construcción de edificios en la Plaza Principal, específicamente la estructura de los Danzantes que consiste en más de 300 rocas talladas que muestran prisioneros asesinados (Marcus, 1974; Feinman *et al.*, 1985; Montaña-Perches, 2003; Blanton *et al.*, 2005; Winter, 2011).

El crecimiento de la población y la economía de la ciudad continuó durante la transición hacia la fase Monte Albán I tardía (300-200 a. C.) (Blanton *et al.*, 1979; Feinman *et al.*, 1985; O'Brien & Lewarch, 1992; Sherman *et al.*, 2010; Feinman & Nicholas, 2017). Este tiempo de desarrolló implicó la incorporación y subyugación de políticas rivales en el Valle de Oaxaca (Spencer & Redmond, 2001; Elson & Sherman, 2007; Redmond & Spencer, 2012; Spencer, 2019).

Durante la siguiente fase, Monte Albán II (200 a. C.-200 d. C.), existió un declive demográfico en el área central del valle, pero Monte Albán aún era el centro dominante, mucho más grande y arquitectónicamente más complejo que cualquier otro asentamiento. En este período se alzaron murallas defensivas alrededor de la ciudad, se construyeron templos, terrazas, un sistema de presas, conductos, el palacio real, el juego de pelota y se cubrieron varios edificios de estuco (Blanton *et al.*, 1979; Feinman *et al.*, 1985; ICOMOS, 1987; Balkansky, 1998; Elson & Sherman, 2007; Spencer *et al.*, 2008; Campagno, 2019; Sherman *et al.*, 2019). También se construyó el Edificio J, el cual mostraba los límites territoriales en las inscripciones de las losas de conquista (Peeler & Winter, 1995; Winter, 2001; Spencer & Redmond, 2004; Redmond & Spencer, 2008; Spencer, 2019).

En los años siguientes, en la fase Monte Albán IIIA (200-450 d. C.), el centro todavía era la zona con la mayor población en el valle, pero, a diferencia de los períodos anteriores, la región no estaba dominada demográficamente por un solo centro (Blanton *et al.*, 1979; Feinman *et al.*, 1985).

Para la fase Monte Albán IIIB (450-650 d. C.), la ciudad alcanzó su máximo crecimiento en población y su arquitectura era más compleja: los edificios públicos estaban acomodados en un eje norte-sur con dos enormes plataformas en los extremos de la Plaza Principal y algunos fueron modificados o agrandados, nuevas estelas y losas talladas fueron creadas, mientras que esculturas antiguas, como los danzantes, fueron movidas y reutilizadas. Sin embargo, en la siguiente fase, Monte Albán IV (650-900 d. C.), el centro fue casi totalmente abandonado, la construcción cesó y ocurrió una reorganización política en el valle (Blanton *et al.*, 1979; Feinman *et al.*, 1985; Winter, 2001; Adams, 2005).

Finalmente, durante la fase Monte Albán V, que abarca desde 900 d. C. hasta la llegada de los españoles, el valle estaba organizado de forma completamente distinta, ya no existía una capital política y ningún otro centro dominó la región como lo hizo Monte Albán en los períodos anteriores (Blanton *et al.*, 1979; Feinman *et al.*, 1985; McCafferty & McCafferty, 1994; Winter, 2001; Nichols *et al.*, 2008; Feinman & Nicholas, 2017). Aun así, Monte Albán siguió siendo utilizado, pero como una ciudad mortuoria (Gunn & Adams, 1981; ICOMOS, 1987; Ortega-Avilés *et al.*, 2020).

2.2. Los Danzantes, Edificio L

El Edificio L está localizado en la parte suroeste de la Plaza Principal de Monte Albán y está caracterizado por figuras talladas en losas de roca conocidas como Danzantes (Marcus, 1974; Blanton *et al.*, 2005). Es reconocido como una de las construcciones más antiguas presentes en la Plaza Principal de Monte Albán (Bautista-Hernández *et al.*, 2009).

Se han sugerido varias interpretaciones como que representan a nadadores, danzantes (de ahí su nombre) o personas con diversas patologías. Sin embargo, la

pose de las extremidades, la boca abierta y los ojos cerrados parecen indicar que representan cadáveres de jefes asesinados por los gobernantes de Monte Albán (Marcus, 1974; O'Brien & Lewarch, 1992; Nichols *et al.*, 2008). Todos los individuos están desnudos, la mayoría tiene los órganos reproductivos mutilados y con sangre saliendo en varios patrones, sugiriendo la representación de enemigos muertos y torturados (Adams, 2005; Blanton *et al.*, 2005; Redmond & Spencer, 2012).

Hay cerca de 310 danzantes que en su mayoría fueron creados durante la fase Monte Albán I (O'Brien & Lewarch, 1992). Fue entonces durante la ocupación inicial de Monte Albán en la que se dedicó mayor esfuerzo a tallar las figuras, probablemente debido a que los gobernantes necesitaban legitimar su posición y al hacer una gran galería de prisioneros, fueron capaces de convencer a sus enemigos y a su propia población de su poder (Marcus, 1974).

Una gran proporción de danzantes fueron reusados en la construcción de otras estructuras durante los períodos Monte Albán II y III (Marcus, 1974; ICOMOS, 1987; Montaña-Perches, 2003; Winter, 2006). A pesar de su significado, algunas losas de danzantes se convirtieron en simples rocas de construcción, valiosas solo por su gran tamaño y su forma, se ignoró su superficie tallada y fue ocultada. Sin embargo, otras fueron puestas en puntos especiales como esquinas, en el centro de las paredes y en las bases de edificios. Esto probablemente se debe a que se les consideraba como portadoras de poderosas fuerzas sobrenaturales que aseguraban el favor de las deidades, sin importar que estuvieran cubiertas por estuco (Scott, 1978; Forde, 2020).

En la Galería de los Danzantes están acomodados en cuatro filas (Fig. 5): en la fila inferior todas las figuras están mirando hacia la izquierda, en la segunda fila los danzantes están de manera horizontal o recostados, en la tercera todas las tallas miran a la derecha y en la fila superior los danzantes vuelven a estar de forma horizontal. Los danzantes en esta parte pueden ser datados al período Monte Albán I (450 a. C.) (Marcus, 1974).

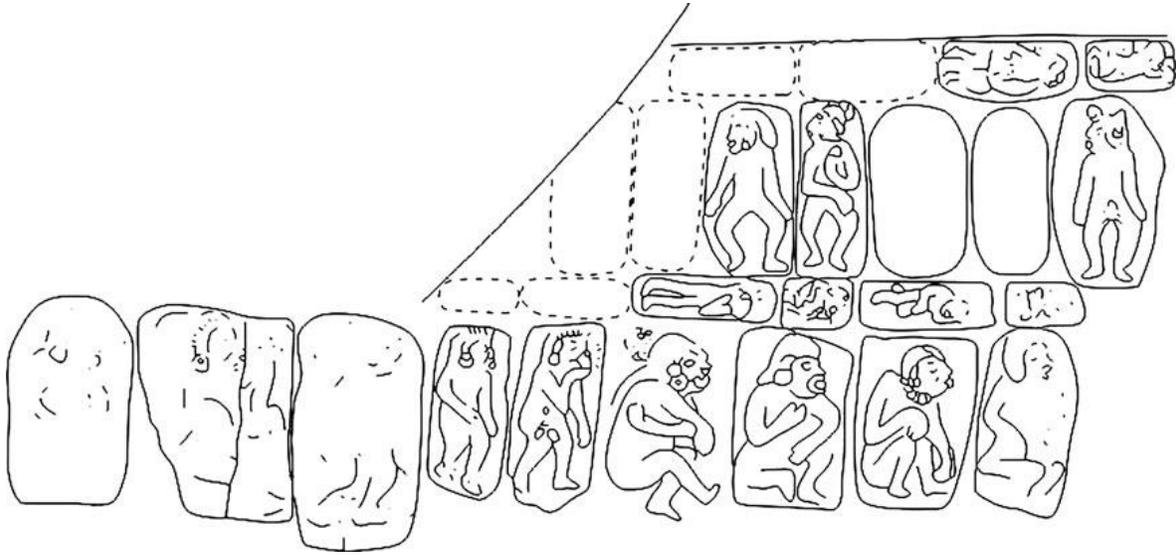


Figura 5. Esquema de las representaciones conocidas como Danzantes en la Galería de los Danzantes, Edificio L (tomado de Winter, 2011).

2.3. El Observatorio, Edificio J

El Edificio J se ubica en el centro de la Plaza Principal de Monte Albán, entre la Plataforma Sur y el complejo de los edificios G, H e I. Se le considera de gran importancia por su forma característica de punta de flecha y por su orientación hacia el noreste, lo cual difiere de todas las demás construcciones que se orientan norte-sur o este-oeste. Se cree que pudo haber sido utilizado como punto de medición, observatorio o como un templo dedicado al calendario (Adams, 2005; Bautista-Hernández *et al.*, 2009; Redmond & Spencer, 2012; Carter, 2017).

El Edificio J tiene muchas losas talladas, de las cuales más de la mitad pertenecen al período Monte Albán II (200 a. C.-100 d. C.), es decir, son contemporáneas a la construcción de este edificio (Adams, 2005; Winter, 2006; Redmond & Spencer, 2012). Se cree que estas rocas talladas, conocidas como lápidas de conquista, muestran la historia bélica, conquista y dominio de Monte Albán sobre otras comunidades del valle (Fig. 6) (Feinman *et al.*, 1985; Winter, 2001). Para su construcción también se reusaron bloques grabados de danzantes del Edificio L (Scott, 1978; Bautista-Hernández *et al.*, 2009; Carter, 2017; Forde, 2020). Las lápidas de conquista difieren de los danzantes en que muestran un patrón repetitivo de glifo que indica el nombre del lugar conquistado (Montaño-Perches, 2003).



Figura 6. Varios ejemplos de las losas de conquista utilizadas en la construcción del Edificio J. Nótese el grabado diferente comparado con los Danzantes.

2.4. Descubrimiento, reconstrucción y restauración de Monte Albán

La primera descripción de las ruinas de Monte Albán fue publicada por el capitán belga Guillermo Dupaix a inicios del siglo XIX quien descubrió cinco rocas grabadas conocidas posteriormente como Danzantes (Fahmel-Beyer, 2005; Robles-García *et al.*, 2009) y documentó el Edificio J (Fig. 7) (Bautista-Hernández *et al.*, 2009).

Con la llegada de Leopoldo Batres en 1902 se inicia en Monte Albán la arqueología oficial. Realizó excavaciones en tumbas y algunos edificios, entre estos el Edificio L donde expuso las losas de los Danzantes (Fahmel-Beyer, 2005, 2017). A pesar de sus aportes, los trabajos de Leopoldo Batres han sido severamente criticados por los restauradores contemporáneos ya que reconstruyó grandes fragmentos de edificios sin contar con datos confiables ni técnicas que asegurasen la estabilidad de las estructuras. Por ejemplo, Alfonso Caso criticó la limpieza, exploración y consolidación de los edificios, ya que los muros restaurados en el Edificio L no se

sostuvieron durante los terremotos de los años 1928 y 1931 (Bautista-Hernández *et al.*, 2009; Robles-García *et al.*, 2009).



Figura 7. Dibujo del Edificio J a principios del siglo XIX hecho por Guillermo Dupaix (tomado de Robles-García *et al.*, 2009).

La exploración de la Plaza Principal inició en 1931 por Alfonso Caso junto con un grupo de profesionistas (Figs. 8 y 9) (Robles-García & Corbett, 2018). Fue durante esta temporada que se descubrió la Tumba 7, siendo uno de los hallazgos arqueológicos más famosos (Caso, 1932), el cual incluye cerca de 500 objetos de oro, plata, cobre, jade, cristales, obsidiana y perlas (McCafferty & McCafferty, 1994; Feinman & Nicholas, 2016; Fahmel-Beyer, 2017; Ortega-Avilés *et al.*, 2020). Por esta razón, las exploraciones en Monte Albán se extendieron por 18 temporadas continuas en las que se restauraron cerca de 20 edificios, residencias, tumbas y dos juegos de pelota (Robles-García *et al.*, 2009).

Alfonso Caso y su equipo diferenciaron las partes reconstruidas de aquellas que originalmente fueron encontradas mediante la técnica de integrar en las juntas de los bloques una sucesión de pequeñas rajuelas de roca, técnica denominada rejoneo o rajuleo (Scott, 1978; Robles-García *et al.*, 2009).

En 1970 la investigación del sitio prosiguió con Richard Blanton y Kent Flannery. El resultado de sus trabajos es un mapa topográfico con todas las estructuras, el cual sirvió como base para la delimitación de la zona arqueológica por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) (Robles-García *et al.*, 2009).



Figura 8. Ruinas de Monte Albán durante las primeras décadas del siglo XX (tomado de Caso, 1932).



Figura 9. Edificio J antes de la reconstrucción en 1936 (tomado de Balkansky, 1998).

En 1994 se inicia otro proyecto de excavaciones en Monte Albán. Sin embargo, para la restauración se hizo caso omiso de la normativa nacional e internacional, ya que se empleó cemento excesivamente y varillas de acero para estructurar esquinas, además de que no se dejaron informes detallados sobre los trabajos de restauración (Robles-García *et al.*, 2009).

El 30 de septiembre de 1999 ocurrió un terremoto producto de la subducción de la Placa de Cocos debajo de la Placa de Norteamérica y la actividad sísmica relacionada con fallas intraplaca (Garduño-Monroy *et al.*, 2019). El daño se concentró en el estado de Oaxaca y en la ciudad de Oaxaca de Juárez, alrededor de 270 estructuras, entre ellas edificios históricos, iglesias y sitios arqueológicos como Mitla y Monte Albán (Singh *et al.*, 2000; Robles-García, 2009).

Como consecuencia de dicho sismo, varios muros del Edificio J experimentaron graves daños, siendo los más notorios las grietas. Esto se debe a la mala colocación, falta de compactación y poca estabilización del relleno en la base durante la reconstrucción (Fig. 10) (Bautista-Hernández *et al.*, 2009).



Figura 10. Contraste entre el relleno prehispánico original (parte inferior) y el colocado durante la reconstrucción efectuada por el equipo de Alfonso Caso (parte superior) (tomado de Bautista-Hernández *et al.*, 2009).

También durante el sismo, en algunas partes del Edificio L se generaron grietas y fracturas (Bautista-Hernández *et al.*, 2009), por lo que tuvo varias intervenciones, una de ellas fue la instalación de una cubierta para la galería de piezas originales de los Danzantes para evitar deterioro por agentes meteorológicos en el futuro (Fig. 11) (Robles-García & Landa-Alarcón, 2009).



Figura 11. Colocación de la cubierta sobre la Galería de los Danzantes (tomado de Robles-García & Landa-Alarcón, 2009).

2.5. Marco geológico regional

El Valle de Oaxaca, donde afloran las rocas sobre las que se construyó Monte Albán, se sitúa sobre una parte de los terrenos Oaxaca y Juárez (Fig. 12) (González-Ramos *et al.*, 2000; Urrutia-Fucugauchi & Ferrusquía-Villafranca, 2001).

En la zona del valle, el Terreno Oaxaca se compone de un basamento denominado Complejo Oaxaqueño conformado por rocas con un alto grado de metamorfismo como ortogneis, paragneis, charnockita, metaanortosita, entre otras, con edades del Proterozoico (Patchett & Ruiz, 1987; Keppie *et al.*, 2001, 2003; Solari *et al.*, 2003). Este complejo es cortado por el granitoide Etlá (Alaniz-Álvarez *et al.*, 1994; Urrutia-Fucugauchi & Ferrusquía-Villafranca, 2001; Ortega-Obregon *et al.*, 2003).

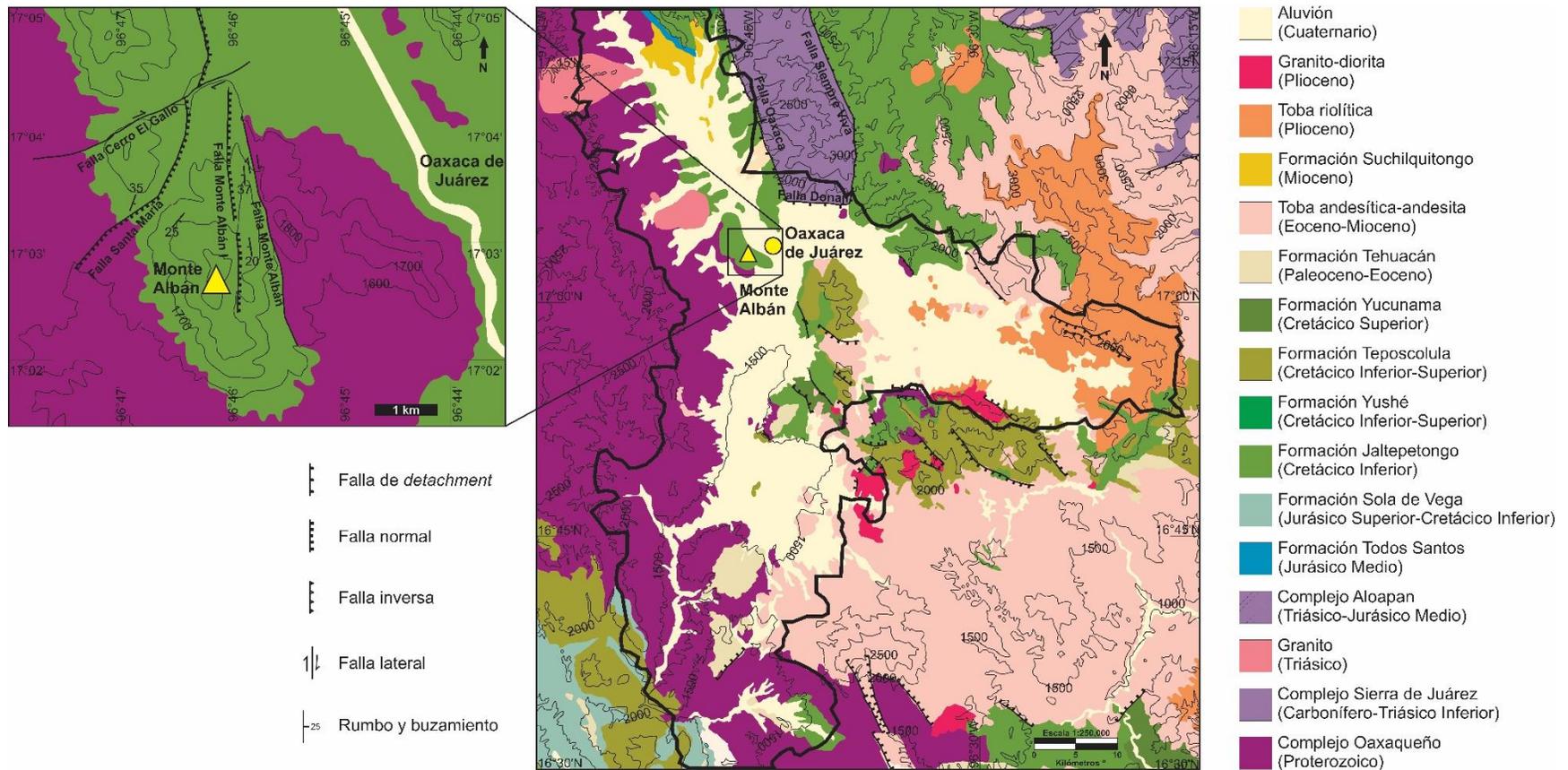


Figura 12. Mapa geol3gico de la zona del Valle de Oaxaca y de la zona arqueol3gica de Monte Alb3n (modificado de Gonz3lez-Ramos *et al.*, 2000, S3nchez-Rojas *et al.*, 2000 y Loaeza-Garc3a & Mendoza-Torres, 2007).

El Paleozoico del Terreno Oaxaca está representado por varias formaciones de rocas sedimentarias marinas con abundantes fósiles que no afloran en el Valle de Oaxaca, sino más hacia al norte: Formación Tiñú (Cámbrico-Ordovícico Inferior), Formación Santiago (Mississippiano Inferior), Formación Ixtaltepec (Pennsylvaniano Inferior-Medio) y Formación Yododeñe (Pennsylvaniano Superior-Triásico) (Pantoja-Alor & Robison, 1967; Robison & Pantoja-Alor, 1968; López-Ticha, 1985; Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1995; Quiroz-Barroso & Perrilliat, 1997, 1998; Centeno-García & Keppie, 1999; Navarro-Santillán *et al.*, 2002; Campos-Enríquez *et al.*, 2010, 2014).

La cubierta mesozoica está representada por lechos rojos de la Formación Todos Santos (Jurásico Medio); una secuencia rítmica de arenisca y lutita calcárea con conglomerado basal de la Formación Sola de Vega (Jurásico Superior-Cretácico Inferior); arenisca y lutita con lentes calcáreas consideradas como una secuencia de tipo *flysch* de la Formación Jaltepetongo (Berriasiano-Aptiano); caliza de la Formación Yushé (Albiano-Cenomaniano); caliza margosa y lutita con intercalaciones de arenisca de la Formación Yucunama (Cenomaniano-Maastrichtiano) (González-Ramos *et al.*, 2000; Sánchez-Rojas *et al.*, 2000; Urrutia-Fucugauchi & Ferrusquía-Villafranca, 2001; Loeza-García & Mendoza-Torres, 2007; Santamaría-Díaz *et al.*, 2008).

En el Cenozoico existen depósitos de conglomerado polimíctico calcáreo e intercalaciones de areniscas y limolitas de la Formación Tehuacán (Paleoceno-Eoceno). Para el Eoceno-Mioceno se tiene una unidad volcánica de tobas andesíticas y andesitas (Sánchez-Rojas *et al.*, 2000). La Formación Suchilquitongo (Mioceno) es una secuencia de calizas lacustres y limolitas que contienen un cuerpo de ignimbritas denominado Toba ETLA de color verde (González-Ramos *et al.*, 2000; Loeza-García & Mendoza-Torres, 2007). Son estas rocas las que se utilizaron para hacer las paredes del templo de Mitla, así como también en muchos edificios coloniales y modernos de la ciudad de Oaxaca (Ordoñez, 1936; Urrutia-Fucugauchi & Ferrusquía-Villafranca, 2001). Finalmente, las unidades más recientes (Plioceno-Cuaternario) comprenden tobas riolíticas, intrusiones de composición granodiorítica,

conglomerados polimícticos y depósitos de aluvión (González-Ramos *et al.*, 2000; Sánchez-Rojas *et al.*, 2000; Loaeza-García & Mendoza-Torres, 2007).

El otro terreno en el que se encuentra el Valle de Oaxaca es el Terreno Juárez separado del Terreno Oaxaca por el Complejo Sierra de Juárez y tres fallas importantes: al oeste la Falla Siempre Viva de deslizamiento, al este por la Falla Oaxaca que es de tipo normal y al sur por la Falla Donají de tipo normal. Dicho complejo está compuesto por rocas metamórficas originadas por deformación como protomilonitas, milonitas, ultramilonitas y cataclastitas cuyos protolitos distinguibles son gneis, granitos, rocas básicas, ultrabásicas y esquistos (Alaniz-Álvarez *et al.*, 1994; González-Ramos *et al.*, 2000; Urrutia-Fucugauchi & Ferrusquía-Villafranca, 2001; Loaeza-García & Mendoza-Torres, 2007; Campos-Enríquez *et al.*, 2010, 2014).

2.6. Geología de Monte Albán

Uno de los primeros reportes sobre las rocas en el sitio arqueológico de Monte Albán fueron los de Böse (1910) quien describió fósiles de amonites del Albiano-Cenomaniano en una lutita margosa con brecha calcárea basal que ha sido identificada en otras localidades de Oaxaca. Posteriormente, Imlay (1944) encontró en Monte Albán un espécimen de *Olcostephanus* (Valanginiano-Hauteriviano) en lutita margosa y Carfantan (1981) reportó capas detríticas con fósiles del Cretácico Inferior en la ciudad de Oaxaca de Juárez.

Investigaciones recientes permiten concluir que Monte Albán se construyó sobre afloramientos de la Formación Jaltepetongo de la cual se extrajeron rocas tales como conglomerado, arenisca y caliza para la construcción de todo el centro ceremonial (Williams & Heizer, 1965; Herrera *et al.*, 1999; Duverger & Letouzé, 2017; Gendron *et al.*, 2019).

Otro aspecto importante sobre la geología de Monte Albán es la existencia de varias fallas cerca del área (Loaeza-García & Mendoza-Torres, 2007): falla lateral-derecha Monte Albán con orientación NW-SE y longitud de 4.5 km y fallas normales de

orientación NW-SE como la falla Oaxaca de 20.6 km, Santa María de 6.5 km y Monte Albán I con una longitud de 3.3 km.

Como se detallará en el Capítulo 5, los diversos tipos de roca identificados en los mapeos litológicos coinciden con los reportados anteriormente. Además, se encontraron afloramientos de esas mismas rocas (conglomerados calcáreos, conglomerados, areniscas y limolitas) en los alrededores de Monte Albán (Figs. 13-15), lo que confirma que los zapotecas extrajeron los bloques de roca del mismo cerro. Se interpreta aquí que dichas rocas corresponden a los depósitos de la Formación Jaltepetongo por sus similitudes litológicas y la existencia de complejos de transporte en masa (Figs. 16-18) comunes en ambientes de talud y marinos profundos (Reading & Richards, 1994; Arnott, 2010; Shanmugam, 2012).



Figura 13. Estratos de arenisca en la parte inferior en contacto con conglomerado/brecha calcárea en la parte superior. Son estos planos de estratificación de los que probablemente se aprovecharon los constructores de Monte Albán para extraer las rocas.



Figura 14. Afloramiento de arenisca de grano medio-fino con finas capas de limolita intercaladas.



Figura 15. Capas de arenisca de grano fino con intercalaciones de limolita y horizontes de lutita.



Figura 16. Depósitos de tipo *slump* caracterizados por deformación interna.



Figura 17. Posible flujo detrítico (*debris flow*) arcilloso-calcáreo en la parte inferior. Nótese la deformación de las capas en la parte superior quizás debido a varios deslizamientos.



Figura 18. Complejo de transporte en masa conformado por *slumps* y flujos detríticos.

3. Propiedades geológicas, físicas y químicas de las rocas de construcción de Monte Albán

Las rocas naturales de construcción son definidas como un recurso natural con uso en la construcción, para la restauración y reconstrucción de monumentos, donde tienen un amplio rango de aplicaciones (Siegesmund & Török, 2014).

Varias propiedades caracterizan a las rocas naturales de construcción, entre estas están las propiedades geológicas (textura, tamaño de grano), físicas (porosidad, absorción de agua, resistencia) y químicas (Siegesmund *et al.*, 2002; Siegesmund & Török, 2014).

3.1. Geología y geoquímica de las rocas de construcción

Para la construcción de monumentos y edificios se pueden utilizar rocas de cualquier origen, ya sean ígneas, sedimentarias o metamórficas. Debido a sus diferentes orígenes, todas las rocas tienen propiedades que las caracterizan. Por ejemplo, en los afloramientos las rocas tienen diferentes estructuras con forma de planos y líneas, las cuales pueden ser foliación, bandas, estratificación, entre otras. Estas estructuras también es posible distinguirlas a escala microscópica, por lo que a menudo se emplea un microscopio óptico para realizar una descripción petrográfica de la roca mediante secciones de láminas delgadas (Přikryl, 2013, 2017; Siedel & Siegesmund, 2014; Siegesmund & Török, 2014).

A pequeña escala se puede determinar la textura de una roca, es decir, las relaciones espaciales entre los granos o minerales, además del tamaño de grano, forma de grano, sorteo, laminación, orientación, intercrecimiento de cristales y microgrietas. Es importante distinguir la existencia de dichas fracturas porque con un incremento en su cantidad pueden formar redes complejas que, con un continuo crecimiento, es posible que se vayan desarrollando grietas más grandes, lo que afectaría a las propiedades físicas de las rocas (Siegesmund *et al.*, 2002; Přikryl, 2013; Siegesmund & Török, 2014).

La composición química-mineral de una roca es de suma importancia para determinar cómo serán sus propiedades físicas y cómo actuarán los procesos de meteorización (Siegesmund *et al.*, 2002): las reacciones químicas dependen de la solubilidad de los minerales, la cantidad de agua y su nivel de acidez, es decir, el pH de la solución. Por ejemplo, carbonatos como la calcita, componente principal de las calizas, tienen solubilidades muy altas (Steiger *et al.*, 2014). Estas condiciones geológicas y minerales descritas deben de tomarse en cuenta junto con las propiedades físicas de las rocas para evaluar su durabilidad al deterioro.

3.2. Propiedades físicas de las rocas de construcción

Al igual que otros materiales de construcción, las rocas que se emplean con este motivo requieren aspectos físicos y técnicos adecuados. Entre estos parámetros se encuentran la densidad, porosidad, distribución de tamaño de poro, absorción de agua, expansión hídrica, expansión termal, resistencia a la cristalización de sal, resistencia a la compresión, flexión y abrasión (Siegesmund & Dürrast, 2014).

Una gran variedad de estudios han revelado las relaciones entre estas propiedades físicas y las propiedades geológicas de las rocas, como se indicó anteriormente, por lo que es necesario una evaluación completa de los materiales pétreos utilizados en monumentos patrimoniales y en construcciones modernas (Siegesmund & Dürrast, 2014).

3.2.1. Densidad

La densidad de un material se refiere a la masa por unidad de volumen. Para las rocas, generalmente se separa en: densidad de la matriz y en densidad aparente. La diferencia entre estas dos densidades es que la primera depende únicamente de sus componentes minerales, mientras que la densidad aparente, además de sus componentes, toma en cuenta la porosidad (Siegesmund & Dürrast, 2014; Martinho & Dionísio, 2020).

Para determinar las dos densidades existen diferentes métodos, pero un método simple, el utilizado en este trabajo, es el del principio de Arquímedes. Para ello se usaron muestras cúbicas de 6.5 cm de lado. Los parámetros necesarios para calcular la densidad son: (I) el peso de la muestra en condiciones secas (m_{seca}), para lo cual las rocas se secaron en un horno de laboratorio; (II) el peso de la muestra en condiciones completamente saturadas (m_{sat}), lo cual es posible sacando el aire de los poros antes de la saturación mediante una máquina de vacío y posteriormente llenando el recipiente con agua destilada; (III) el peso de la muestra mientras está completamente sumergida en agua (m_{sum}). Con todos estos pesos obtenidos, la densidad de matriz se calcula con la siguiente ecuación (Siegesmund & Dürrast, 2014):

$$\rho_{matriz} = \rho_{agua} \cdot (m_{seca}/m_{seca} - m_{sum}).$$

Para la densidad aparente, el cálculo es el sigue (Siegesmund & Dürrast, 2014):

$$\rho_{bulk} = \rho_{agua} \cdot (m_{seca}/m_{sat} - m_{sum}).$$

3.2.2. Porosidad y distribución de tamaño de poro

La porosidad de una roca está definida por la relación entre el volumen de poro y el volumen de la roca. Tiene un efecto directo e indirecto en la mayoría de las propiedades físicas de las rocas y es, por lo tanto, considerado el parámetro más importante a determinar (Benavente *et al.*, 2004; Příklad, 2013; Siegesmund & Dürrast, 2014; López-Doncel *et al.*, 2015; Martinho & Dionísio, 2020).

Dependiendo de la disciplina, la porosidad se clasifica de numerosas formas, por ejemplo, en geología se suele dividir en porosidad primaria y secundaria. Para areniscas, por ejemplo, la porosidad se desarrolla durante el depósito con una densidad de empaquetamiento de granos definida que está influenciada principalmente por la granulometría, la forma de los granos y el sorteo, es decir, si existe un solo tamaño de grano o varios. Durante procesos diagenéticos posteriores, la porosidad primaria cambiará por la compactación y pérdida de agua, la presión

de disolución, cementación, alteración de minerales existentes y precipitación de nuevos minerales (Siegesmund & Dürrast, 2014; Möller *et al.*, 2018).

Es común también distinguir la porosidad efectiva y la porosidad total. La primera comprende todos los poros a los que pueden acceder fluidos, mientras que la segunda incluye todos los poros, incluso los aislados, es decir, a los que no entran fluidos. Según esta definición, la porosidad efectiva siempre es menor o igual a la porosidad total, aunque la diferencia puede ser pequeña. Por último, otra clasificación se basa simplemente en el tamaño de los poros separándolos en microporos, mesoporos y macroporos (Siegesmund & Dürrast, 2014; Dinçer & Bostancı, 2019; Martinho & Dionísio, 2020).

Para calcular la porosidad se pueden utilizar las mismas variables usadas para determinar la densidad de matriz y densidad aparente (Siegesmund & Dürrast, 2014):

$$\%_{\text{porosidad}} = (m_{\text{sat}} - m_{\text{seca}}) / (m_{\text{sat}} - m_{\text{sum}}) \cdot 100.$$

El tamaño de un poro se define como el radio de un cilindro que representa la forma ideal de un poro. Sin embargo, los poros naturales usualmente exhiben formas complejas, por lo que el tamaño de poro es el diámetro más pequeño de un poro (Siegesmund & Dürrast, 2014).

Como se describió, el tamaño de poro se divide principalmente en microporos, mesoporos y macroporos. Para la capilaridad y el transporte de fluidos son de gran importancia los poros de 0.1 μm hasta 1 mm. En poros más pequeños, los microporos (< 0.1 μm), el transporte de agua es por procesos superficiales y de difusión, mientras que, en los macroporos (> 1 mm), el transporte del agua en forma de flujo es el movimiento principal (Siegesmund & Dürrast, 2014; López-Doncel *et al.*, 2015; Möller *et al.*, 2018; Pötzl *et al.*, 2018; Dinçer & Bostancı, 2019; Martinho & Dionísio, 2020).

El método para la determinación de la distribución de tamaño de poro requiere el uso de un porosímetro de mercurio, el cual se basa en el principio que cada radio de poro está caracterizado por un valor de presión necesario para empujar el mercurio dentro del poro. Esto significa que se puede determinar la distribución de

tamaño de poro para todo el rango de poros desde 0.002 hasta 200 μm (Siegesmund & Dürrast, 2014).

3.2.3. Absorción de agua por capilaridad

Una roca dimensionable experimenta absorción mientras está expuesta al agua de lluvia al formar parte de la estructura de una construcción, así como cuando está en contacto con agua subterránea. En general, cuando este tipo de medio está en contacto con agua, la absorción será por capilaridad. El mecanismo de absorción capilar depende principalmente del tamaño de poro (entre 1 μm y 1 mm) y la geometría del sistema de poros. Los capilares más pequeños tienen un mayor poder de succión, pero una tasa menor de succión capilar. Los capilares más grandes, por otra parte, tienen velocidades más altas de succión, pero un poder mucho menor de succión. Para un sistema con capilares de diferentes tamaños, esto resultará generalmente en absorción capilar de agua más rápida por poros más grandes y absorción más lenta por poros más pequeños (Siegesmund & Dürrast, 2014; Dinçer & Bostancı, 2019).

La absorción capilar de una roca puede ser determinada en laboratorio usando un espécimen cúbico de 6.5 cm con solo un lado en contacto con agua destilada (Fig. 19). Se debe tener cuidado que la absorción capilar ocurra solo y constantemente por el lado inferior, además de que el recipiente que contiene al agua debe ser suficientemente grande para que el nivel de agua no tenga un cambio significativo durante el experimento (Siegesmund & Dürrast, 2014).

Para evaluar la absorción capilar de agua en un bloque de roca en el exterior de una construcción, el experimento se lleva a cabo usando el tubo de Karsten (Siegesmund & Dürrast, 2014), cuyo uso es una de las técnicas no destructivas más importantes que permiten mediciones *in situ* (Martinho & Dionísio, 2020).

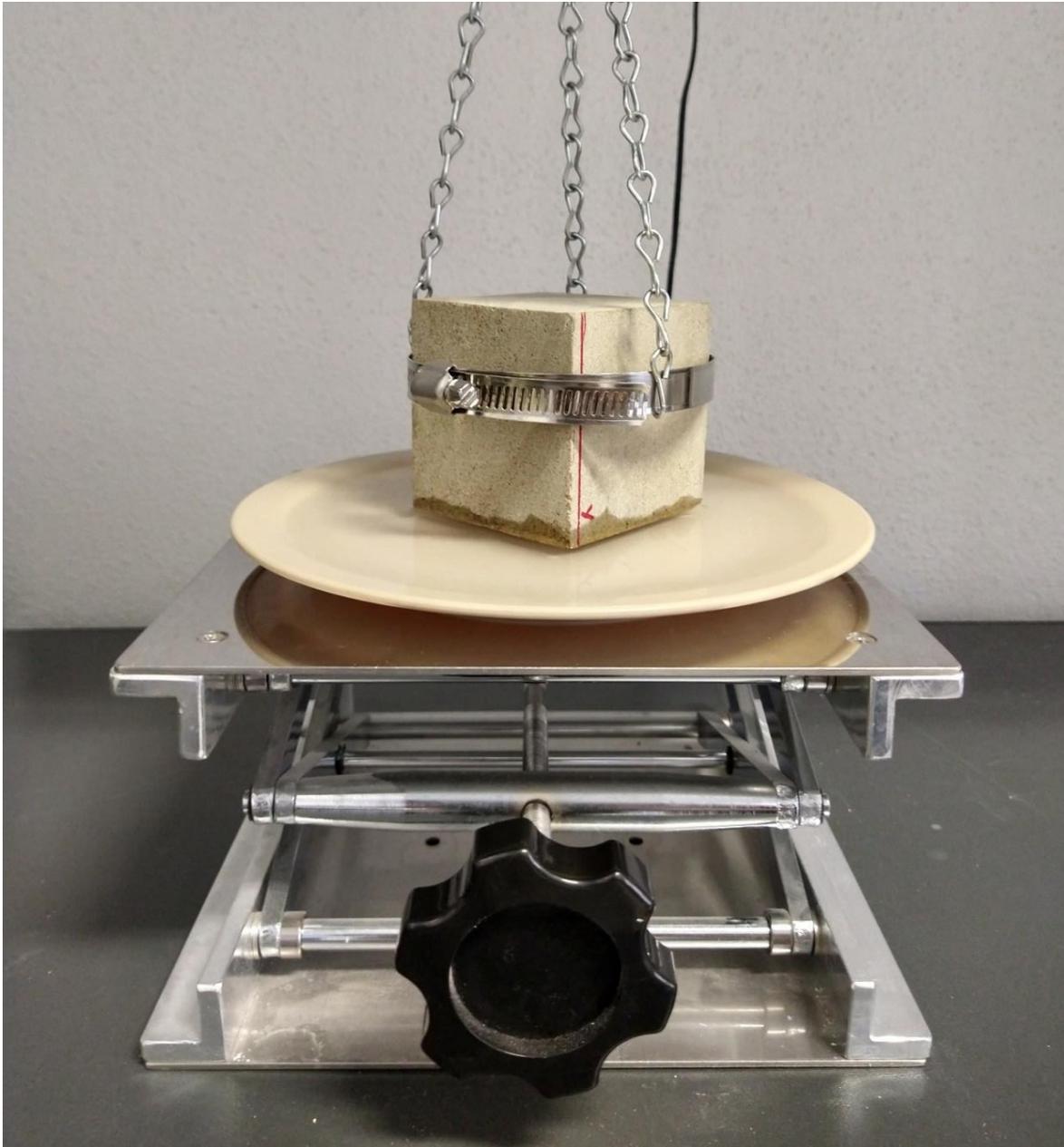


Figura 19. Ejemplo de la prueba de absorción capilar de agua en el plano XZ, es decir, con la laminación en forma vertical.

3.2.4. Absorción de agua por inmersión total

La absorción de agua por inmersión total es la diferencia entre el peso de una muestra totalmente sumergida en agua y su peso seco. El valor de esta propiedad puede ser determinado por diferentes métodos, de los cuales, los más usuales son la inmersión total bajo presión atmosférica y bajo condiciones de vacío. En

condiciones de presión atmosférica, la absorción indica cuánta agua puede absorber una roca durante 24 horas mientras está sumergida. Sin embargo, para alcanzar una absorción total, primero es necesario evacuar primero el aire de los poros mediante una máquina de vacío y después sumergir la roca en agua destilada para saturar los poros (Siegesmund & Dürrast, 2014; Martinho & Dionísio, 2020).

El cálculo para la absorción de agua por inmersión total en condiciones de vacío es como sigue (Siegesmund & Dürrast, 2014):

$$\%W_{vac} = (m_{sum} - m_{seca})/m_{seca} \cdot 100.$$

La absorción de agua está influenciada por la porosidad. En general, mientras más grande sea el valor de la porosidad, mayor será la absorción total de agua, sin embargo, la capacidad de absorción total de agua de una roca no está relacionada con su porosidad total, sino con el porcentaje de poros accesibles en condiciones normales. El tamaño de poro tiene una influencia en la absorción total de agua. Un tiempo de inmersión corto hace que se rellenen principalmente los poros capilares, mientras que los poros relativamente pequeños son rellenos solo después de un tiempo de inmersión muy largo. La absorción en el caso de las areniscas está relacionada primeramente con el tamaño de grano, su sorteo y procesos de cementación (Siegesmund & Dürrast, 2014).

3.2.5. Expansión hídrica

La deformación de las rocas dimensionables puede estar relacionada a diferentes procesos, principalmente con cambios en la temperatura y en el contenido de humedad. Esta última condición, la presencia de humedad, es importante en el caso de cambios de longitud o volumen de las rocas dimensionables. Este fenómeno es conocido como expansión y contracción hídrica (Siegesmund & Dürrast, 2014; López-Doncel *et al.*, 2015).

La expansión hídrica es una propiedad importante durante la meteorización de las rocas dimensionables, ya que resulta en varias formas de desprendimiento, las

cuales serán descritas en el siguiente capítulo (Ruedrich *et al.*, 2011; Siegesmund & Dürrast, 2014; Pötzl *et al.*, 2018).

Además de la expansión de minerales arcillosos, la dilatación hídrica de las rocas dimensionables puede ser el resultado de otros procesos (Ruedrich *et al.*, 2011; Wedekind *et al.*, 2013; Steiger *et al.*, 2014; López-Doncel *et al.*, 2015; Pötzl *et al.*, 2018). Esto se puede comprobar en rocas que solo tienen una pequeña cantidad de arcillas o que no tienen. En estos casos, la dilatación hídrica ha sido mayormente observada para rocas que tienen un gran porcentaje de microporos (Stück *et al.*, 2013; López-Doncel *et al.*, 2016; Möller *et al.*, 2018; Wedekind *et al.*, 2018). Por ejemplo, las calizas usualmente tienen valores bajos para expansión hídrica, ya que tienen un contenido bajo de arcillas (Siegesmund & Dürrast, 2014).

En laboratorio, la expansión hídrica se mide de varias maneras. En el caso de este trabajo, se emplearon especímenes de 1.5 cm de ancho y 10 cm de alto que fueron sumergidos en agua destilada (López-Doncel *et al.*, 2013). La expansión se midió con micrómetros digitales con una precisión de 0.01 mm (Fig. 20).

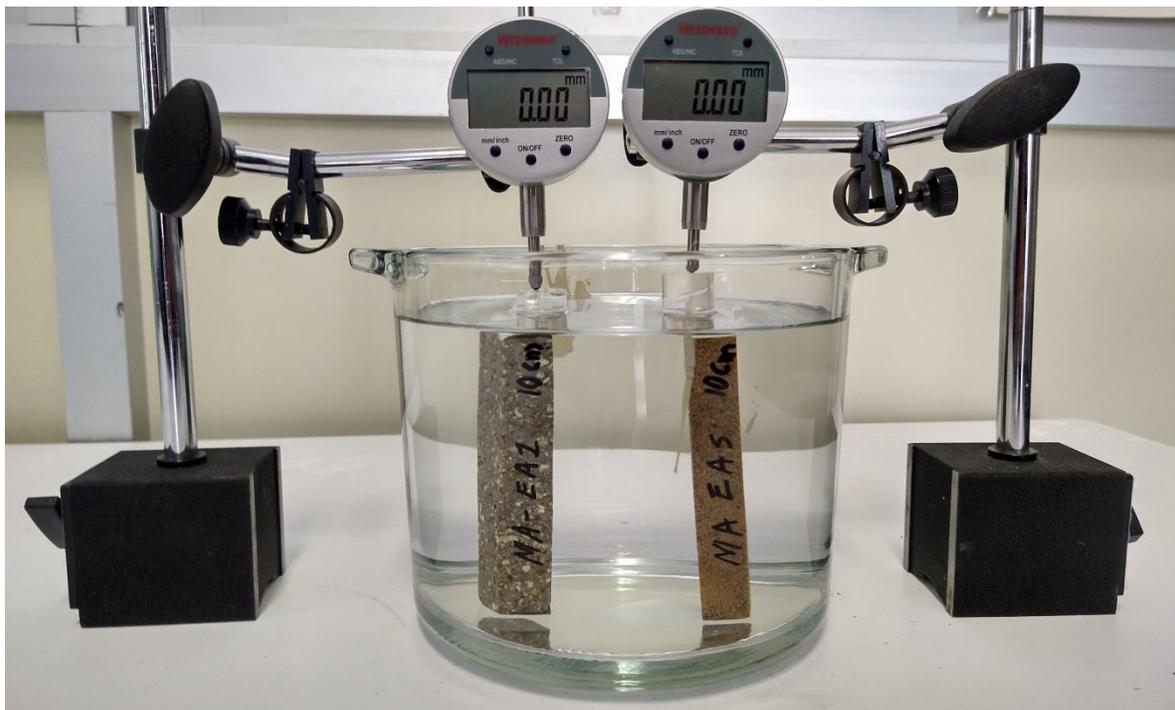


Figura 20. Ejemplo de la medición de expansión hídrica.

3.2.6. Resistencia a la cristalización de sal

El proceso de cristalización de sal es uno de los factores más importantes en el deterioro de las rocas dimensionables que están expuestas a la sal y al agua. Esta cristalización de sales en los poros puede generar presiones lo suficientemente altas como para exceder la resistencia del material (Benavente *et al.*, 2004; Steiger *et al.*, 2014; López-Doncel *et al.*, 2015, Přikryl, 2017; Pötzl *et al.*, 2018; Çelik & Aygün, 2019) y producir daños extremadamente agresivos, tales como pérdida de material, descamación, deslaminación y, en algunos casos, incluso llega a generar la disgregación completa del material (López-Doncel *et al.*, 2016; Özşen *et al.*, 2017).

El método más común para determinar los efectos del proceso de cristalización de sal en las rocas dimensionables es la prueba de resistencia por pérdida de peso durante varios ciclos, cuyos principales objetivos son predecir a largo plazo la durabilidad de las rocas y caracterizar el deterioro. Este experimento consiste en la inmersión total de la roca en agua con sal y su posterior secado en un horno de laboratorio (Özşen *et al.*, 2017). La sal empleada típicamente es el sulfato de sodio porque es una de las sales más dañinas por su gran expansión y porque es muy común en varios ambientes (De Clercq *et al.*, 2013; Çelik & Aygün, 2019).

Las rocas más porosas son más propensas a la cristalización de sal y a su vez, la porosidad se incrementa cuando ocurre una mayor cristalización de sal debido al desarrollo de microgrietas y la expansión de fracturas existentes en las rocas (Özşen *et al.*, 2017; Pötzl *et al.*, 2018; Çelik & Aygün, 2019). Claramente, las areniscas con mayor porosidad son más propensas a la cristalización de sal que las areniscas con menores valores de porosidad. Sin embargo, estas tendencias muestran excepciones relacionadas con la distribución de tamaño de poro: las areniscas con una distribución unimodal de tamaño de poro y un porcentaje pequeño de microporos pueden completar más ciclos durante el experimento de cristalización de sal que las areniscas con un porcentaje mayor de microporos (Benavente *et al.*, 2004; Přikryl, 2013; Siegesmund & Dürrast, 2014; López-Doncel *et al.*, 2016; Wedekind *et al.*, 2018).

4. Deterioro de las rocas de construcción de Monte Albán; causas y efectos

La meteorización de construcciones, denominada deterioro cuando se refiere a los diferentes procesos que actúan en rocas dimensionables, es un problema que ha sido identificado desde la antigüedad. Existen numerosos procesos que amenazan la conservación de monumentos históricos y el patrimonio cultural de la sociedad. Para comprender sus interacciones complejas con las rocas de construcción es necesario identificar su origen y dar una descripción detallada de las formas de daños, los cuales son los propósitos principales para su preservación y conservación (Siegesmund *et al.*, 2002; Goudie & Viles, 2010; Wedekind *et al.*, 2011; López-Doncel *et al.*, 2013; Siedel & Siegesmund, 2014; Steiger *et al.*, 2014; Padilla-Ceniceros *et al.*, 2017; Přikryl, 2017).

En cuanto a las causas y agentes que producen deterioro en los edificios y construcciones, pueden clasificarse de acuerdo con el proceso que lo origina, ya sean físicos, químicos o biológicos, como se describe en las secciones siguientes. Ejemplos de fenómenos que causan deterioro son el viento, la exposición a los rayos ultravioletas, la lluvia, las infiltraciones de agua, los contaminantes del aire, la presión ejercida por el congelamiento del agua, las variaciones de temperatura, terremotos, huracanes, inundaciones, incendios, agentes biológicos y antropogénicos. Además, el deterioro puede estar relacionado con la posición del edificio, su estructura y sus componentes, como los son los materiales de relleno, la mampostería e incluso las mismas rocas dimensionables (Siegesmund *et al.*, 2002; Turkington & Paradise, 2005; Goudie & Viles, 2010; Přikryl, 2013; Marszałek *et al.*, 2014; Siedel & Siegesmund, 2014; Siegesmund & Török, 2014; Steiger *et al.*, 2014; Farkas *et al.*, 2018; Morillas *et al.*, 2018; Theodoridou & Török, 2019).

De todos estos factores, el más significativo es la presencia de agua, ya que no solamente puede inducir y acelerar las reacciones químicas, sino que, por cambios en la temperatura, puede congelarse y causar daño físico por presión, además de controlar la cristalización de sal. El agua es también un medio necesario para el desarrollo de la colonización biológica, donde los microorganismos generan ácidos

que pueden atacar la estructura de los minerales presentes en la roca (Siegesmund *et al.*, 2002; Goudie & Viles, 2010; Franzoni *et al.*, 2014; Siegesmund & Dürrast, 2014; Steiger *et al.*, 2014; López-Doncel *et al.*, 2015, 2016; Hatır *et al.*, 2019).

4.1. Procesos físicos

Entre los procesos físicos más comunes que contribuyen al deterioro de las rocas de construcción están las presiones generadas por el congelamiento del agua y por la cristalización de sal, además de los ciclos de humedad, cambios en la temperatura y en la cantidad de agua. Como resultado de estos procesos, la roca experimenta una fragmentación progresiva a lo largo de superficies anisótropas preferenciales, por ejemplo, microgrietas, planos de clivaje, laminación y fracturas (Siegesmund *et al.*, 2002; Phillipson *et al.*, 2007; Ruedrich *et al.*, 2011; Steiger *et al.*, 2014; López-Doncel *et al.*, 2016).

Otros procesos físicos importantes a los que están expuestas las rocas son las cargas por encima de su resistencia mecánica, como en las ventanas y puertas de las construcciones, lo cual genera agrietamientos. También los terremotos son responsables por estos tipos de daños físicos en los edificios (Ovando-Shelley *et al.*, 2013; Steiger *et al.*, 2014), tal y como lo demuestran los eventos sísmicos que han afectado a Monte Albán (Singh *et al.*, 2000; Bautista-Hernández *et al.*, 2009).

La fragmentación del material puede resultar además por los efectos del fuego o los relámpagos, los cuales causan un calor abrupto y extremo que genera un daño termal de choque que es frecuentemente irreversible. Las fluctuaciones de temperatura de menor escala pueden crear fatiga térmica que lentamente causa el desprendimiento del material (Goudie & Viles, 2010; Steiger *et al.*, 2014; Martinho & Dionísio, 2020).

4.2. Procesos químicos

Los procesos químicos de meteorización y deterioro son esencialmente el resultado de las reacciones entre los constituyentes minerales de la roca con el agua, dióxido

de carbono y oxígeno del aire. La desintegración química toma lugar a niveles microscópicos, por lo que las superficies de las rocas que contienen sistemas complejos de poros, fracturas y límites de grano son más propensas a experimentar una mayor cantidad de reacciones químicas (Siegesmund *et al.*, 2002; Steiger *et al.*, 2014).

La disolución mineral en las rocas de construcción por procesos químicos de deterioro está íntimamente relacionada a la contaminación atmosférica y al depósito de ácidos (Goudie & Viles, 2010), aunque también puede deberse a la inestabilidad termodinámica de varios minerales en condiciones superficiales (Steiger *et al.*, 2014).

4.3. Procesos biológicos

La meteorización biológica es una combinación de procesos físicos y químicos llevados a cabo por organismos. Por ejemplo, las raíces de los árboles pueden ejercer presión en las rocas y levantar grandes bloques conforme crecen, mientras que los líquenes producen ácido que puede disolver a las rocas (Siegesmund & Török, 2014; Steiger *et al.*, 2014).

El factor más decisivo para el crecimiento de organismos es la disponibilidad de agua. Es por este motivo que las rocas más porosas, con más capacidad de retener grandes cantidades de agua son fácilmente colonizadas por una gran variedad de bacterias y hongos. Al contrario, las rocas con menor porosidad no serán colonizadas tan fácilmente (Steiger *et al.*, 2014).

El crecimiento de vegetación deteriora mediante esfuerzos mecánicos inducidos por sus raíces y mientras más alta sea la vegetación, el daño se incrementará, resultando en el rompimiento de las rocas, como se observa frecuentemente en sitios arqueológicos (Steiger *et al.*, 2014).

En el caso de microorganismos, generalmente los que colonizan las rocas incluyen algas, cianobacterias y líquen (González-Gómez *et al.*, 2018). Las bacterias necesitan una gran cantidad de agua para crecer, mientras que los hongos y

líquenes son capaces de crecer con mucha menos cantidad (Steiger *et al.*, 2014). Un mecanismo de deterioro por microorganismos ocurre por la producción de ácidos en la superficie de la roca. Su actividad metabólica requiere el consumo de oxígeno y a menudo lleva a la generación de compuestos inorgánicos y enzimas químicamente agresivas que atacan la superficie de las rocas. Como resultado, estos procesos pueden causar alteraciones físicas en el sistema de poros, generando fisuras y fracturas que promueven la fragmentación total de las rocas (González-Gómez *et al.*, 2018).

Los animales también pueden contribuir al deterioro de estructuras y de sus materiales. Por ejemplo, las aves y murciélagos representan un problema por sus depósitos, ya que contienen sales, fosfatos y nitratos que se infiltran en las rocas. Animales más grandes deterioran las construcciones igualmente por sus depósitos al marcar territorio y al usar las paredes para rascarse (Steiger *et al.*, 2014).

4.4. Formas del deterioro

Existen muchos tipos de daños que las rocas de construcción experimentan. Estos daños pueden producir patrones específicos y estar relacionados con un solo mecanismo que los genera. Sin embargo, no siempre resulta así debido a que un patrón de deterioro puede ser originado por diferentes procesos o un solo mecanismo producirá varios patrones (Steiger *et al.*, 2014).

Es por estas razones que son importantes en primer lugar la observación, documentación y entendimiento de los daños. La caracterización de los patrones de deterioro debería ser estándar, por lo que se ha sugerido utilizar el glosario ilustrado de las formas de deterioro del ICOMOS-ISCS (2011) (Siedel & Siegesmund, 2014; Steiger *et al.*, 2014). De esta manera dividen los daños en cinco categorías: (I) grietas y deformación, (II) desprendimiento, (III) rasgos inducidos por pérdida de material, (IV) alteración cromática y depósito, (V) colonización biológica.

La primera división incluye solamente a las grietas y a la deformación. La deformación es comúnmente vista en losas de mármol o granito por diferencias de temperatura. Las grietas se definen como la separación de un bloque de roca en dos o más partes (ICOMOS-ISCS, 2011). Pueden existir diferentes tipos de grietas según su anchura, la relación con otras grietas y su orientación. Se generan por anclajes de hierro oxidados, a causa de los morteros, incendios, heladas y por sismos (ICOMOS-ISCS, 2011). Este último caso se observa marcadamente en Monte Albán (Singh *et al.*, 2000; Bautista-Hernández *et al.*, 2009), además de grietas generadas por cargas asimétricas en los edificios (Fig. 21).



Figura 21. Grieta que atraviesa toda la estructura debido a la carga diferente entre ambos lados (Edificio J).

La segunda categoría, el desprendimiento, incluye ampollas, estallido, deslaminación, disgregación, fragmentación, disyunción de películas y descamación (ICOMOS-ISCS, 2011). Como su nombre sugiere, aquí se engloban los daños que involucran un desprendimiento de la superficie de la roca, diferenciando de acuerdo con la formas y profundidad del deterioro.

Los daños que se encontraron en las rocas de Monte Albán en esta categoría están las ampollas, deslaminación, fragmentación y descamación. Las ampollas se refieren a elevaciones de la superficie de la roca en forma semiesférica y que están rellenas de aire (Fig. 22) (ICOMOS-ISCS, 2011). Esta forma está relacionada con la humedad y el crecimiento de sal.



Figura 22. Ampolla probablemente generada por humedad, ya que no se observa cristalización de sal (Edificio J).

La deslaminación es el proceso de desprendimiento y separación de las láminas de rocas sedimentarias con laminación principalmente, aunque también afecta a rocas metamórficas (ICOMOS-ISCS, 2011). Este tipo de daño es frecuente en los bloques que componen al Edificio J de Monte Albán. Generalmente se puede identificar cuando la laminación está de forma paralela a la superficie de la pared, causando un desprendimiento influenciado por el agua, las sales y la gravedad (Fig. 23). Es común observarlo en intercalaciones de areniscas de grano medio y fino con limolita.



Figura 23. El bloque con laminación colocado de forma no paralela a la superficie del muro no presenta deslaminación. Sin embargo, el mismo bloque expuesto con los planos de laminación paralelos a la superficie de la pared sí experimentan deslaminación (Edificio J).

Similar a la deslaminación es la descamación, la cual se refiere al desprendimiento de la roca en forma de escamas o de forma paralela a su superficie. El espesor puede variar desde varios milímetros hasta escala de centímetros (ICOMOS-ISCS, 2011). La diferencia entre ambos tipos de daños es que la deslaminación solo se aplica cuando el desprendimiento es paralelo a las láminas, mientras que la descamación es paralela a la superficie de la roca. Esta forma de deterioro es también común en los bloques de los edificios de Monte Albán (Fig. 24).

Finalmente, la fragmentación es cualquier rotura parcial o total de la roca en partes de dimensiones, tamaños y formas variables e irregulares. Se genera principalmente debido a la sobrecarga de los bloques (ICOMOS-ISCS, 2011). Si bien este daño fue observado en Monte Albán, no es tan representativo como los demás tipos de desprendimiento.



Figura 24. Descamación en un bloque de arenisca de grano grueso-medio sin laminación. Nótese la influencia que tienen los cristales de sal (manchas blancas) en el origen de este tipo de daño (Edificio J).

La tercera categoría del glosario del ICOMOS-ISCS (2011) incluye todos los rasgos inducidos por la pérdida de material, lo que significa que los procesos que causaron los daños pueden haber dejado de actuar en las rocas, sin embargo, los efectos sí se pueden identificar. Se subdivide en alveolización, erosión, daños mecánicos, microkarstificación, partes faltantes, perforaciones y *pitting*.

En Monte Albán se pudieron distinguir erosión, microkarstificación, perforaciones y *pitting*. Según el ICOMOS-ISCS (2011), la erosión puede ser diferencial, ya que existe una pérdida de componentes o una pérdida de matriz. Ambos tipos de erosión fueron observados, pero prevalece la pérdida de componentes en los conglomerados calcáreos (Fig. 25).

Otro tipo de deterioro, la microkarstificación, también afecta a los conglomerados calcáreos en Monte Albán (Fig. 26). Se refiere a una retícula de pequeñas depresiones interconectadas de escala milimétrica-centimétrica producto de la disolución parcial de la superficie de la roca expuesta a esorrentías (ICOMOS-ISCS, 2011).



Figura 25. Erosión diferencial por pérdida de componentes en un bloque de conglomerado calcáreo (Edificio J).



Figura 26. Microkarstificación en un bloque de conglomerado calcáreo con clastos de tamaño pequeño (Edificio J).

De la tercera categoría de daños, el *pitting* es la forma más común observada en los edificios de Monte Albán. El *pitting* es una serie de cavidades en forma de puntos a escala milimétrica que se encuentran en la superficie de las rocas (Fig. 27). Se origina por agentes químicos o biológicos (liquen) especialmente en rocas carbonatadas. No debe confundirse con las perforaciones, las cuales normalmente son orificios de mayor tamaño y con más profundidad que pueden ser el resultado de alguna herramienta o de animales (ICOMOS-ISCS, 2011).



Figura 27. Punteado milimétrico denominado *pitting*. Puede estar relacionado con la colonización biológica de liquen y afecta principalmente a rocas carbonatadas (Edificio J).

La cuarta categoría de las formas de deterioro del ICOMOS-ISCS (2011) corresponde a la alteración cromática y depósito con las siguientes divisiones: costra (costra negra y salina), depósito, alteración cromática (coloración, decoloración, manchas de humedad, tinción), eflorescencia, incrustación, película, brillo superficial, grafiti, pátina (pátina ferruginosa y de oxalato), enmugrecimiento y subflorescencia.

En Monte Albán se identificaron costras negras, depósitos, eflorescencias, incrustaciones, grafitis y enmugrecimiento de los bloques de roca. La costra es una acumulación de material en la superficie, frecuentemente de color oscuro, que se compone de partículas atmosféricas atrapadas en una matriz de yeso (Goudie & Viles, 2010; ICOMOS-ISCS, 2011; Marszałek *et al.*, 2014). El desarrollo de estas costras es común en las calizas. Debido a su disolución, se forma yeso por su reacción con calcita y óxidos de azufre derivados de la atmósfera (Farkas *et al.*, 2018).

Se considera depósito a cualquier acumulación de material exógeno como: salpicaduras de pintura, mortero, partículas atmosféricas (hollín, polvo), materiales utilizados en restauración, excrementos de pájaros, entre otros (Fig. 28) (ICOMOS-ISCS, 2011).



Figura 28. Depósito de material de restauración (Edificio J).

La eflorescencia es una acumulación de sal en la superficie de las rocas. No debe confundirse con la subeflorescencia, la cual también son depósitos de sal, pero se encuentran debajo de la superficie de los bloques (ICOMOS-ISCS, 2011; Steiger *et*

al., 2014). Igualmente, sobre la superficie de las rocas puede haber incrustaciones (Fig. 29) que son capas adheridas al sustrato y están relacionadas con zonas en donde el agua se infiltró y posteriormente se precipitó material que proviene frecuentemente del mismo edificio. Este término se debe utilizar solo cuando exista evidencia clara de un proceso de lixiviación y precipitación (ICOMOS-ISCS, 2011).



Figura 29. Incrustación formada por la infiltración de agua y posterior precipitación de material, muy posiblemente producto del depósito de mampostería (Edificio J).

En los grafitis se incluyen cualquier tipo de grabado, excoiación, incisión o dibujos hechos en la superficie de la roca como producto de vandalismo. Por otra parte, el enmugrecimiento se refiere a una capa muy fina de partículas exógenas que dan una apariencia de suciedad en la superficie de los bloques. Puede originarse por la acción de contaminantes atmosféricos o por partículas transportadas por flujos de agua y escorrentías (ICOMOS-ISCS, 2011), lo cual es muy común de observar en el Edificio J de Monte Albán (Fig. 30).

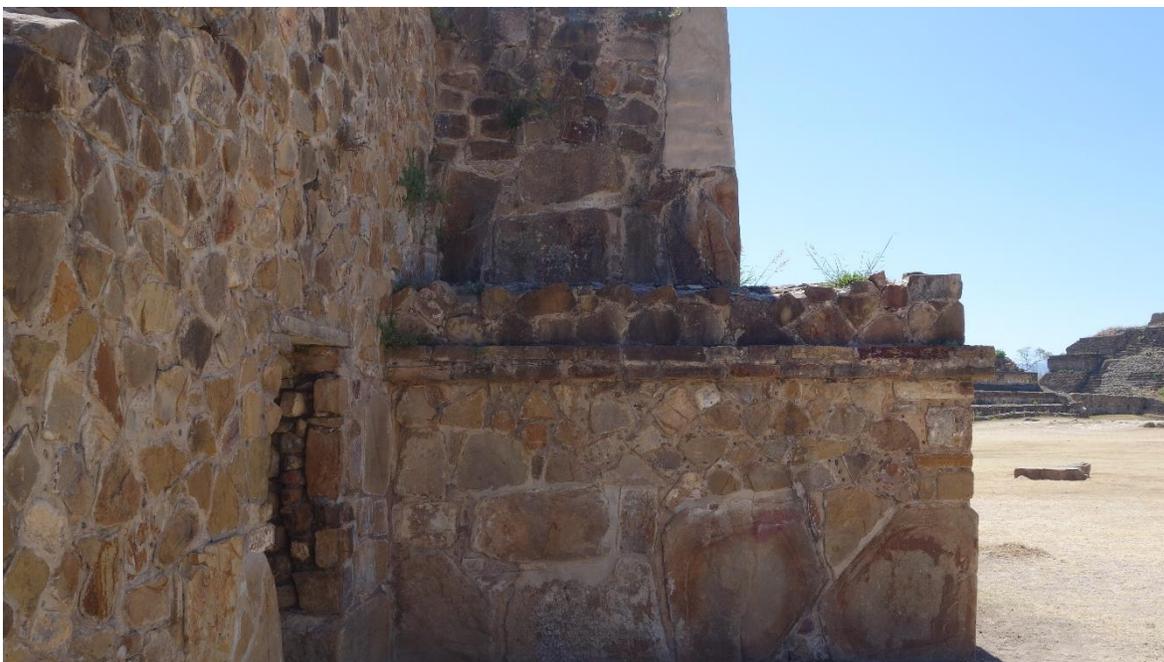


Figura 30. Enmugrecimiento de la parte superior del muro debido a la escorrentía de agua de lluvia mezclada con partículas (Edificio J).

La última categoría son las formas de deterioro originadas por la colonización biológica de algas, líquen, hongos, musgo y plantas. La colonización biológica en general se refiere al crecimiento y desarrollo de plantas y microorganismos sobre la superficie de la roca, aunque también incluye influencias de animales como telarañas o nidos (Fig. 31). Es importante recalcar que los depósitos de animales como excremento no forman parte de esta categoría, sino que están dentro del daño por depósito. Las algas son organismos microscópicos sin tallos ni hojas cuyas formaciones pueden ser de color verde, café o negro. Se encuentran principalmente en zonas del sustrato que permanecen húmedas durante períodos de tiempo prolongados. El líquen es un conjunto de organismos vegetales que forman montículos redondeados que en ocasiones se incrustan en el sustrato algunos milímetros, lo cual genera *pitting* descrito anteriormente. En general son de color amarillo, gris, verde o negro (Fig. 32) (ICOMOS-ISCS, 2011).



Figura 31. Colonización biológica de la roca por arañas y telarañas (Edificio J).



Figura 32. Colonización biológica de liquen sobre los bloques de roca y también en la mampostería debido a la presencia de humedad (Edificio J).

El musgo es una masa de organismos vegetales de color verde y asemeja a un conjunto de hojas de tamaño milimétrico en áreas húmedas. Los hongos son organismos microscópicos cuyas colonias pueden hacerse visibles a simple vista, presentándose como masas de aspecto filamentoso con colores blancos, grises y negros. Las plantas son organismos con raíces, troncos y hojas que crecen

normalmente cuando los edificios no son mantenidos en grietas y zonas accesibles al agua (Fig. 33) (ICOMOS-ISCS, 2011).



Figura 33. La colonización biológica de plantas y líquen en este caso se produce en la mampostería, probablemente porque conserva mayor humedad (Edificio J).

5. Resultados y discusión

5.1. Resultados

5.1.1. Mapeos litológicos y de daños

Los mapeos litológicos y de daños del Edificio J (El Observatorio) se separaron en 13 paredes para facilitar su identificación (Fig. 34). La Galería de los Danzantes solo se compone de una pared.

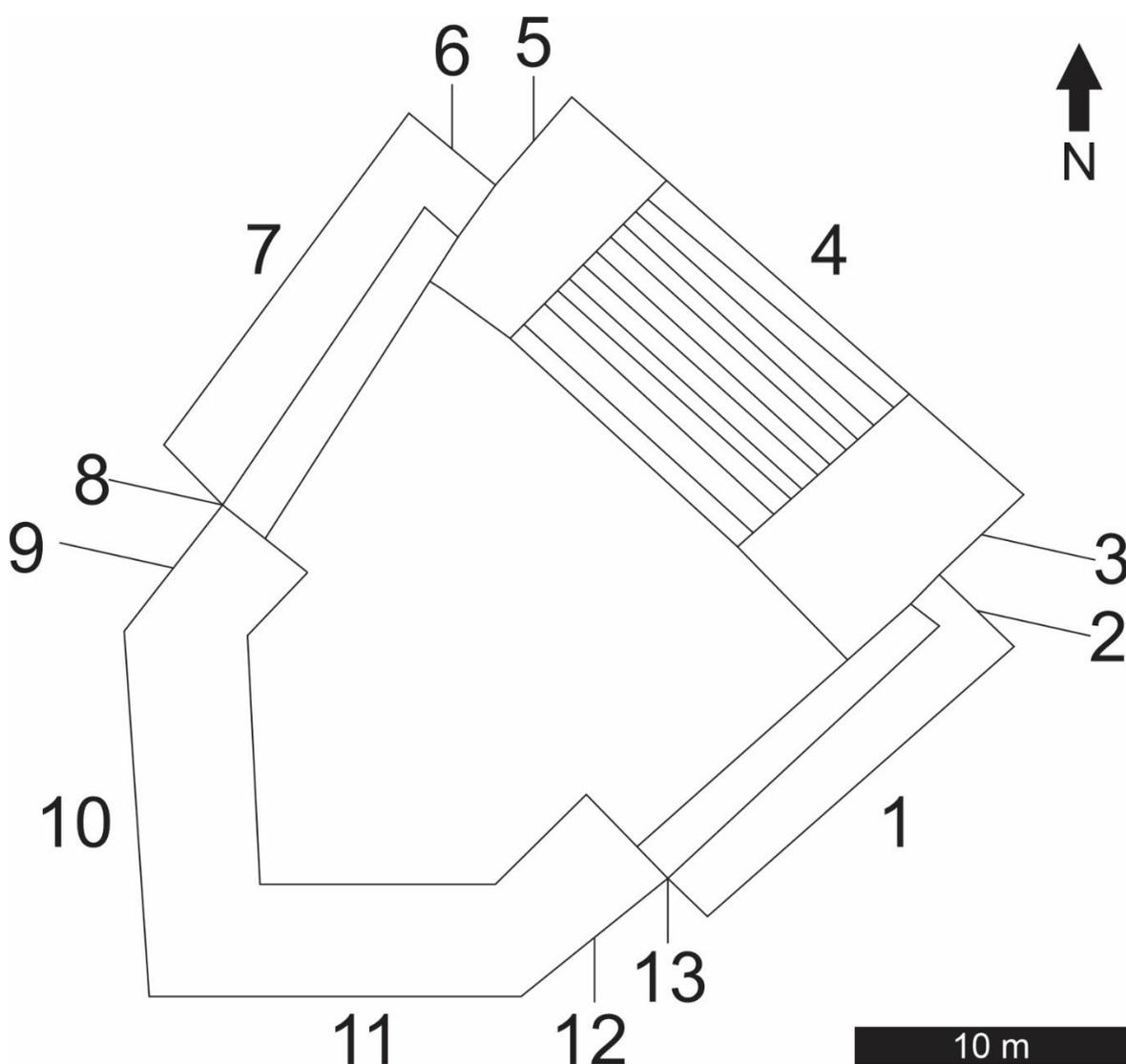


Figura 34. Esquema del Edificio J donde se muestra la división de las paredes usada en este trabajo para los mapeos litológicos y de daños.

En los mapeos litológicos, las rocas encontradas fueron conglomerados con clastos entre 1 cm y 3 cm soportados por matriz calcárea y otros soportados por clastos. Otros conglomerados tienen componentes más finos menores a 0.5 cm soportados por matriz calcárea. Se identificaron también areniscas de grano grueso que en ocasiones se observan con escasos clastos de conglomerado, además de areniscas de grano medio y fino. En menor proporción hay bloques de limolita y de caliza, la cual puede presentarse con fragmentos de rudistas y otros fósiles o puede no tener contenido fósil. Algunos bloques tienen calcita que recristalizó en planos de estratificación o fracturas y que facilitaron su extracción. En cuanto a estructuras sedimentarias, se identificó y mapeó la laminación.

Los daños que se encontraron en el Edificio J comprenden grietas, ampollas, deslaminación, fragmentación, descamación, erosión, microkarstificación, perforaciones, *pitting*, costra negra, depósito, eflorescencia, incrustación, grafiti, enmugrecimiento y colonización biológica. Debido a la cantidad variada de formas de deterioro, los mapeos de daños del Edificio J se separaron en dos: el primero incluye desprendimiento y rasgos inducidos por la pérdida de material y el segundo muestra las grietas, alteración cromática, depósito y colonización biológica. Por otra parte, en la Galería de los Danzantes se observaron daños como grietas, deslaminación, fragmentación, descamación, erosión, perforaciones, depósito y enmugrecimiento, los cuales se pusieron en un solo mapeo.

A continuación, se describen los elementos litológicos y los patrones de deterioro de todas las paredes mapeadas por separado.

Pared 1 (Fig. 35). En la base original, del lado izquierdo de la pared, los bloques de la primera fila tienen el lado más largo colocado verticalmente. Estas rocas son las más grandes. Hacia arriba de esta fila se acomodaron de forma horizontal. Del lado derecho de la pared, todos los bloques de la parte original están colocados horizontalmente.

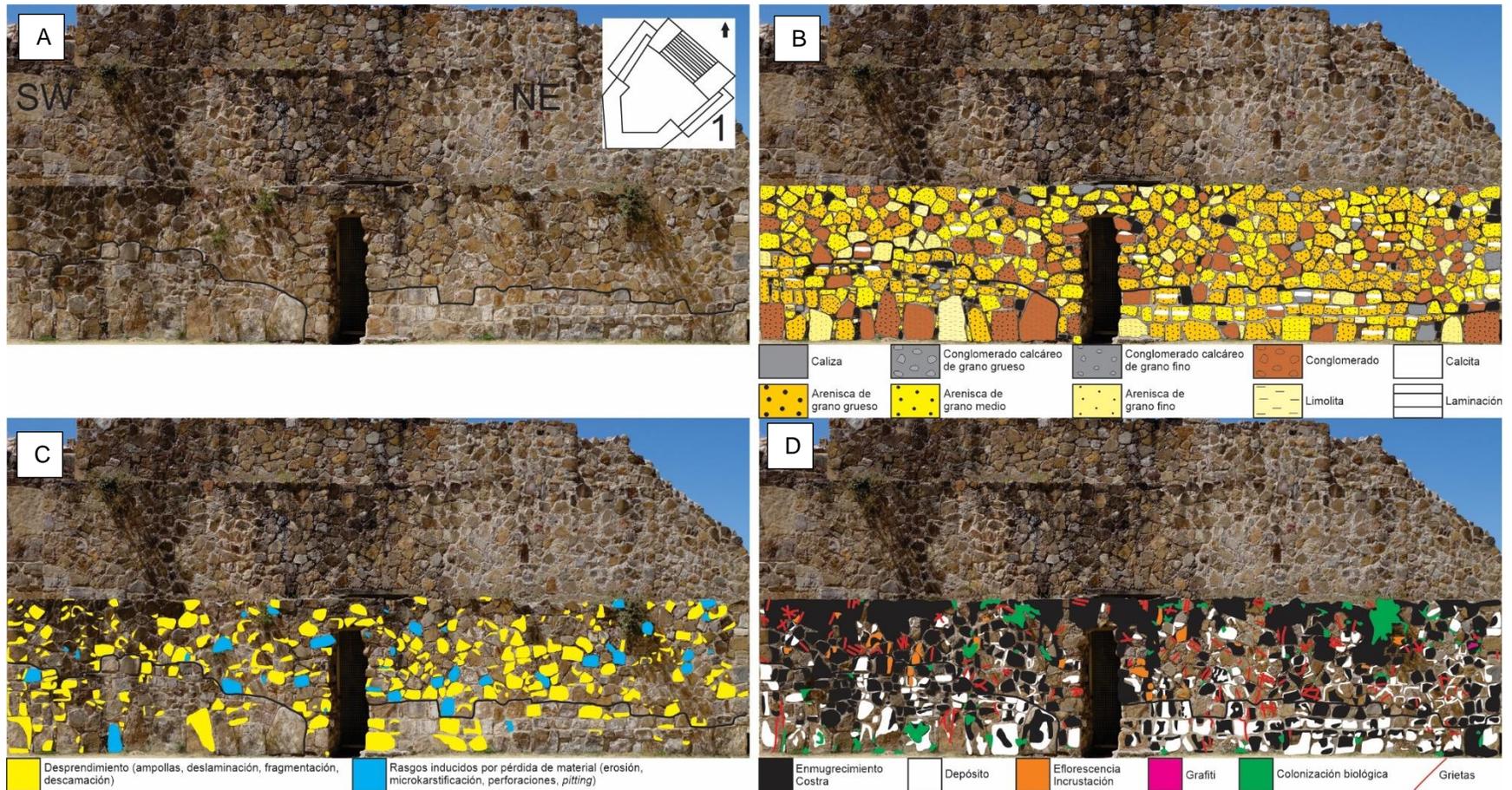


Figura 35. A. Pared 1 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por descamación y rasgos inducidos por la pérdida de material. D. Mapeo de daños para el deterioro por grietas, alteración cromática, depósito y colonización biológica.

En las partes reconstruidas las rocas no tienen un acomodo regular ya que su forma es variable, al contrario de la parte original donde los bloques tienen formas cuadradas y rectangulares.

Las rocas más utilizadas en la parte original de esta pared fueron areniscas de grano grueso y medio, mientras que bloques de conglomerado calcáreo, caliza, arenisca de grano fino y limolita tienen muy poca representación. Los conglomerados igualmente no fueron tan usados, pero se diferencian de las demás litologías porque constituyen la mayoría de los bloques más grandes.

La parte restaurada se caracteriza por la predominancia de conglomerado, arenisca de grano grueso y de grano medio.

En la parte original, las rocas tienen mínimos daños por *pitting*, mientras que la parte reconstruida tiene muchos más bloques con erosión y *pitting* (rasgos inducidos por la pérdida de material). Este tipo de deterioro es observable en conglomerados, conglomerados calcáreos y areniscas de grano grueso.

Los daños de deslaminación y descamación también están en mayor cantidad en la parte reconstruida, aunque se pueden observar en algunas zonas de la parte original. Al contrario de los daños como erosión y *pitting* que se presentan en tipos de roca específicos, la deslaminación y descamación no parecen relacionarse con una sola litología, más bien están controlados por la posición de los bloques y de la laminación. Por ejemplo, si la laminación está paralela a la superficie de la pared es más probable que experimente desprendimiento de material.

Otros daños de desprendimiento presentes son las ampollas y la fragmentación. Ambos tipos se observaron en las rocas de la parte reconstruida, pero la superficie que ocupan es mínima.

El depósito se refiere a cualquier material externo en la superficie de las rocas. Ejemplos de depósito son el estuco y los materiales de mampostería usados en la reconstrucción y para las restauraciones. Los depósitos se concentran en las partes inferiores porque muchos bloques originalmente estaban cubiertos estuco. Es quizás esta cubierta de estuco lo que protege a las rocas de esta parte de los daños de desprendimiento.

Se puede hacer una relación de los depósitos con las incrustaciones y eflorescencias porque éstas últimas se encuentran mayormente en la parte reconstruida. Esto significa que los materiales de mampostería utilizados en las zonas reconstruidas y restauradas fueron disueltos por el agua de lluvia y posteriormente precipitados sobre las rocas, llegando incluso a afectar una pequeña parte de los bloques originales.

El enmugrecimiento se distribuye por toda la pared, incluyendo la parte original y la reconstruida. Sin embargo, se extiende mayormente en la parte superior izquierda y centro. Se caracteriza por delimitar y seguir los patrones de escurrimiento de agua de lluvia. En ocasiones el enmugrecimiento puede llegar a formar depósitos con espesores milimétricos denominados como costra negra, aunque son escasos y tienen poca extensión.

En esta pared se encontró solamente un bloque con grafiti tallado en la superficie de la roca.

La colonización biológica se concentra en las partes más altas de la pared, pero también se desarrolla en las zonas bajas. En ambas zonas puede existir humedad y así permitir el crecimiento de organismos.

La mayor cantidad de grietas está en la parte reconstruida, sin embargo, afecta solamente a los bloques de roca y no a la mampostería. En la parte original se puede observar que prácticamente todas las grietas tienen una dirección vertical.

Pared 2 (Fig. 36). Los bloques de la base original están colocados de forma horizontal y son los más grandes de la pared. La parte reconstruida no muestra orden en el acomodo de los bloques, los cuales son de forma irregular.

En la parte original se prefirieron utilizar areniscas de grano grueso y medio, aunque los conglomerados y conglomerados calcáreos representan la mitad de los bloques más grandes.

La parte reconstruida está conformada principalmente por bloques de conglomerado, arenisca de grano grueso y de grano medio.

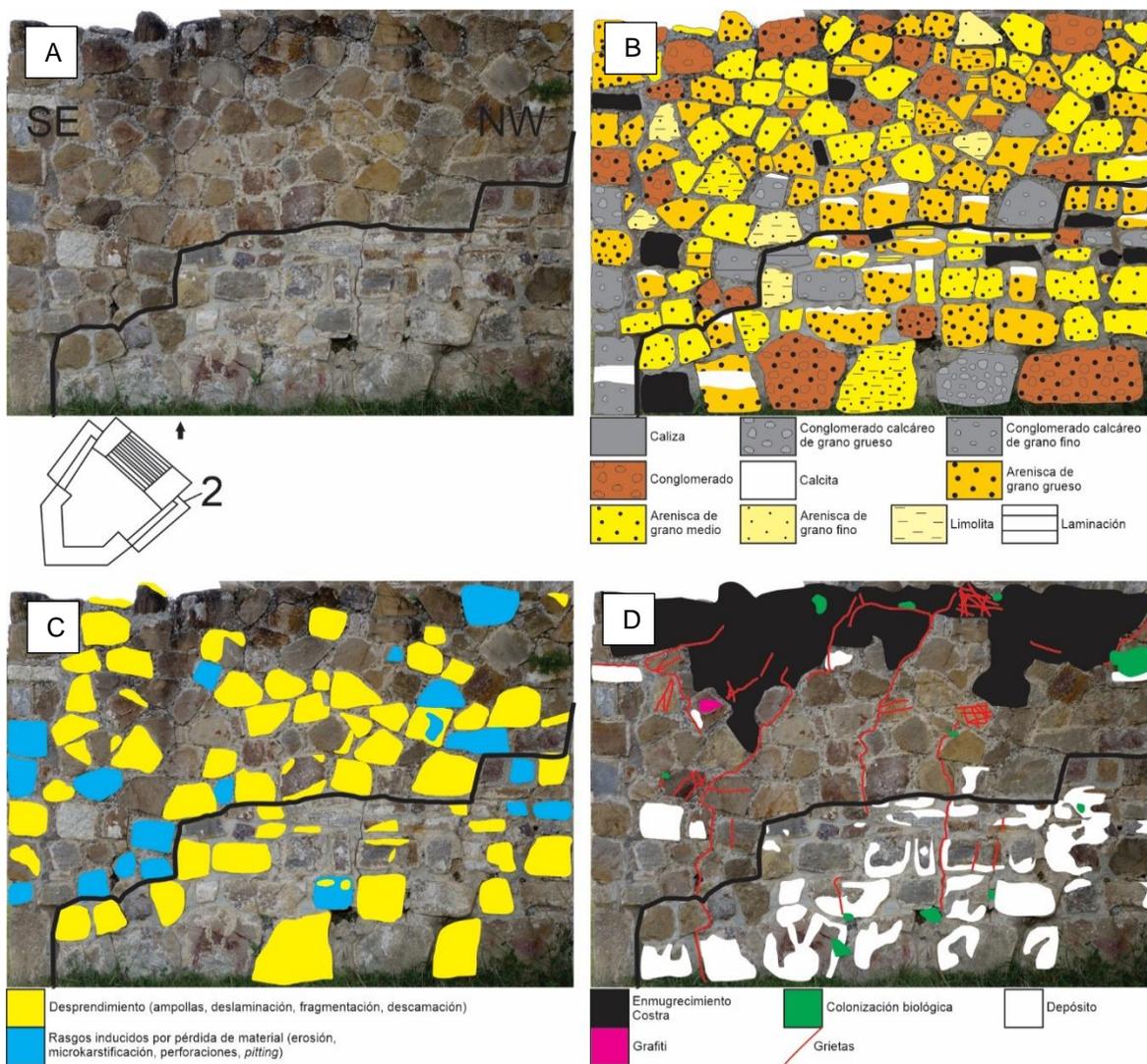


Figura 36. A. Pared 2 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por descamación y rasgos inducidos por la pérdida de material. D. Mapeo de daños para el deterioro por grietas, alteración cromática, depósito y colonización biológica.

Los rasgos inducidos por la pérdida de material se concentran casi en su mayoría en conglomerados y conglomerados calcáreos, además de en pocas areniscas de grano grueso. La gran parte de estos daños están en la parte reconstruida. A esta categoría pertenecen la erosión, *pitting*, microkarstificación y perforaciones.

Los daños de desprendimiento, en su mayoría representados por la deslaminación y descamación, junto con fragmentación y ampollas en menor medida, se distribuyen de manera similar en toda la pared, ya sea en la parte original o en la

reconstruida. Al parecer este deterioro no está condicionado por el tamaño de grano de las rocas, sino con el acomodo de los bloques.

El depósito existe casi totalmente en la parte original, mientras que en la parte reconstruida son pocos los bloques que tienen depósito de materiales de mampostería.

Solo hay enmugrecimiento en la parte superior de la zona reconstruida. Se observa que se produjo por el escurrimiento y la concentración de agua en dicha área.

Al igual que en la pared 1, en esta pared hay un bloque con grafiti tallado en la superficie de la roca.

La colonización biológica no está muy desarrollada, encontrándose arriba en la parte reconstruida cerca de la cima de la pared, lo que implica una relación con el agua que origina también el enmugrecimiento. En la zona original hay crecimiento de plantas en algunos huecos entre los bloques de roca.

Un daño que tiene un patrón reconocible inmediatamente es la distribución de las grietas que recorren de forma vertical y que se inclinan hacia la derecha de la pared. Este agrietamiento sigue el material de mampostería y rodea los bloques.

Pared 3 (Fig. 37). Los bloques de toda la parte original están colocados horizontalmente, tienen una forma rectangular y tamaños similares. En su base se encuentran las rocas más grandes.

La parte reconstruida no muestra un orden de acomodo de los bloques porque tienen formas irregulares. Las empleadas en esta parte son más grandes que las de la parte original, sin tomar en cuenta las de la base.

En la parte original se ve una tendencia por utilizar conglomerados calcáreos de grano grueso, arenisca de grano grueso y medio. Para la base, es decir, para los bloques más grandes, se usaron conglomerados calcáreos de grano grueso y uno de conglomerado.

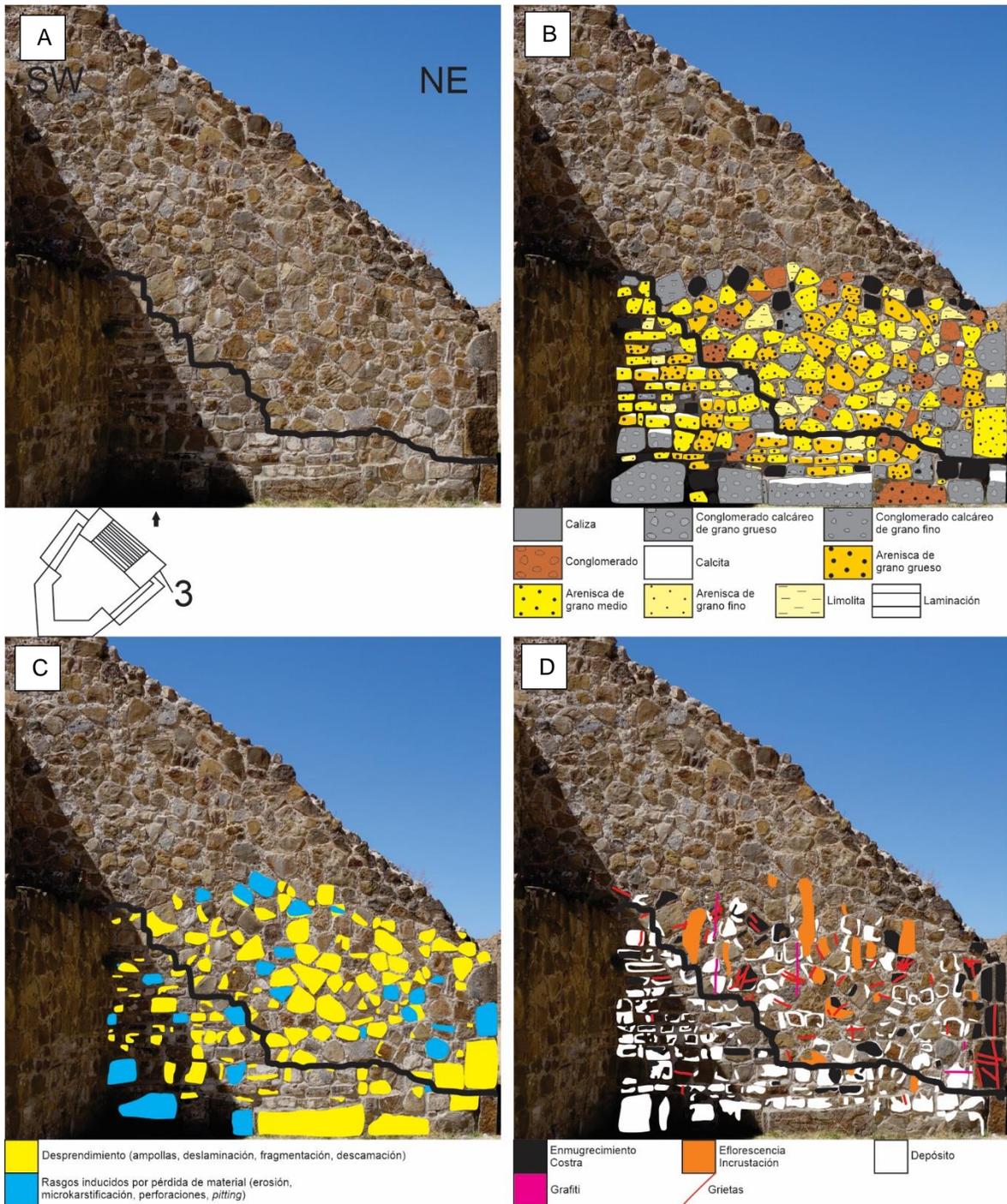


Figura 37. A. Pared 3 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por descamación y rasgos inducidos por la pérdida de material. D. Mapeo de daños para el deterioro por grietas, alteración cromática y depósito.

Para la reconstrucción se seleccionaron en su mayoría areniscas de grano grueso y medio, seguidas por conglomerados, conglomerados calcáreos y areniscas de grano fino.

Los rasgos inducidos por la pérdida de material no son tan numerosos como los daños por desprendimiento y están presentes en bloques tanto de la parte original como la reconstruida, afectando a conglomerados y conglomerados calcáreos. Las rocas en la parte original experimentan solamente *pitting*, mientras que en la parte reconstruida hay erosión, *pitting* y un bloque con microkarstificación.

Los daños de desprendimiento se distribuyen de manera similar en toda la pared, ya sea en la parte original o en la reconstruida y se encuentran en los diferentes tipos de roca. A pesar de esto, puede notarse que la superficie que ocupan en los bloques de la parte reconstruida es mayor, coincidiendo con que estos bloques son los más grandes de la pared y por lo tanto tienen mayor área, sin tomar en consideración las rocas de la base.

Se observa depósito en toda la pared, ocupando más extensión en la parte original. En la parte reconstruida se encuentran depósitos de material de mampostería en el perímetro de los bloques. Probablemente la disolución de este material genere las incrustaciones y eflorescencias que solamente existen en la parte reconstruida y que pueden llegar a afectar la parte original.

El enmugrecimiento está distribuido en algunos bloques de toda la pared sin tener un patrón definido y está limitado hacia la derecha debido al escurrimiento de agua de lluvia por la inclinación de la cima de la pared.

Los grafitis mapeados son marcas de pintura azul y no está claro si formaron parte de algún señalamiento durante los trabajos de restauración.

Algo destacable de esta pared es que no hay ningún tipo de colonización biológica quizás porque el material de mampostería utilizado en la restauración por los sismos de 1999 no retiene la humedad o por el mismo diseño de la pared.

Las grietas se concentran mayormente en los bloques de la parte reconstruida, aunque también hay algunas en la parte original. A diferencia de la pared 2, aquí no existen patrones de grietas en la mampostería.

Pared 4 (Fig. 38). Los bloques en la base de la parte original están colocados verticalmente y son los más grandes. Esto se observa en ambas paredes a los lados de los escalones. En esta zona, los bloques están acomodados horizontalmente.

En las paredes laterales reconstruidas, los bloques de roca no siguen un patrón regular de acomodo. Sin embargo, en los escalones tienen la misma orientación que las rocas de la parte original.

Las rocas más utilizadas en esta pared, tanto en la parte original como en la reconstruida son los conglomerados, conglomerados calcáreos, areniscas de grano grueso y medio.

Los rasgos inducidos por la pérdida de material encontrados fueron erosión, *pitting*, microkarstificación y perforaciones. Predominan en los conglomerados y conglomerados calcáreos tanto en la parte original como en la reconstruida.

La deslaminación y descamación se observaron en todos los tipos de roca. Los bloques de los escalones que tienen laminación posicionada horizontalmente pueden experimentar menos deslaminación que los bloques en los que se acomoda de forma paralela a la superficie del escalón.

El depósito visto en los escalones está distribuido entre la parte original y en la reconstruida. En el lado izquierdo cubre el perímetro de los bloques de la parte reconstruida y es en esta zona donde hay más incrustaciones y eflorescencias. Del lado derecho el depósito predomina en la parte original, cubriendo la mayoría de la superficie de los bloques.

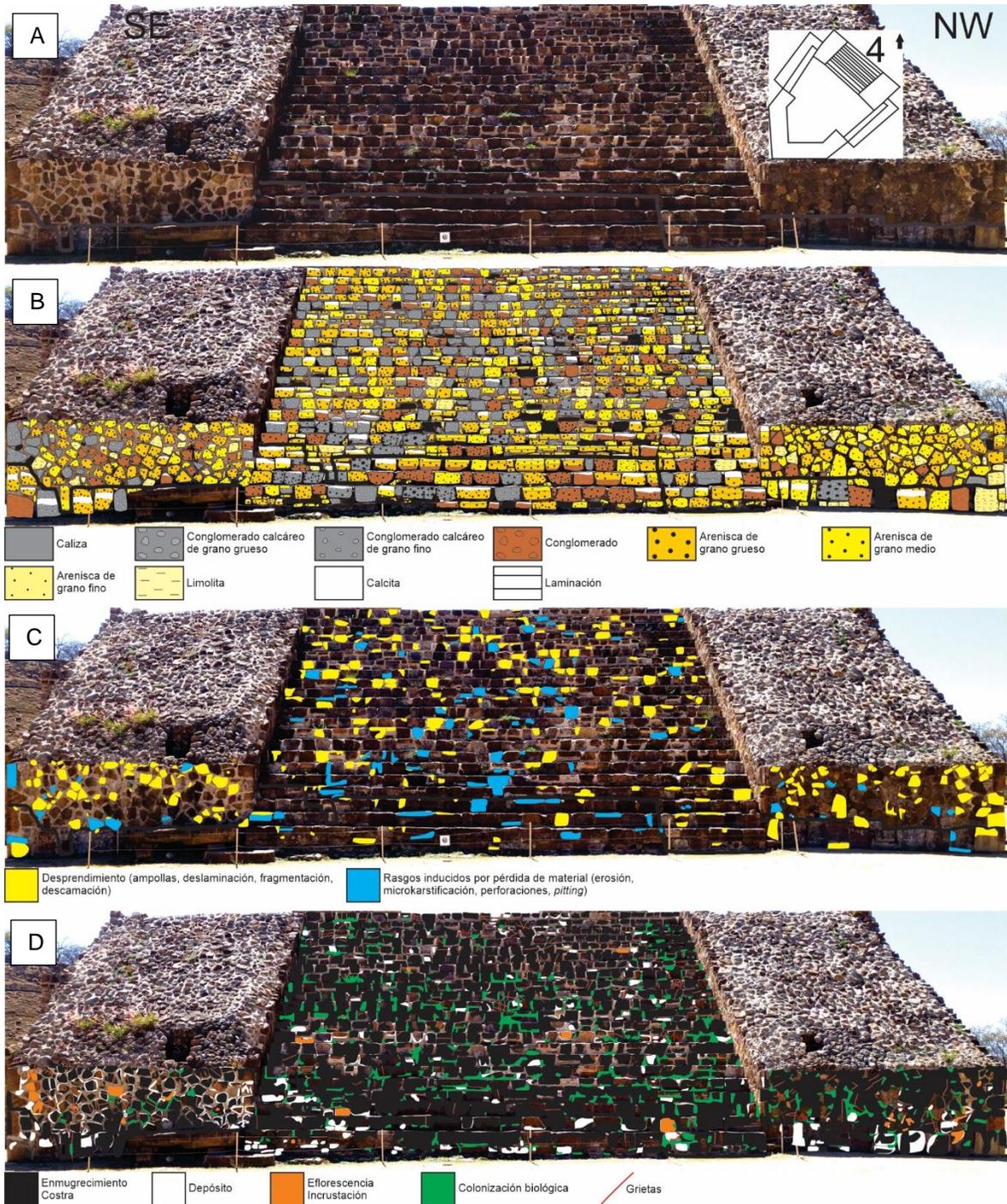


Figura 38. A. Pared 4 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por descamación y rasgos inducidos por la pérdida de material. D. Mapeo de daños para el deterioro por grietas, alteración cromática, depósito y colonización biológica.

El enmugrecimiento está muy extendido por todos los escalones y en las paredes laterales. Este hecho puede corresponder a que el agua de lluvia se estanca en los escalones y después cae hacia el siguiente arrastrando las partículas de polvo y depositándolas en la superficie de los bloques. Además, en las paredes laterales el enmugrecimiento está condicionado por la inclinación de sus cimas, provocando un mayor escurrimiento de agua.

La colonización biológica se relaciona también con la disponibilidad de agua y la humedad. Por esta razón se encuentra el desarrollo de organismos sobre todo en la mampostería utilizada en la reconstrucción de toda esta pared.

Igualmente, las grietas predominan en los bloques de las secciones reconstruidas. Sin embargo, tanto del lado izquierdo como del derecho hay una grieta vertical que corta el material de mampostería original y el usado en las reconstrucciones. Probablemente se originaron por algún sismo en zonas de debilidad o con una sobrecarga de la estructura.

Pared 5 (Fig. 39). Los bloques más grandes están en la base de la pared en la parte original. Se distingue algo de acomodo de los bloques en esa parte, ya sea de forma horizontal o vertical, pero en la sección reconstruida las rocas no se colocaron con una orientación definida.

Las rocas más usadas tanto en la parte original como en la restaurada fueron conglomerados y arenisca de grano grueso y medio.

Los daños de desprendimiento y los rasgos inducidos por la pérdida de material se distribuyen de manera similar en toda la pared. Los primeros se desarrollan en cualquier tipo de roca, mientras que los últimos predominan en conglomerados y areniscas de grano grueso.

El depósito es poco comparado con otras paredes y no se observaron incrustaciones ni eflorescencias.



Figura 39. A. Pared 5 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por descamación y rasgos inducidos por la pérdida de material. D. Mapeo de daños para el deterioro por grietas, alteración cromática, depósito y colonización biológica.

El enmugrecimiento comienza desde la parte de arriba y sigue la inclinación de la cima de la pared. Se concentra en la parte reconstruida y en la derecha de la parte original. En esta zona el enmugrecimiento es provocado por el escurrimiento de agua de lluvia desde la pared 6.

Las grietas afectan los bloques de toda la pared y no se extienden en la mampostería. La colonización biológica es escasa.

Pared 6 (Fig. 40). Los bloques más grandes de toda la pared están en la base original del primer y segundo piso. Se posicionaron de manera horizontal y vertical, con algunos bloques de forma irregular no orientados. El primer piso se compone de conglomerados y areniscas de grano grueso. En el piso de arriba se usaron principalmente conglomerados calcáreos, conglomerados y areniscas de grano medio.

Los bloques de la parte reconstruida no tienen orientación regular a excepción de la saliente donde se ve claramente el acomodo horizontal de las rocas. En esta sección predominan las areniscas de grano grueso y medio.

Los rasgos inducidos por la pérdida de material se concentran casi totalmente en la parte original en conglomerados y conglomerados calcáreos. Los daños de desprendimiento se distribuyen por toda la pared, pero ocupan un poco más de superficie en los bloques grandes de la sección original.

El depósito existe solamente en el primer piso y tiene una mayor superficie en la parte original, aunque también se observa en el área reconstruida. Aquí no se detectó la presencia de incrustaciones o eflorescencias.

El deterioro predominante es el enmugrecimiento que está completamente extendido en todo el segundo piso abarcando la parte original y la reconstruida. Continúa en la saliente y acaba de manera abrupta ahí, pero en una parte llega hasta la parte inferior de la pared siguiendo el patrón de escurrimiento del agua. Es posible que el enmugrecimiento se detenga en la saliente porque actúa como un techo y protege de cierta manera de la lluvia.

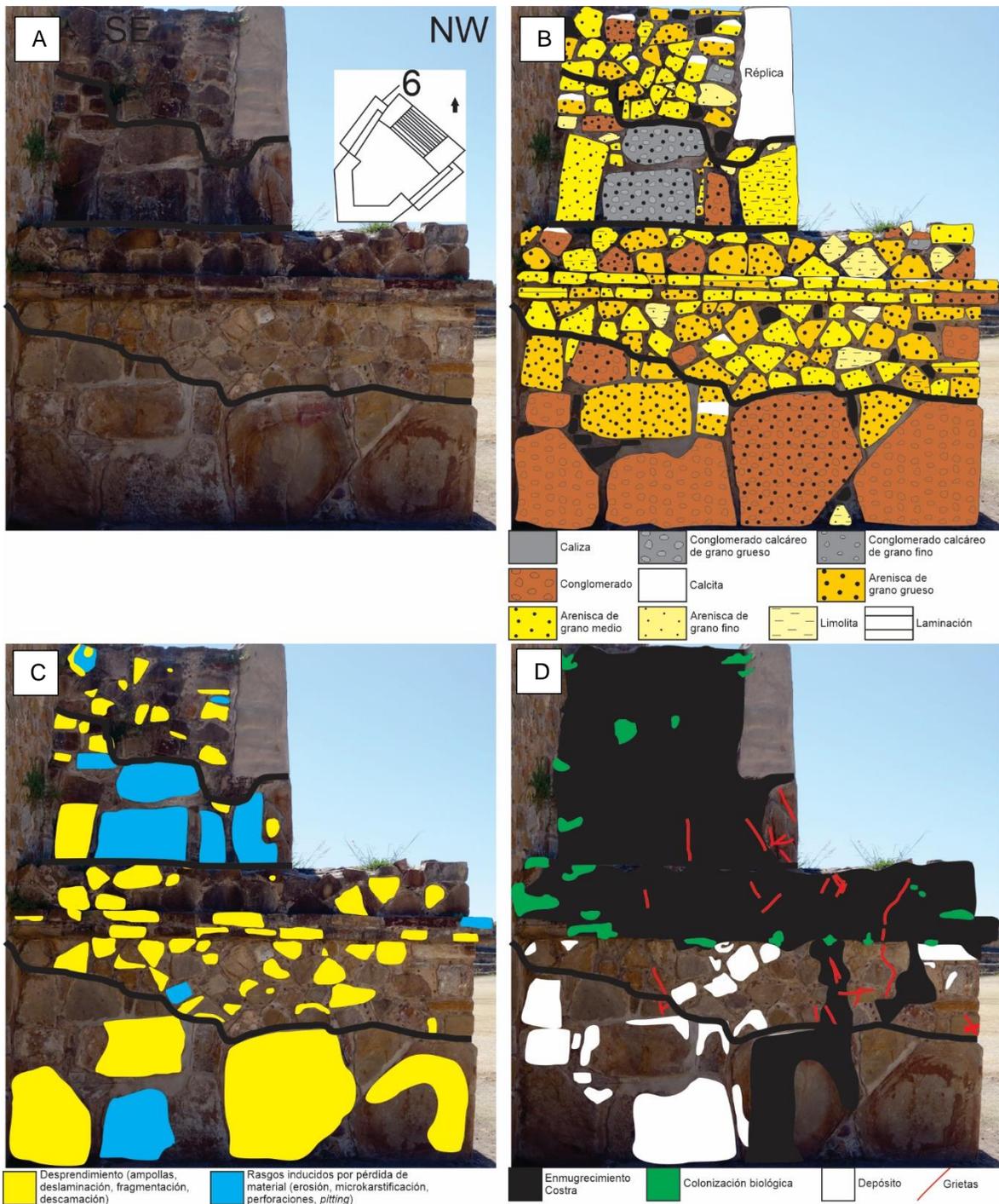


Figura 40. A. Pared 6 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida en la pared de abajo. Igualmente, las dos líneas del muro superior dividen la parte original de la reconstruida. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por descamación y rasgos inducidos por la pérdida de material. D. Mapeo de daños para el deterioro por grietas, alteración cromática, depósito y colonización biológica.

El hecho anterior tiene una desventaja ya que el agua permanece en los materiales más tiempo al estar protegida por la sombra de la saliente, lo que permite el desarrollo de colonización biológica en esta zona.

Las grietas afectan mayormente los bloques y a la mampostería de la parte reconstruida del primer piso. El mapeo muestra que las grietas siguen un patrón vertical.

Pared 7 (Fig. 41). En el primer piso, los bloques de la parte original son los más grandes y están colocados de forma vertical mayormente. Esta sección se construyó con conglomerados y pocos conglomerados calcáreos.

Las rocas usadas en la parte reconstruida del primer piso no tienen orientación a excepción de la saliente donde se ve claramente el acomodo horizontal de los bloques. En el segundo piso se emplearon bloques tan grandes como los de la parte original y fueron acomodados de forma vertical. Destaca el uso de areniscas de grano grueso y medio, seguidas por conglomerados y conglomerados calcáreos de grano grueso.

Los daños de desprendimiento y los rasgos inducidos por la pérdida de material se distribuyen de manera uniforme por toda la pared. Los primeros están en todos los tipos de roca, mientras que los últimos se concentran en conglomerados y conglomerados calcáreos.

El depósito se observa en toda la pared, tanto en las partes reconstruidas como en las originales. Sin embargo, el material de mampostería utilizado en las restauraciones puede estar condicionando el desarrollo de incrustaciones y eflorescencias porque solamente se observan estos daños en la parte reconstruida. Más aun, este tipo de deterioro se concentra por debajo de la saliente, lo que puede significar que el material de mampostería en esta zona se disuelve fácilmente con el agua que se acumula en la saliente y se precipita después, generando esos patrones observados en el mapeo.

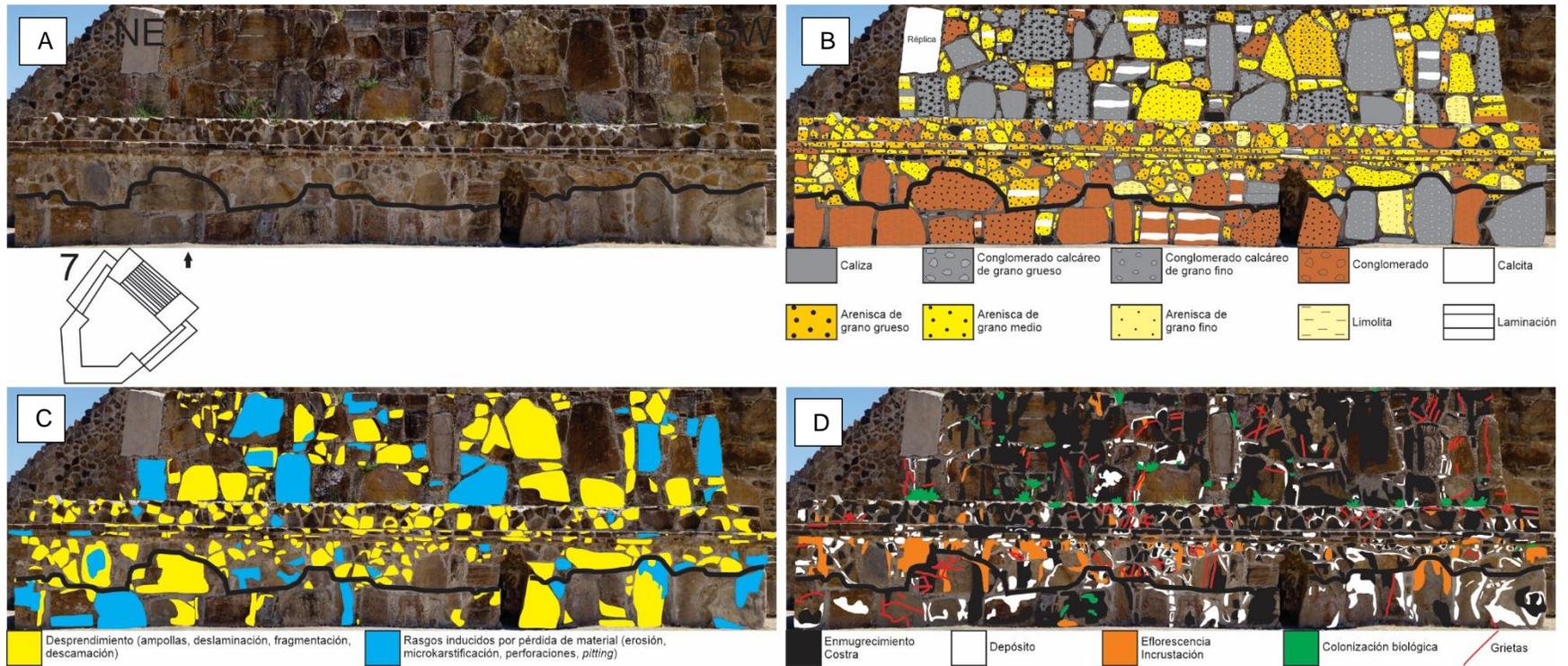


Figura 41. A. Pared 7 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por descamación y rasgos inducidos por la pérdida de material. D. Mapeo de daños para el deterioro por grietas, alteración cromática, depósitos y colonización biológica.

El enmugrecimiento está extendido en el segundo piso y en la saliente. En la parte original también hay enmugrecimiento, pero solo en algunos bloques. Estos patrones son similares a los encontrados en el mapeo de la pared 6, en los que este deterioro abarca el segundo piso y se detiene prácticamente en la saliente.

La colonización biológica se concentra en la parte inferior del segundo piso debido a que el agua de lluvia se queda estancada y es absorbida por los bloques o la mampostería permitiendo el desarrollo de plantas y otros organismos.

Pared 8 (Fig. 42). Los bloques de la parte original son los más grandes de toda la pared. En el primer piso están acomodados con el eje más largo de forma vertical, mientras que hacia el segundo piso se orientan horizontalmente. Resalta el uso de principal de conglomerados calcáreos.

En la parte reconstruida, los bloques son más pequeños y no siguen una orientación preferencial. En esta sección se utilizaron mayormente areniscas de grano grueso y medio.

Los daños de desprendimiento y los rasgos inducidos por la pérdida de material están presentes en más bloques de la parte reconstruida. Los últimos afectan sobre todo a conglomerados y conglomerados calcáreos.

El depósito es escaso en esta pared, ocupando más superficie en la parte original. No hay incrustaciones ni eflorescencias y el enmugrecimiento está solamente en la parte reconstruida, pero en la cima de la pared y no tiene gran extensión. De forma similar, la colonización biológica y las grietas son escasas en la pared.

Pared 9 (Fig. 43). En el primer piso, los bloques de la base son los más grandes, seguidos por rocas más pequeñas posicionadas de forma horizontal. La parte reconstruida sigue este mismo acomodo de los bloques de manera horizontal.

En el segundo piso, los bloques de la base son más grandes que los del primer piso. Están colocados de forma vertical y después pasan a estar posicionados horizontalmente. Para la parte reconstruida se siguió la misma tendencia.

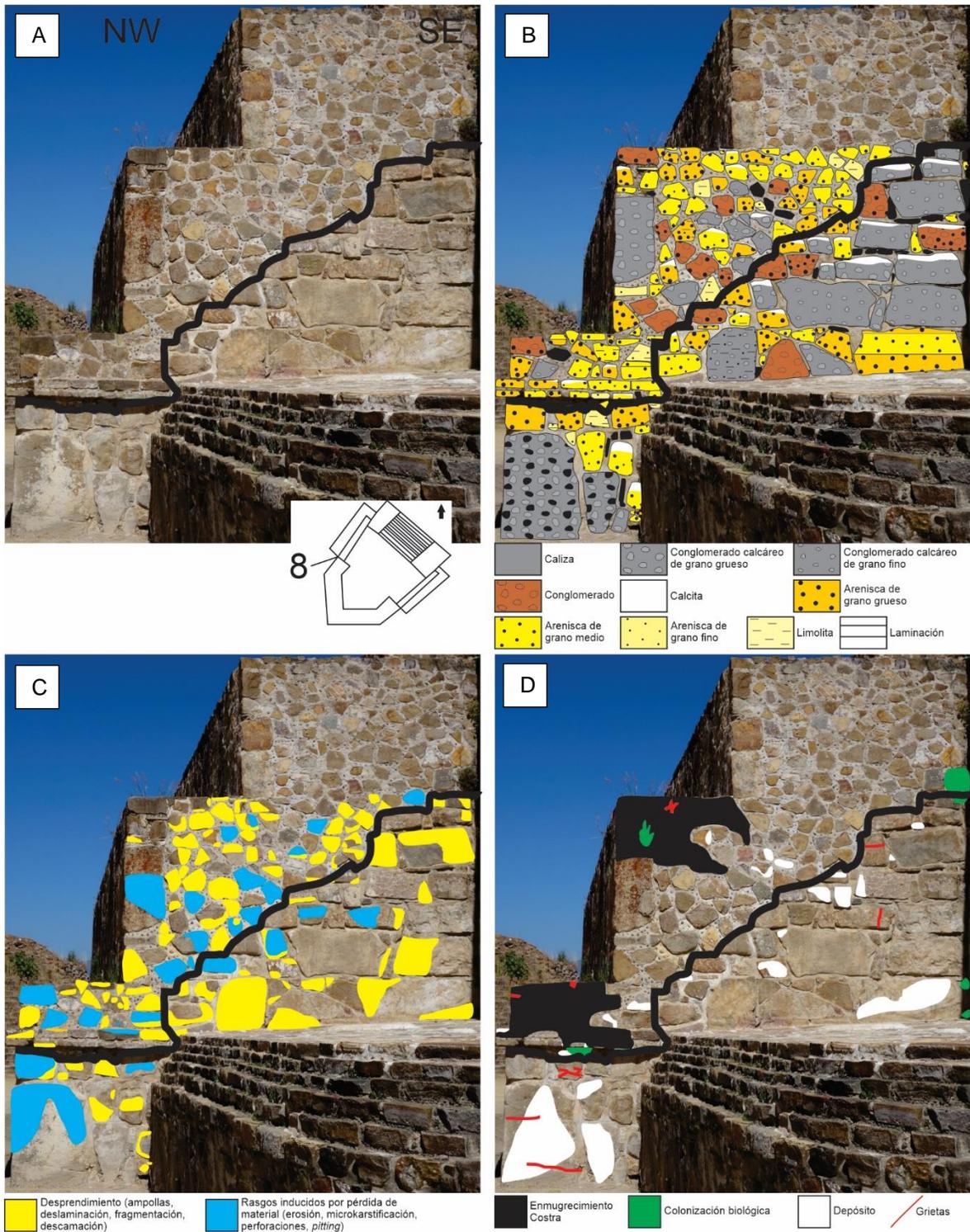


Figura 42. A. Pared 8 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por descamación y rasgos inducidos por la pérdida de material. D. Mapeo de daños para el deterioro por grietas, alteración cromática, depósito y colonización biológica.

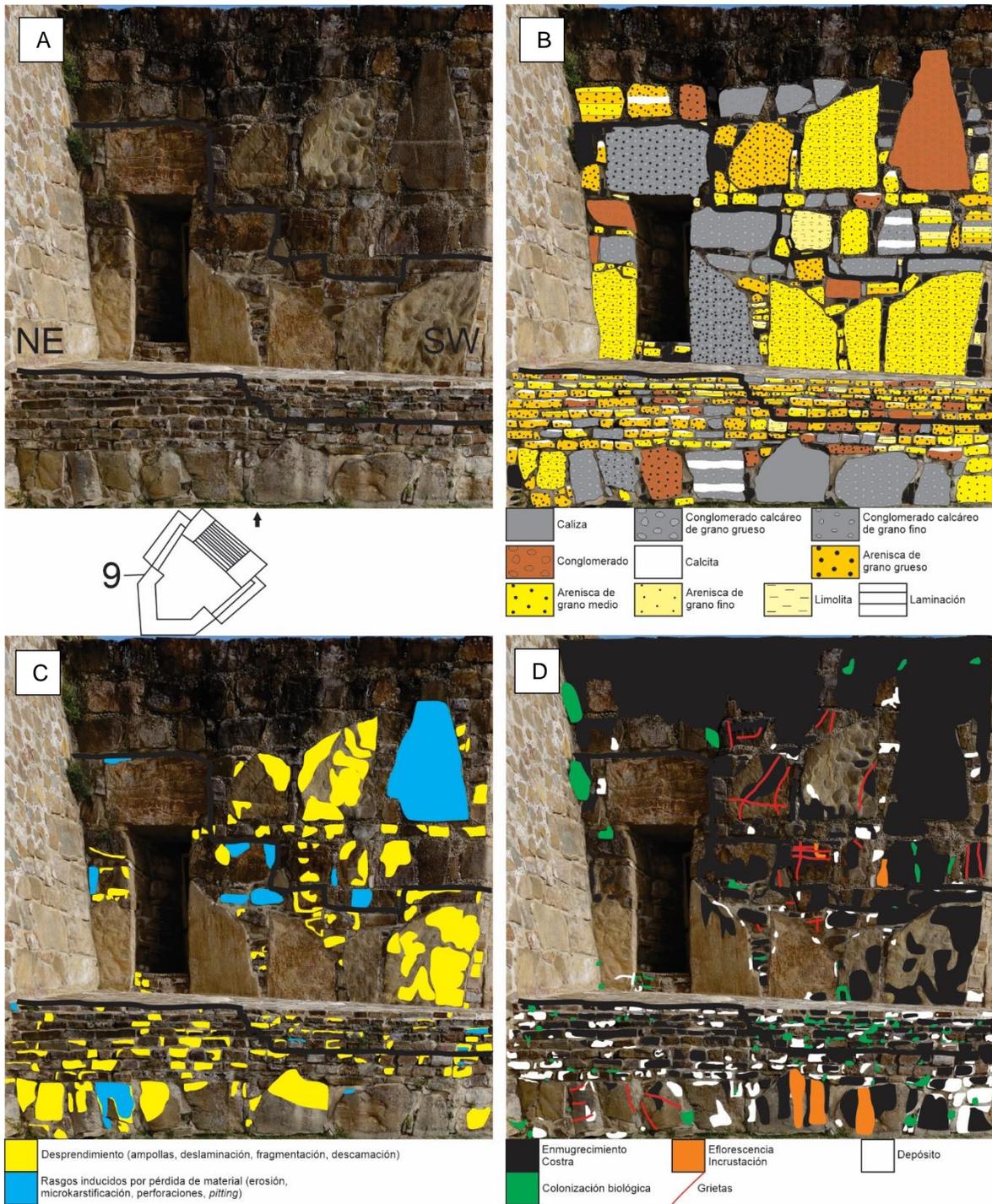


Figura 43. A. Pared 9 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida en la pared de abajo. Igualmente, la línea del muro superior divide la parte original de la reconstruida. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por descamación y rasgos inducidos por la pérdida de material. D. Mapeo de daños para el deterioro por grietas, alteración cromática, depósito y colonización biológica.

En las secciones originales, las rocas de mayor dimensión son los conglomerados calcáreos de grano grueso y las areniscas de grano medio. Para el resto de la parte original y también en la parte reconstruida se utilizaron predominantemente areniscas de grano grueso y medio.

En toda la pared hay daños de desprendimiento y rasgos inducidos por la pérdida de material. Predominan los primeros en rocas de cualquier tipo, mientras que los segundos se concentran casi totalmente en conglomerados y conglomerados calcáreos.

El depósito ocupa mayor superficie en el primer piso y se distribuye de forma similar en la parte original y en la reconstruida. Las incrustaciones y eflorescencias con más extensión, a diferencia de otras paredes, están concentradas en la sección original.

El enmugrecimiento abarca mucha de la superficie en el segundo piso, afectando un poco más a la parte reconstruida. En el primer piso se tiene la misma situación, pero con menor extensión.

Sin embargo, la colonización biológica en el primer piso está localizada en la parte reconstruida. Este hecho quizás está relacionado con la composición y porosidad de la mampostería que difiere de las rocas y del estuco original.

Al igual que la colonización biológica, hay más grietas en la parte reconstruida, pero se encuentran en los bloques de roca y no en la mampostería.

Pared 10 (Fig. 44). En la parte original del primer piso, los bloques más grandes están en la base y hacia la derecha. Más arriba las rocas están acomodadas de forma horizontal. La parte reconstruida sigue el mismo patrón horizontal, excepto más hacia la derecha, donde se nota que los bloques no tienen orientación.

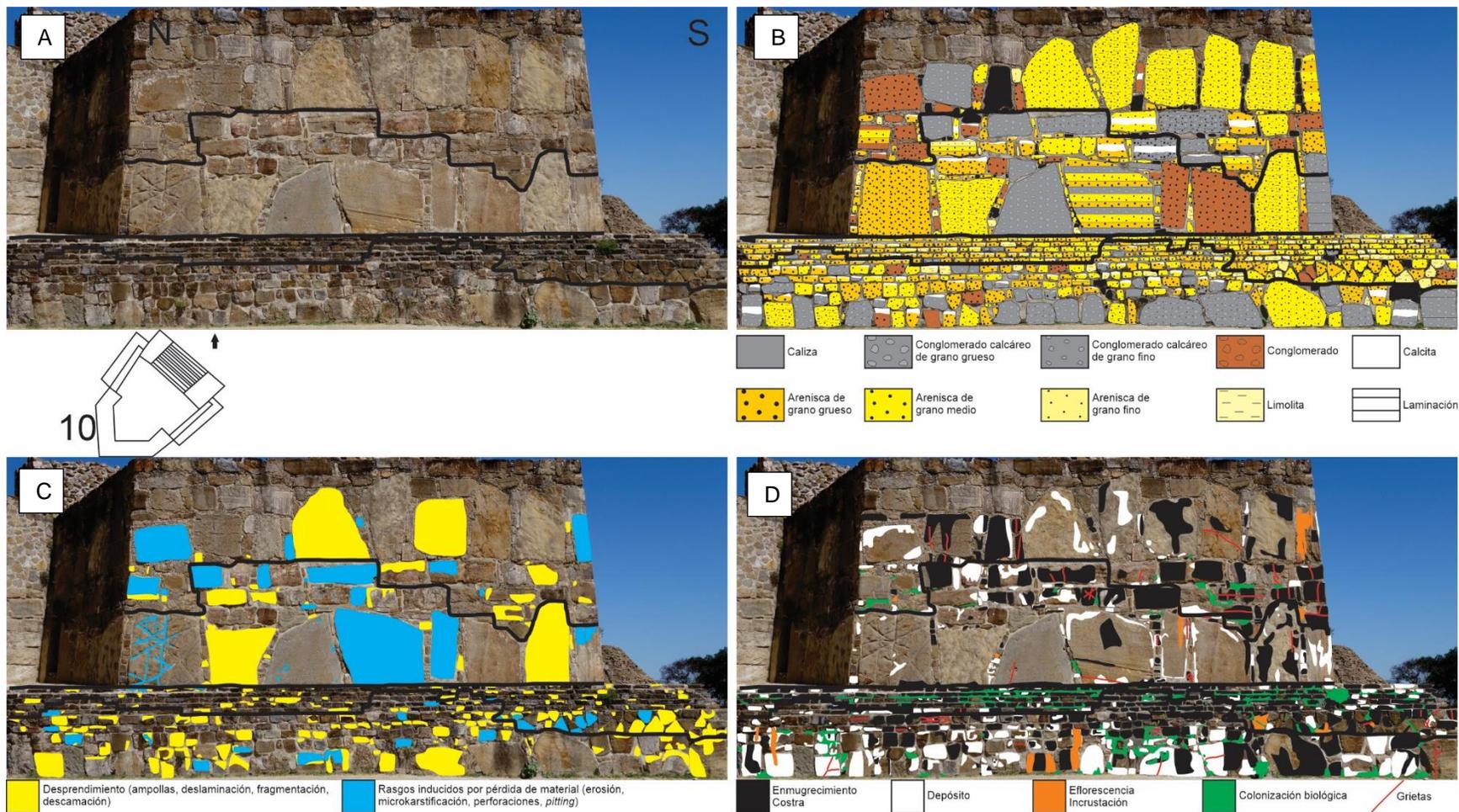


Figura 44. A. Pared 10 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida en la pared de abajo. Igualmente, las dos líneas del muro superior dividen la parte original de la reconstruida. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por descamación y rasgos inducidos por la pérdida de material. D. Mapeo de daños para el deterioro por grietas, alteración cromática, depósito y colonización biológica.

En el segundo piso, en la parte original se usaron bloques más grandes de forma casi cuadra y hacia la derecha son más largos y están posicionados verticalmente. Más arriba el tamaño de las rocas disminuye y se distribuyen de forma horizontal. En la parte reconstruida los bloques empleados son casi del mismo tamaño que los originales y se siguió el acomodo horizontal para después colocar las rocas verticalmente hacia la cima de la pared.

En la base original del primer piso, las rocas más grandes utilizadas fueron los conglomerados calcáreos de grano grueso, mientras que en el segundo piso se seleccionaron conglomerados calcáreos de grano grueso, conglomerados, areniscas de grano grueso y medio para los bloques más grandes.

Para los bloques más pequeños se prefirieron las areniscas de grano grueso y medio en la parte original y en la reconstruida.

Los daños de desprendimiento y los rasgos inducidos por la pérdida de material afectan de igual forma a los bloques de toda la pared, ya sea en la parte original o en la reconstruida. En el primer piso el desprendimiento ocupa más superficie, mientras que en el segundo piso predominan la erosión, *pitting* y microkarstificación, los cuales se concentran en conglomerados y conglomerados calcáreos.

El depósito se encuentra principalmente en la parte original del primer piso, pero también está presente por toda la pared.

Las incrustaciones y eflorescencias afectan igualmente a toda la pared sin importar si la pared fue reconstruida o es la original.

El enmugrecimiento se desarrolla más en el primer piso, específicamente en la parte de los pequeños escalones. Es posible que suceda lo mismo que en la pared 4, en donde el agua de lluvia se estanca en los escalones y después se desborda hacia abajo siguiendo el mismo ciclo.

Esto tiene un efecto en el crecimiento de la colonización biológica, la cual se extiende en su mayoría en los mismos escalones del primer piso de la parte reconstruida, llegando incluso a saltarse la parte original. Se desarrolla en el material de mampostería, lo que sugiere que este material conserva la humedad

más que las mismas rocas o que el estuco original. A pesar de esto, existe algo de colonización biológica en varias zonas de la parte original.

Hay pocas grietas en la pared. En el primer piso se encuentran en los bloques de la parte original y en el segundo piso predominan en las rocas de la parte reconstruida.

Pared 11 (Fig. 45). En la parte original del primer piso los bloques más grandes están en la base. Se usaron principalmente conglomerados y conglomerados calcáreos de grano grueso. Los bloques de la parte reconstruida no tienen orientación hasta que se llega a la cima de la pared donde están colocados de forma horizontal.

En la parte original del segundo piso los bloques son más grandes comparados con los del primer piso y se colocaron de forma vertical. Aquí se prefirieron conglomerados calcáreos de grano grueso, areniscas de grano grueso y medio. Para la parte reconstruida se emplearon mayormente conglomerados calcáreos de grano grueso y se les acomodó de forma horizontal para después pasar a una orientación vertical.

Los rasgos inducidos por la pérdida de material abarcan más superficie que los daños por desprendimiento y afectan principalmente a los bloques grandes (conglomerados calcáreos de grano grueso) en el segundo piso.

El depósito está en su mayoría en las partes originales, pero es común encontrar depósitos cubriendo varios bloques de la parte reconstruida.

En las zonas reconstruidas existen incrustaciones y eflorescencias, por lo que es probable que sean materiales provenientes de la misma mampostería utilizada en restauraciones. Este daño predomina en el segundo piso.

El enmugrecimiento se concentra en la parte reconstruida del primer piso, específicamente en los pequeños escalones y puede llegar a afectar algunas rocas de la parte original. Al igual que la pared 10, el acomodo de los bloques hace que el agua se acumule y escurra hacia el siguiente escalón, provocando un mayor enmugrecimiento en toda esa zona.

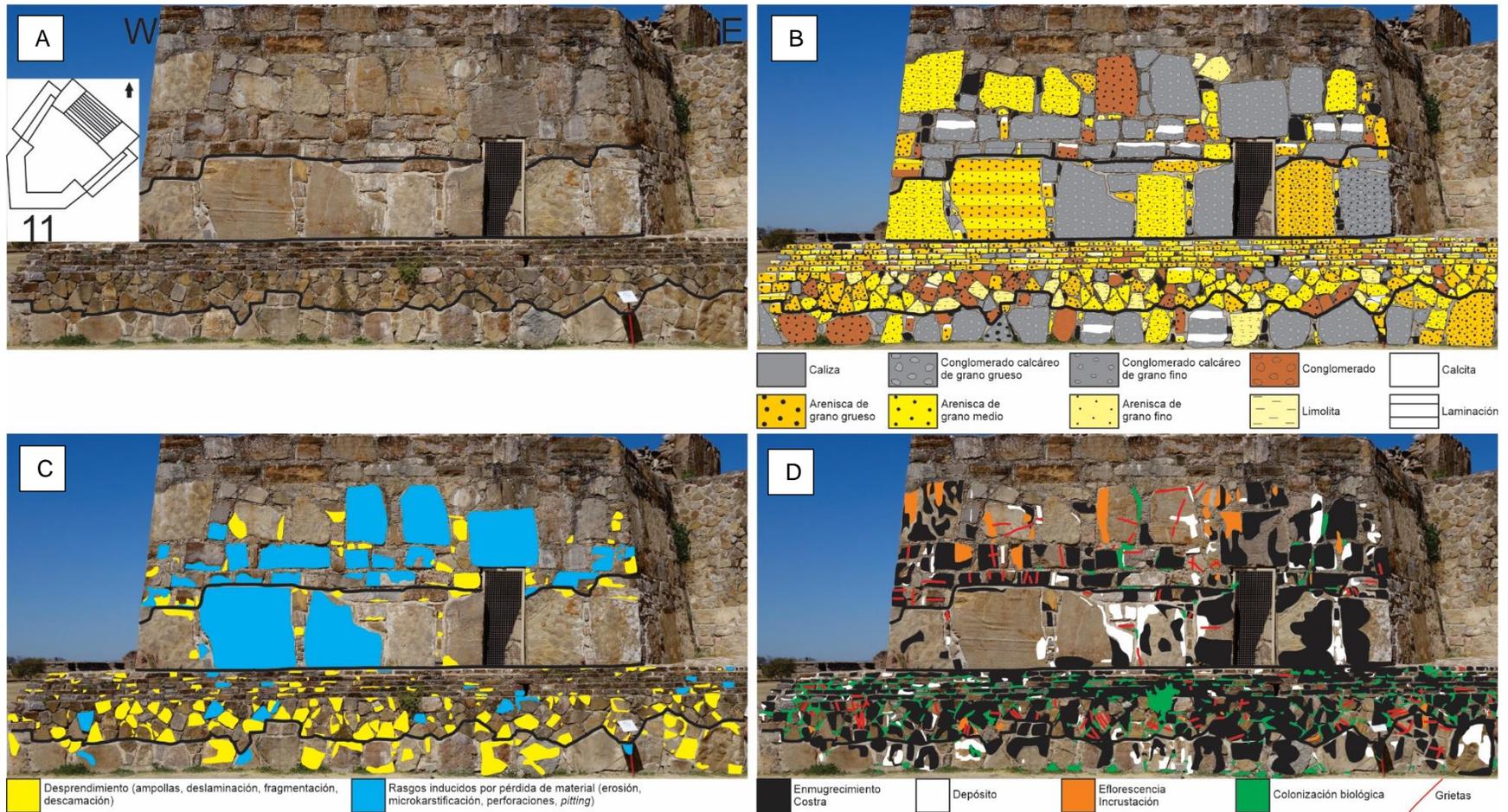


Figura 45. A. Pared 11 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida en la pared de abajo. Igualmente, las dos líneas del muro superior dividen la parte original de la reconstruida. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por descamación y rasgos inducidos por la pérdida de material. D. Mapeo de daños para el deterioro por grietas, alteración cromática, depósito y colonización biológica.

En el segundo piso el enmugrecimiento también ocupa mayor superficie en lo reconstruido, llegando a alcanzar parte de la sección original.

La colonización biológica abunda en la parte reconstruida del primer piso, esencialmente en el material de mampostería alrededor de los bloques. Este patrón es el mismo que se observa en la pared 10 en los escalones, aunque en esta pared llega más abajo. En las otras partes también existe colonización biológica, aunque no se extiende demasiado.

Las grietas igualmente predominan en las partes reconstruidas, pero en los bloques de roca y no en la mampostería.

Pared 12 inferior (Fig. 46). Los bloques más grandes están en la base original y parece que no siguen alguna orientación preferencial. Solo hacia la derecha se posicionaron de forma horizontal. En la parte reconstruida no muestran orientación, pero hacia arriba sí se colocaron los bloques de forma horizontal. Se utilizaron en su mayoría areniscas de grano grueso y medio en ambas partes.

Los rasgos inducidos por la pérdida de material se concentran en la parte reconstruida, específicamente en algunos de los conglomerados y conglomerados calcáreos.

El desprendimiento se encuentra distribuido tanto en la parte original como en la reconstruida. En esta pared se nota cómo los bloques colocados de forma horizontal tienen menos daños de desprendimiento, lo que puede deberse a que la laminación de las rocas no está paralela a la superficie de la pared y también porque tienen menos área en la que pueden actuar los procesos de meteorización.

El depósito ocupa una mayor superficie en la parte original, pero se encuentra distribuida por toda la pared.

La única parte de deterioro por incrustación y eflorescencia se produce en la parte reconstruida y pasa hacia la parte original.

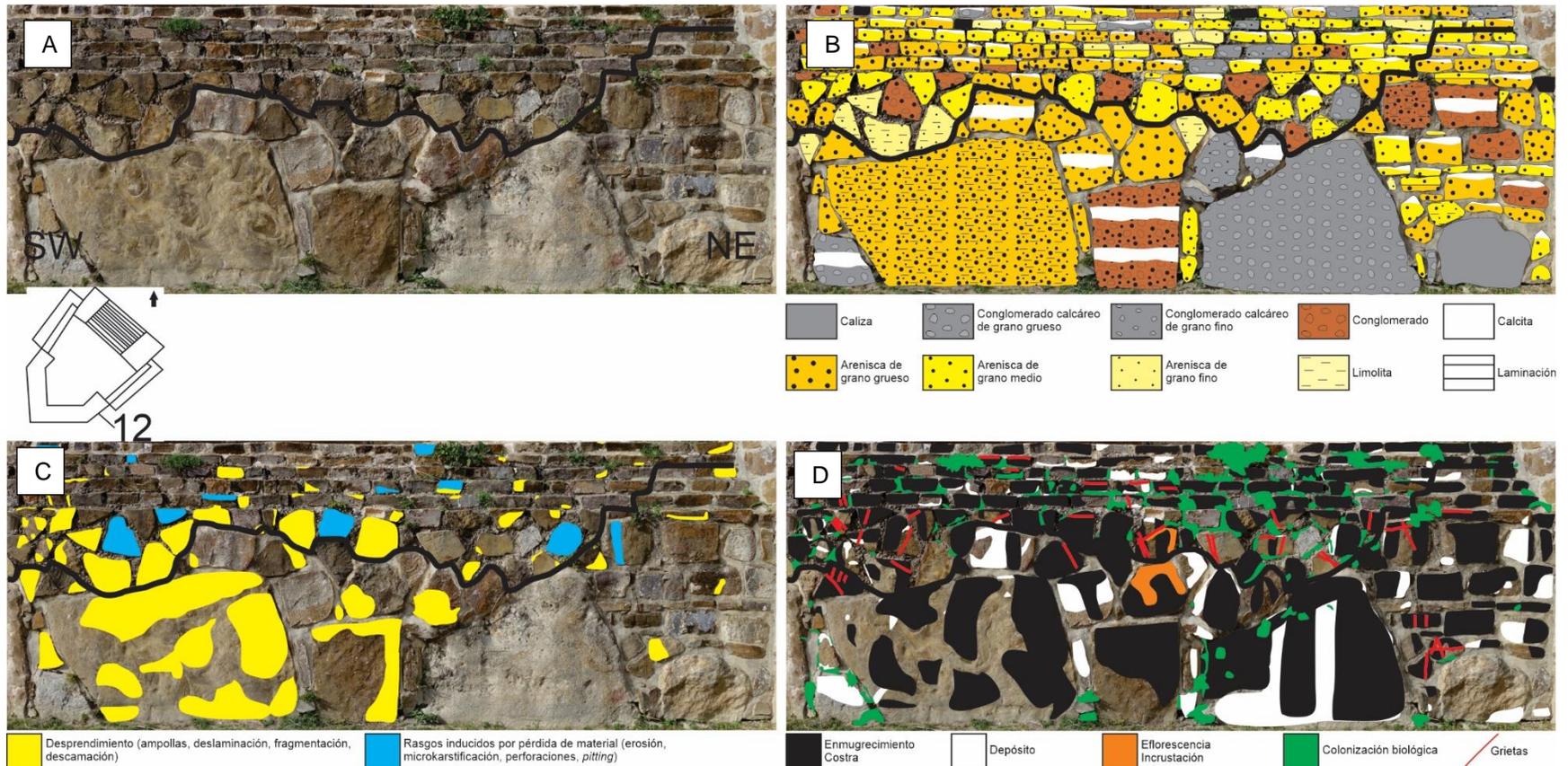


Figura 46. A. Pared 12 de abajo del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por descamación y rasgos inducidos por la pérdida de material. D. Mapeo de daños para el deterioro por grietas, alteración cromática, depósito y colonización biológica.

El enmugrecimiento afecta toda la pared. En los bloques superiores sigue el mismo patrón observado en las otras paredes con escalones.

También la colonización biológica afecta notablemente los escalones de la parte reconstruida debido probablemente a que el material de mampostería retiene humedad y causa que se reproduzcan los organismos. En la parte original hay menos colonización biológica que se desarrolla en huecos entre las rocas y el estuco.

Las grietas predominan igualmente en la parte reconstruida, justo en el límite entre las dos partes. Afectan los bloques más bien que la mampostería.

Pared 12 superior (Fig. 47). Los bloques de la parte original están colocados de forma horizontal y más arriba parece que estarían acomodados verticalmente. En la parte reconstruida se siguió este patrón y los bloques grandes se orientaron de forma vertical.

Para la construcción de la sección original se usaron conglomerados calcáreos de grano grueso, areniscas de grano grueso y medio como las principales litologías.

Los rasgos inducidos por la pérdida de material tienen mayor extensión que los daños por desprendimiento y se concentran en los bloques de la parte original, sobre todo en conglomerados y conglomerados calcáreos de grano grueso.

El depósito se extiende en su mayoría en la parte original, mientras que las incrustaciones y eflorescencias se encuentran en la parte reconstruida.

El enmugrecimiento está presente en toda la pared, aunque predomina en la parte original. Hacia la derecha se observa que el enmugrecimiento llega más abajo, lo que puede estar relacionado con el escurrimiento de agua de la pared 13.

La colonización biológica domina también en la derecha, lo que sugiere que en esta zona entre las dos paredes se concentra la mayor cantidad de humedad.

Las grietas mapeadas se encuentran en los bloques de roca y no sobre la mampostería. Además, su número se incrementa hacia la izquierda de la pared.

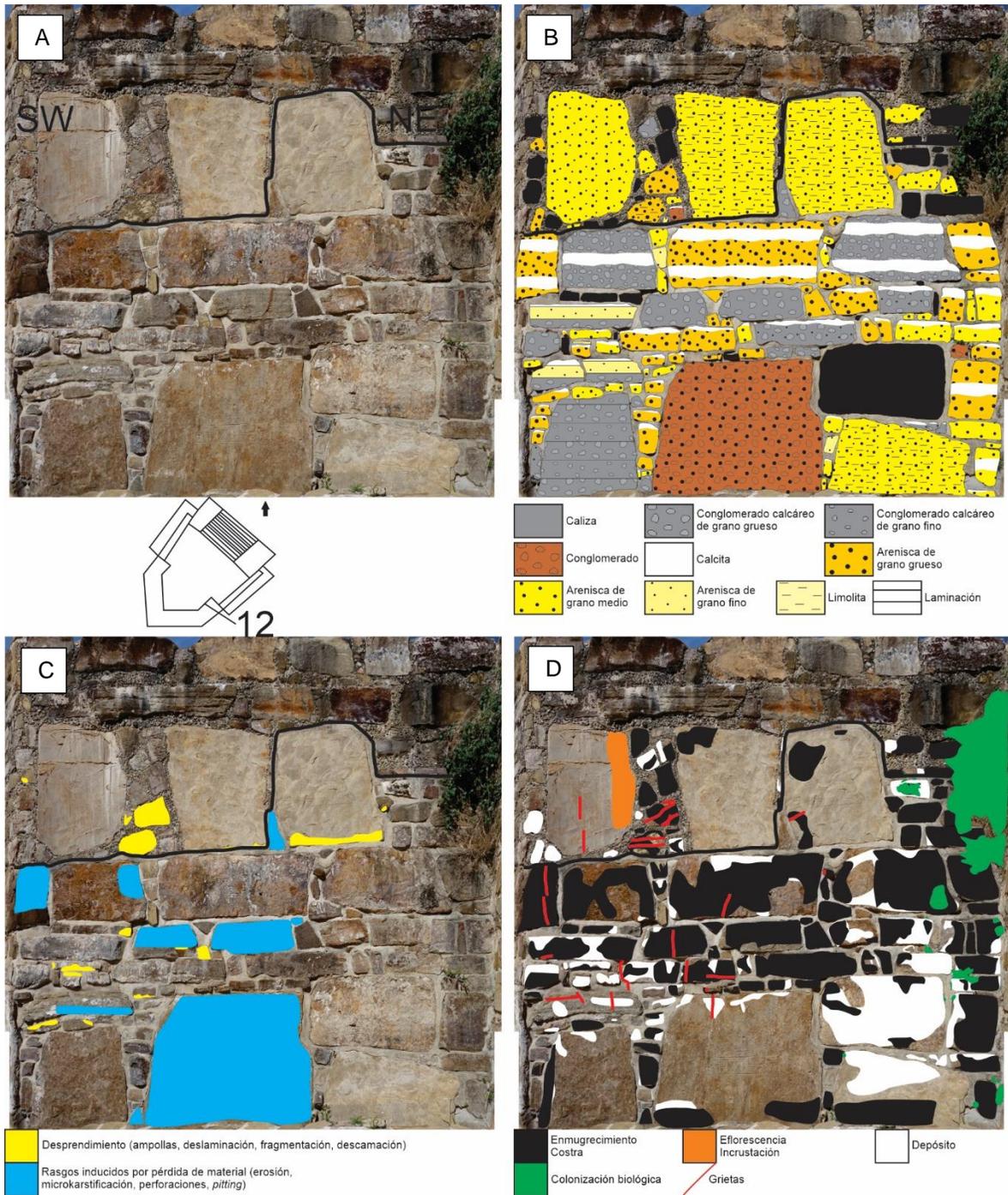


Figura 47. A. Pared 12 de arriba del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por descamación y rasgos inducidos por la pérdida de material. D. Mapeo de daños para el deterioro por grietas, alteración cromática, depósito y colonización biológica.

Pared 13 (Fig. 48). La mayor parte de los bloques de la parte original están acomodados de forma horizontal. Al contrario, los bloques de la sección reconstruida no se posicionaron de acuerdo con alguna orientación.

Las rocas más utilizadas fueron las areniscas de grano grueso y medio. Esto es para ambas secciones, la original y la reconstruida.

Los rasgos inducidos por la pérdida de material se concentran en la parte reconstruida en conglomerados y conglomerados calcáreos. Los daños de desprendimiento se distribuyen de manera uniforme en toda la pared.

El depósito cubre mucha de la superficie de las rocas de la parte original, mientras que en la sección reconstruida se ubica en el perímetro de los bloques. En esta pared no se encontraron incrustaciones ni eflorescencias.

El enmugrecimiento sigue claramente los patrones de escurrimiento del agua de lluvia, los cuales comienzan en las partes superiores de la pared. Hacia la derecha se puede notar que el enmugrecimiento llega más abajo, pero no afecta en gran medida la sección original.

Destaca el crecimiento de colonización biológica en el material de mampostería de la parte reconstruida, específicamente en el límite con la pared 12 en la izquierda y más hacia el centro. En el resto de la pared no se observa el desarrollo de organismos.

Las grietas se extienden en los bloques de la parte reconstruida, más hacia la derecha donde se sobreponen al enmugrecimiento.

Pared de la Galería de los Danzantes (Fig. 49). Los Danzantes siguen un patrón de acomodo definido: en la fila inferior los bloques están verticales, seguidos por bloques horizontales y vuelven a posicionarse verticalmente en la tercera fila y en la última de forma horizontal.

Entre los bloques de la tercera fila y también entre algunos Danzantes hay espacio en donde se utilizaron bloques más pequeños sin una orientación definida.

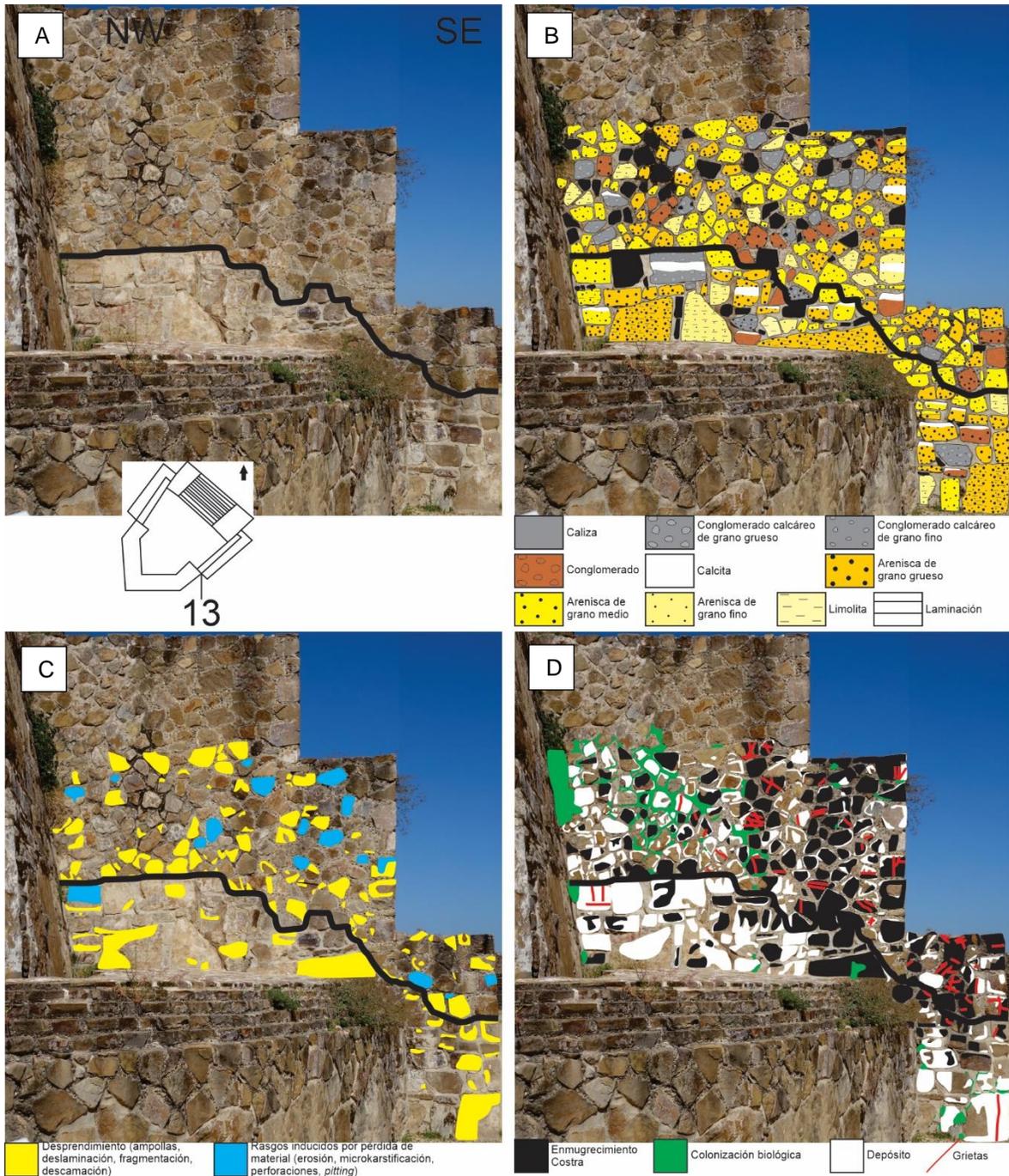


Figura 48. A. Pared 13 del Edificio J con su orientación y ubicación. La línea separa la parte inferior original de la parte superior reconstruida. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por descamación y rasgos inducidos por la pérdida de material. D. Mapeo de daños para el deterioro por grietas, alteración cromática, depósito y colonización biológica.

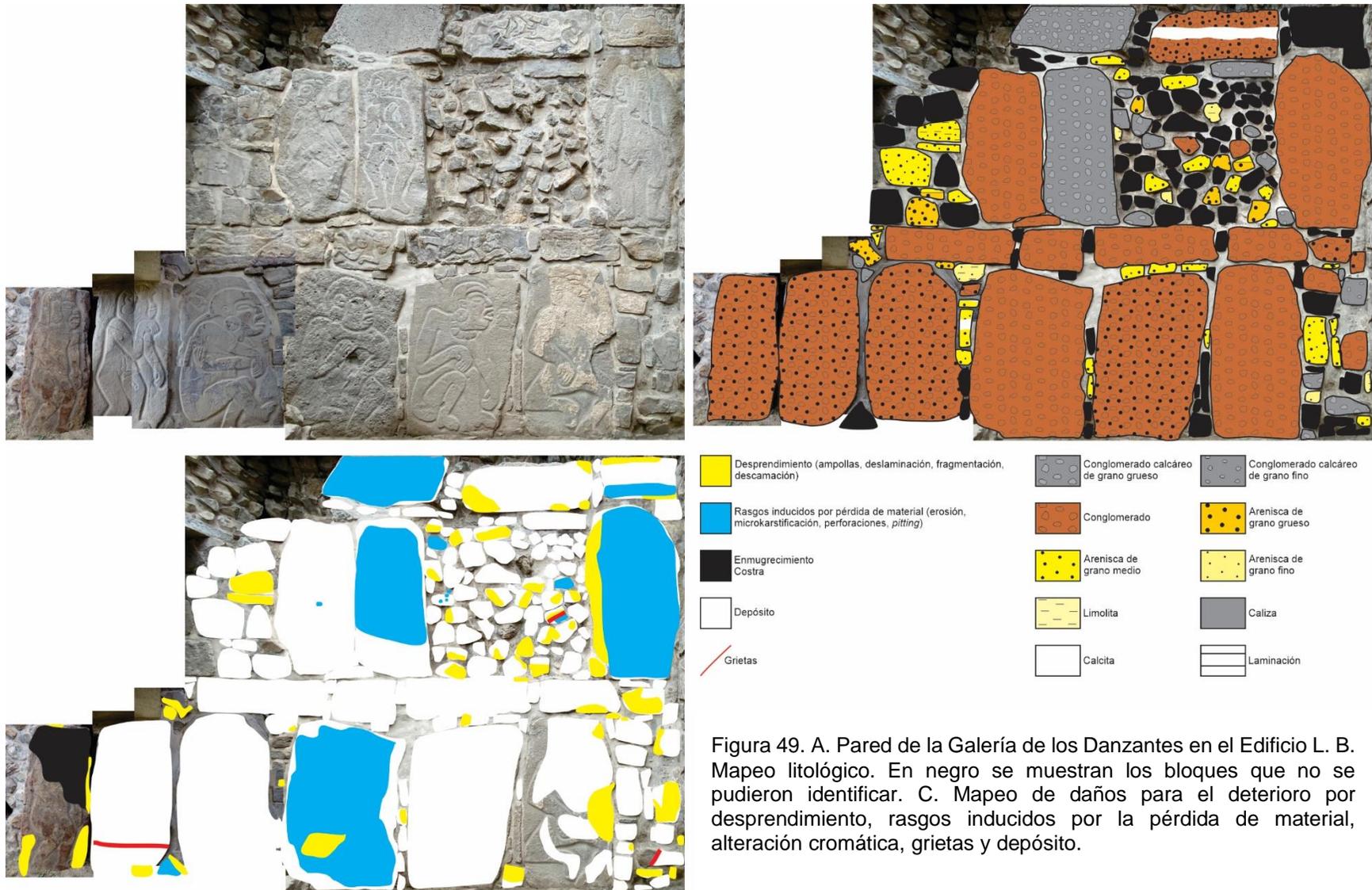


Figura 49. A. Pared de la Galería de los Danzantes en el Edificio L. B. Mapeo litológico. En negro se muestran los bloques que no se pudieron identificar. C. Mapeo de daños para el deterioro por desprendimiento, rasgos inducidos por la pérdida de material, alteración cromática, grietas y depósito.

La litología principal utilizada fueron los conglomerados para los Danzantes y otros pocos se tallaron en conglomerados calcáreos de grano grueso. Las rocas más usadas para los bloques más pequeños fueron areniscas de grano medio.

Los rasgos inducidos por la pérdida de material son los daños que abarcan mayor superficie en los Danzantes. Destaca la erosión de componentes y el *pitting*, los cuales tienen mayor extensión. En menor medida hay perforaciones y microkarstificación.

El área que ocupan los daños por desprendimiento es mínima y se concentra mayormente en los bloques más pequeños.

El depósito conformado principalmente por estuco cubre casi toda la superficie de los bloques, en ocasiones haciendo imposible identificar el tipo de roca. Cabe destacar que no existen incrustaciones ni eflorescencias en los Danzantes.

Se detectó enmugrecimiento solamente en un Danzante, el cual está más hacia afuera y no es cubierto por la parte techada, lo que explicaría este tipo de deterioro.

Guarda relación con esto el hecho de que no se encontrara colonización biológica, ya que, al estar bajo techo, el agua de lluvia no penetra directamente como para permitir el crecimiento de organismos.

Finalmente, la cantidad de grietas es mínima, afectando solamente a una figura de un Danzante y a otras dos rocas pequeñas.

5.1.2. Difracción de rayos X y petrografía

Difracción de rayos X. Las características geológicas y geoquímicas condicionan el comportamiento de los bloques hacia el deterioro. Por esta razón se hicieron análisis de difracción de rayos X en donde se detectó la presencia de calcita, cuarzo, albita y flogopita en todas las muestras, ya sean de las construcciones o de las tomadas de afloramientos. Otros minerales comunes son la microclina, caolinita y montmorillonita, mientras que los menos frecuentes fueron la sanidina, dolomita y moscovita (Figs. 50-52).

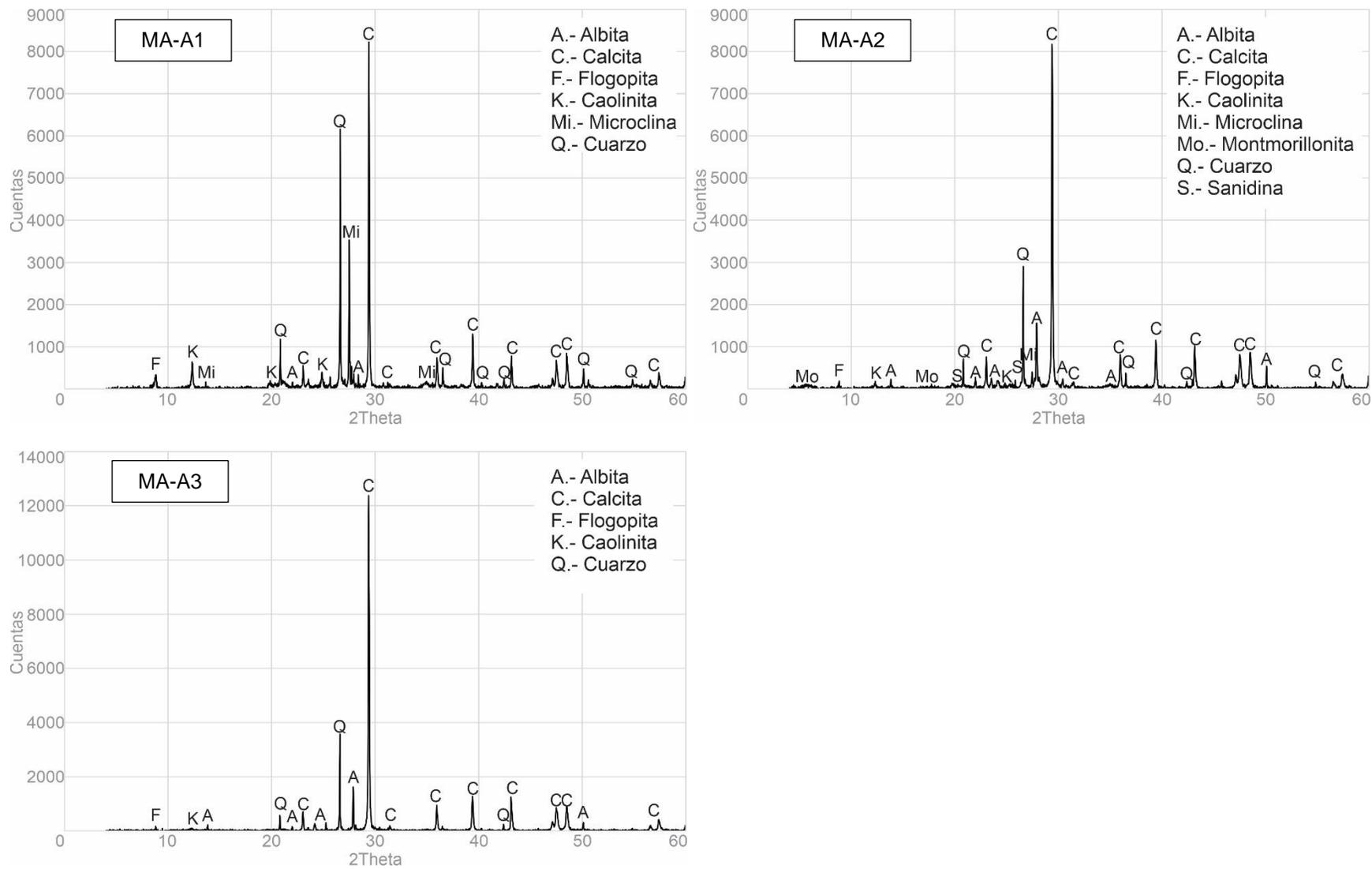


Figura 50. Difractogramas para las muestras de los afloramientos MA-A1, MA-A2 y MA-A3.

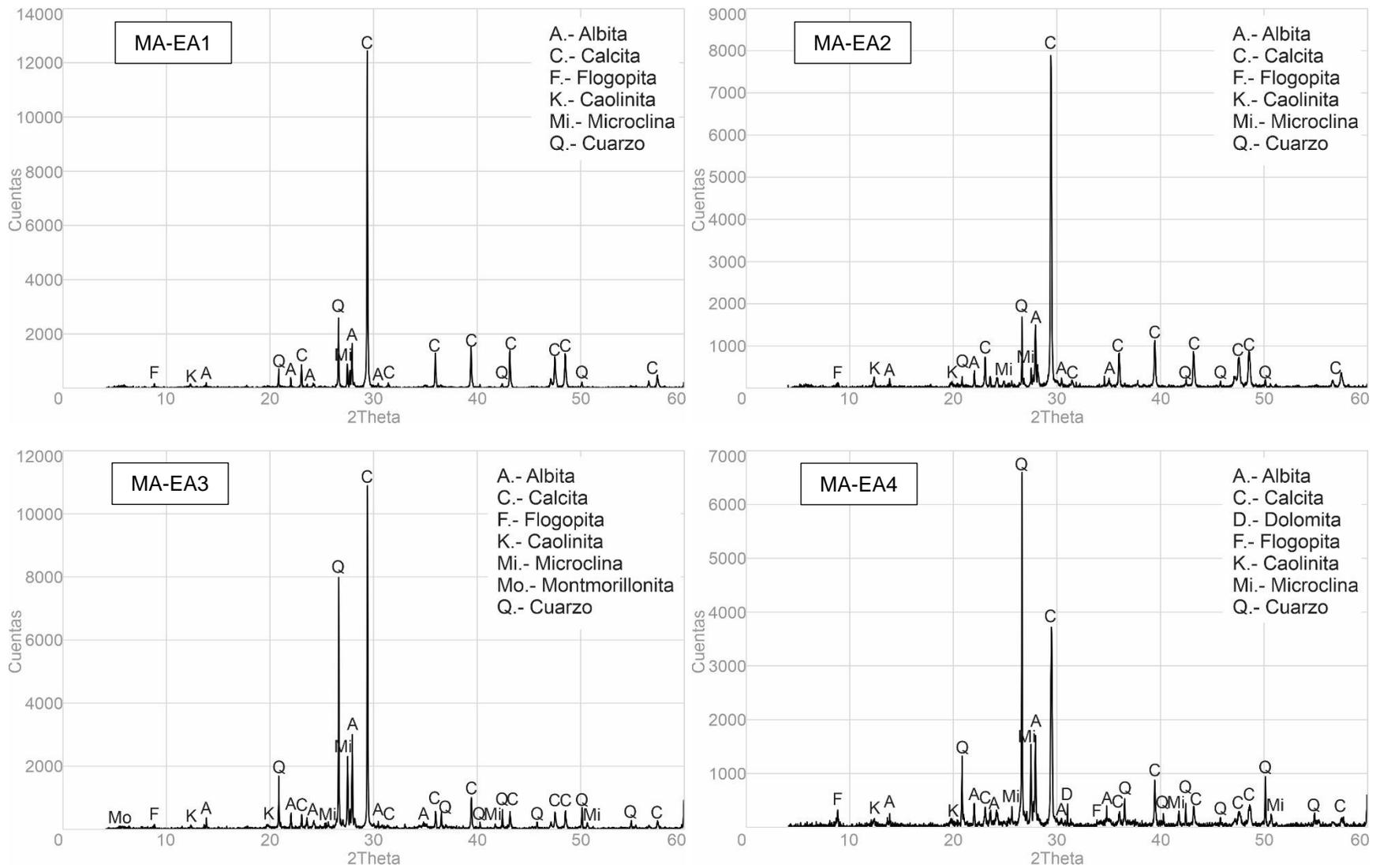


Figura 51. Difractogramas para las muestras MA-EA1, MA-EA2, MA-EA3 y MA-EA4.

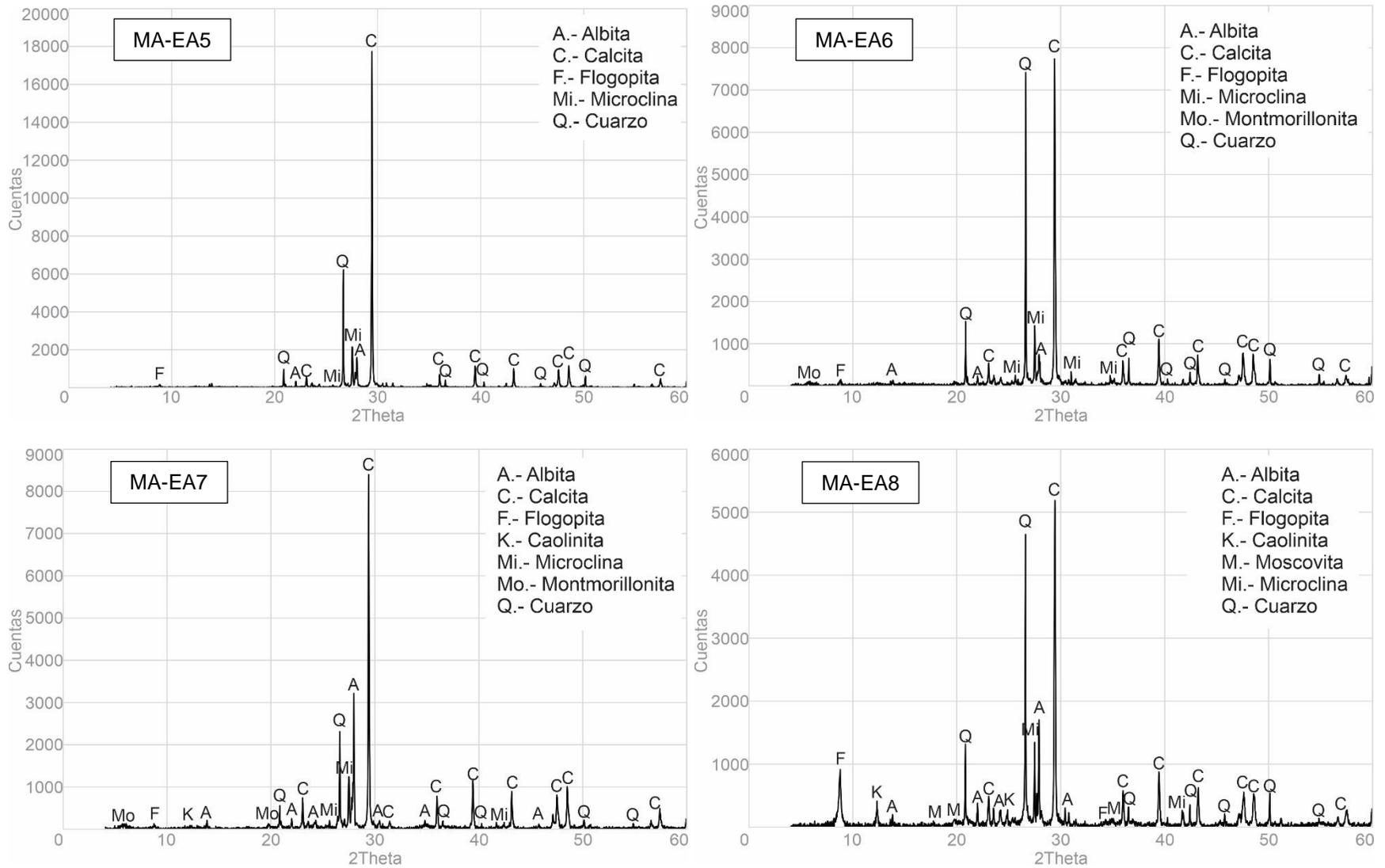


Figura 52. Difractogramas para las muestras MA-EA5, MA-EA6, MA-EA7 y MA-EA8.

Petrografía. Además de la difracción de rayos X se realizó una descripción petrográfica y un conteo de 500 puntos en lámina delgada para cada muestra, a excepción de la muestra MA-EA4, para definir la proporción de los componentes principales (Tabla 2). A continuación, se detallan las características de los minerales identificados haciendo comparaciones entre las distintas rocas.

En todas las muestras se pudo identificar cuarzo monocristalino de extinción recta de origen plutónico y con extinción ondulante. El cuarzo monocristalino representa la mayoría del cuarzo de todas las muestras, exceptuando la muestra MA-A3 que tiene el tamaño de grano más grueso encontrado. Raras veces se encuentra cuarzo reemplazado por cemento, proceso originado en la diagénesis (Boggs, 2006).

El cuarzo policristalino puede componerse de 2-3 cristales o tener más de 3 (Fig. 53). El contacto entre los cristales tiene forma de Y, aunque existen cuarzos policristalinos con fábrica tectónica producto de deformación con contactos serrados (Fig. 53A). El tamaño de los granos puede variar dependiendo de la granulometría de la muestra.

Tomando en cuenta tanto el cuarzo monocristalino como el policristalino, las muestras con menor proporción de cuarzo son los conglomerados calcáreos (MA-A2, MA-A3, MA-EA1, MA-EA2), mientras que el conglomerado (MA-EA3) y la arenisca de grano grueso (MA-EA4) son los de mayor proporción (Tabla 2).

Los feldespatos alcalinos y las plagioclasas son los constituyentes con menor presencia en todas las muestras, menos en la MA-A3, donde superan el porcentaje de líticos. Es raro encontrar feldespatos con maclas, a excepción de la microlina con su característico maclado enrejado (Fig. 54A y B). Las plagioclasas, por otro lado, se identifican por sus maclas polisintéticas (Fig. 54C). En ocasiones estos minerales están alterados y son reemplazados por cemento (Fig. 54D).

Los líticos encontrados fueron plutónicos, volcánicos félsicos, sedimentarios y metamórficos de varios orígenes. Contrario a lo que sucede con el cuarzo, los líticos constituyen el principal tipo de componente en los conglomerados calcáreos (MA-A2, MA-A3, MA-EA1, MA-EA2). En todas las otras muestras su porcentaje es menor al del cuarzo, aumentando conforme el tamaño de grano disminuye (Tabla 2).

Tabla 2. Resultado del conteo de 500 puntos de componentes minerales en las secciones delgadas de cada muestra. Se incluye además el porcentaje de cuarzo, feldespatos, líticos y cemento.

Componentes	MA-A1	MA-A2	MA-A3	MA-EA1	MA-EA2	MA-EA3	MA-EA5	MA-EA6	MA-EA7	MA-EA8
Cuarzo monocristalino extinción recta (Qmr)	50	19	2	4	19	85	43	36	44	30
Cuarzo monocristalino extinción ondulante (Qmo)	53	32	5	17	12	81	119	131	97	86
Cuarzo policristalino de 2 a 3 cristales (Qp2-3)	33	7	3	12	3	84	27	26	13	16
Cuarzo policristalino de más de 3 cristales (Qp>3)	6	21	22	6	4	6	49	38	20	19
Cuarzo en lítico plutónico (QLp)	4	7	16	8	-	11	15	4	2	-
Cuarzo en lítico sedimentario de arenisca (Qlsa)	-	-	-	-	-	2	-	2	-	-
Cemento reemplazando cuarzo (CemQ)	3	-	-	-	-	3	1	2	3	-
Feldespato (F)	12	8	2	21	10	52	10	19	18	6
Feldespato en lítico plutónico (FLp)	1	7	14	19	1	5	1	4	4	-
Cemento reemplazando feldespato (CemF)	2	2	-	1	-	-	-	-	1	-
Microclina (Mi)	4	-	-	1	-	1	2	-	2	-
Plagioclasa (P)	-	10	1	1	2	9	17	7	13	5
Plagioclasa en lítico plutónico (PLp)	2	4	10	1	-	1	2	3	-	-
Cemento reemplazando plagioclasa (CemP)	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-
Lítico plutónico (Lp)	-	7	3	-	-	1	1	1	1	1
Lítico volcánico félsico (Lvf)	3	6	-	-	22	1	3	1	4	11
Lítico sedimentario pelítico (Lsp)	1	1	-	-	-	1	-	1	-	-
Lítico sedimentario de caliza (Lsc)	4	196	175	156	74	2	3	4	27	22
Lítico metapelítico de grado 2 (Lmp2)	-	2	-	-	-	-	-	-	3	-
Lítico metacarbonatado de grado 1 (Lmc1)	-	3	-	1	-	-	-	-	-	-

Continúa en la siguiente página

Continuación

Lítico metafésico de grado 1 (Lmf1)	1	11	2	23	44	11	31	24	10	42
Lítico metafésico de grado 2 (Lmf2)	3	2	1	4	8	5	4	5	4	16
Lítico metafésico de grado 3 (Lmf3)	1	2	1	1	-	1	-	-	5	6
Lítico metafésico de grado 4 (Lmf4)	-	1	1	-	-	-	-	-	4	-
Lítico metabásico de grado 1 (Lmb1)	18	5	2	1	39	15	2	11	7	14
Lítico metabásico de grado 2 (Lmb2)	-	2	-	3	-	-	-	7	2	7
Moscovita (M)	8	-	-	1	-	-	1	5	-	9
Biotita/Flogopita (B/FI)	29	5	2	2	2	5	1	10	6	15
Opaco (O)	18	6	2	-	1	-	5	3	9	3
Granate (Gr)	-	-	-	-	1	-	5	10	2	1
Circón (Zr)	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
Matriz (Mt)	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cemento (Cem)	241	134	236	217	256	118	157	146	199	191
Porcentaje de cuarzo total (Q%)	29.8	17.2	9.6	9.4	7.6	54.4	50.8	47.8	35.8	30.2
Porcentaje de feldspatos y plagioclasas totales (FP%)	4.2	6.2	5.4	8.8	2.8	13.6	6.6	6.6	7.6	2.2
Porcentaje de líticos totales (L%)	6.2	47.6	37.0	37.8	37.4	7.4	8.8	10.8	13.4	23.8
Porcentaje de cemento total (Cem%)	48.2	26.8	47.2	43.4	51.2	23.6	31.4	29.2	39.8	38.2

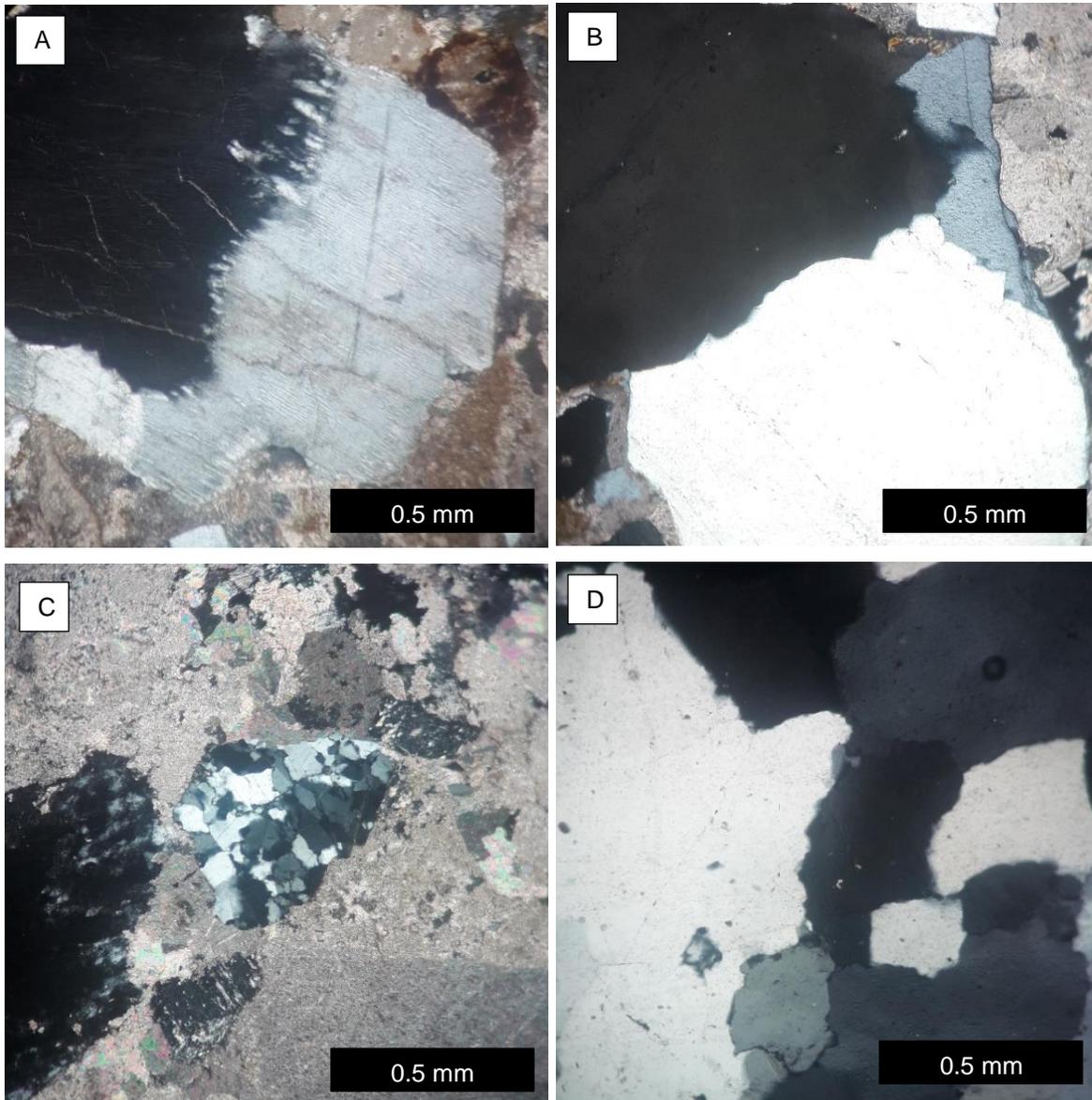


Figura 53. Diferentes tipos de cuarzos. A. Cuarzo policristalino de fábrica tectónica reconocible por sus contactos serrados (muestra MA-A2). B. Cuarzo policristalino de 2-3 cristales (muestra MA-EA5). C y D. Cuarzo policristalino de más de 3 cristales (muestra MA-A2 y MA-A3 respectivamente). Todas las imágenes fueron tomadas con un objetivo de 10X y luz polarizada.

Los líticas plutónicas se caracterizan por su composición casi exclusiva de cristales bien desarrollados de cuarzo, feldespatos alcalinos y plagioclasas (Fig. 55). Generalmente sus granos son de mayor tamaño que otros líticas, llegando incluso a medir varios milímetros de longitud.

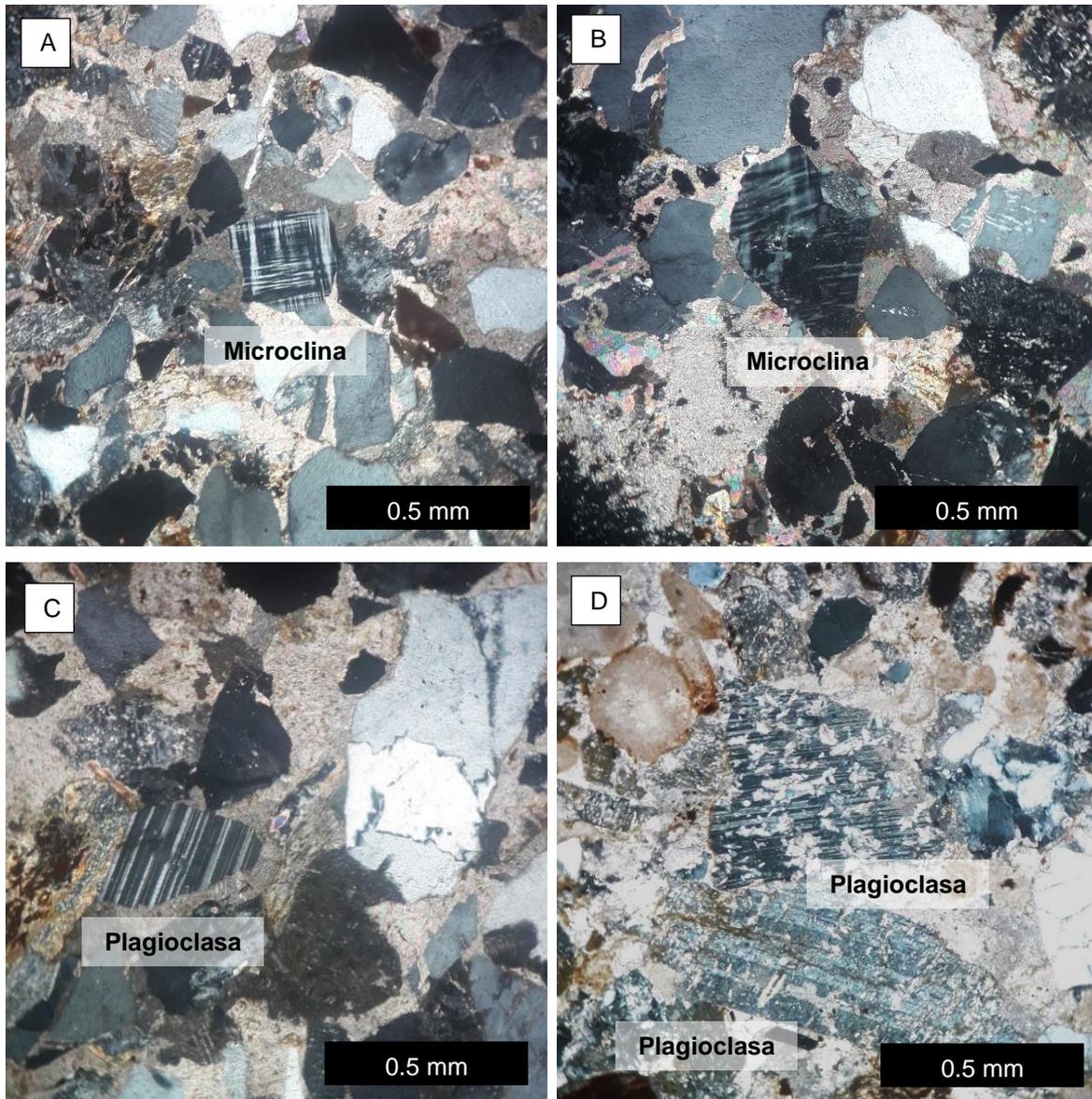


Figura 54. A. Microclina caracterizada por su maclado enrejado (muestra MA-EA6). B. Microclina deformada (muestra MA-EA5). C. Plagioclasa caracterizada por maclas polisintéticas (muestra MA-EA6). D. Plagioclasas alteradas, parcialmente reemplazadas por cemento (muestra MA-EA2). Todas las imágenes fueron tomadas con un objetivo de 10X y luz polarizada.

Los líticas volcánicos félsicos, al contrario de los fragmentos plutónicos, no tienen cristales grandes desarrollados, más bien son una matriz de grano fino de cuarzo y feldespatos, aunque en ocasiones se pueden ver cristales bien definidos (Fig. 56). Son más comunes que los líticas plutónicos, pero de menor tamaño (Tabla 2).

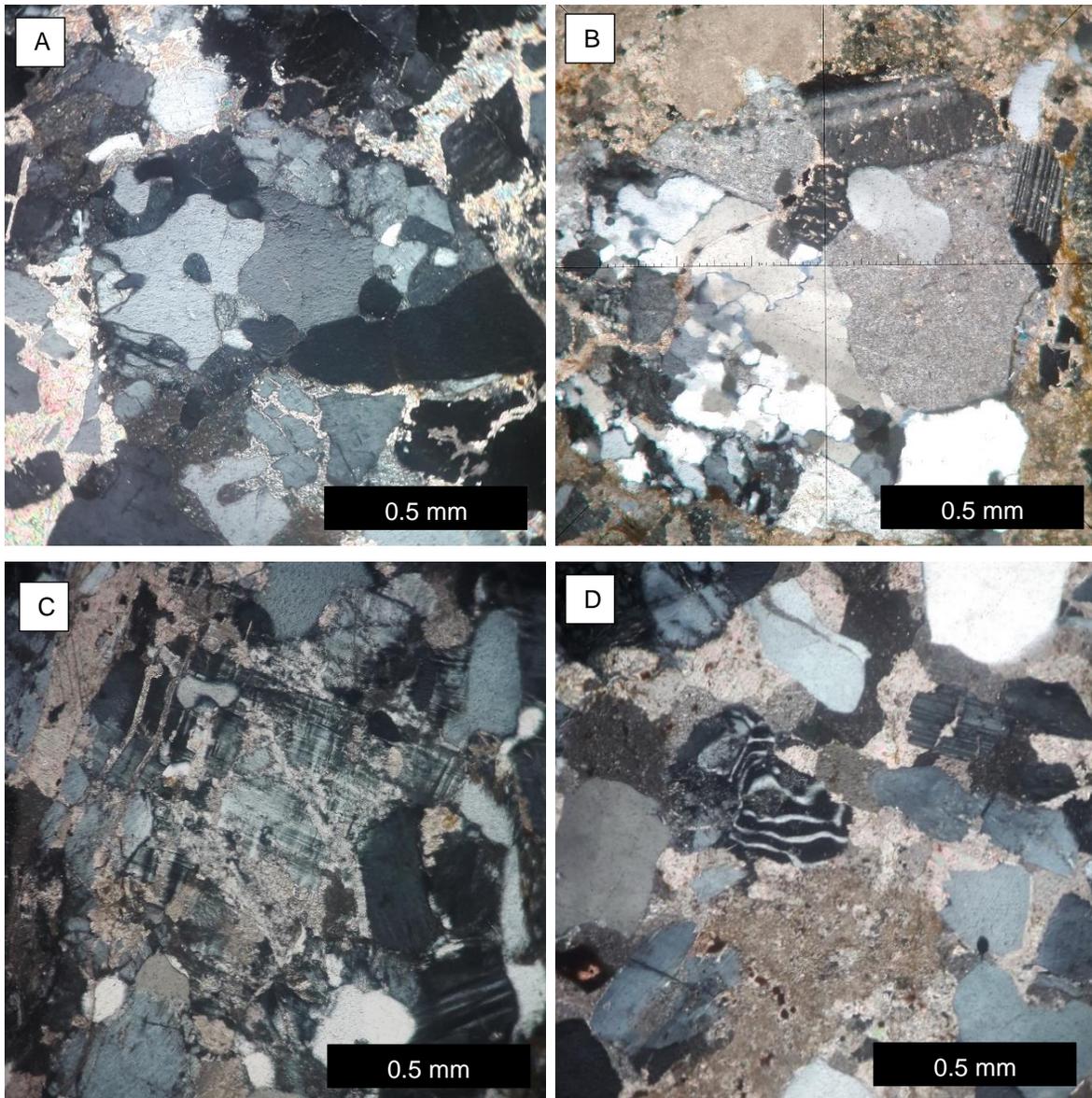


Figura 55. Variaciones en los líticos plutónicos. A. Lítico plutónico con cuarzo y feldespato (muestra MA-EA5). B. Lítico plutónico compuesto por cuarzo, feldespato y plagioclasa (muestra MA-EA1). C. Lítico plutónico con cuarzo y microclina (muestra MA-A3). D. Lítico plutónico con estructura mirmequ tica (cuarzo y plagioclasa) (muestra MA-EA2). Todas las imágenes fueron tomadas con un objetivo de 10X y luz polarizada.

Los fragmentos de líticos sedimentarios identificados fueron los pertenecientes a rocas pelíticas de grano muy fino formadas principalmente por minerales arcillosos. Los otros líticos son los de rocas carbonatadas como las calizas, los cuales pueden contener microfósiles o presentar solamente cemento esparítico o micrítico (Fig. 57). Estos líticos sedimentarios de caliza representan el mayor porcentaje de líticos en

las muestras de conglomerados calcáreos (MA-A2, MA-A3, MA-EA1), sin tomar en cuenta la muestra MA-EA2, pero que aun así se acerca bastante (Tabla 2).

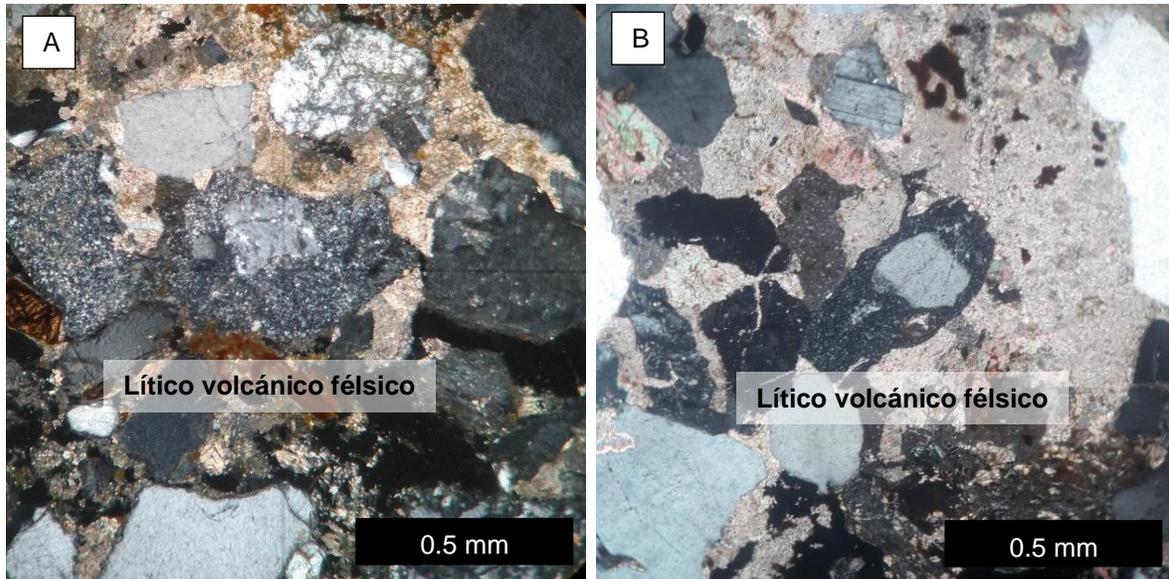


Figura 56. A y B. Líticos volcánicos félsicos (muestra MA-EA3 y MA-EA5 respectivamente). Todas las imágenes fueron tomadas con un objetivo de 10X y luz polarizada.

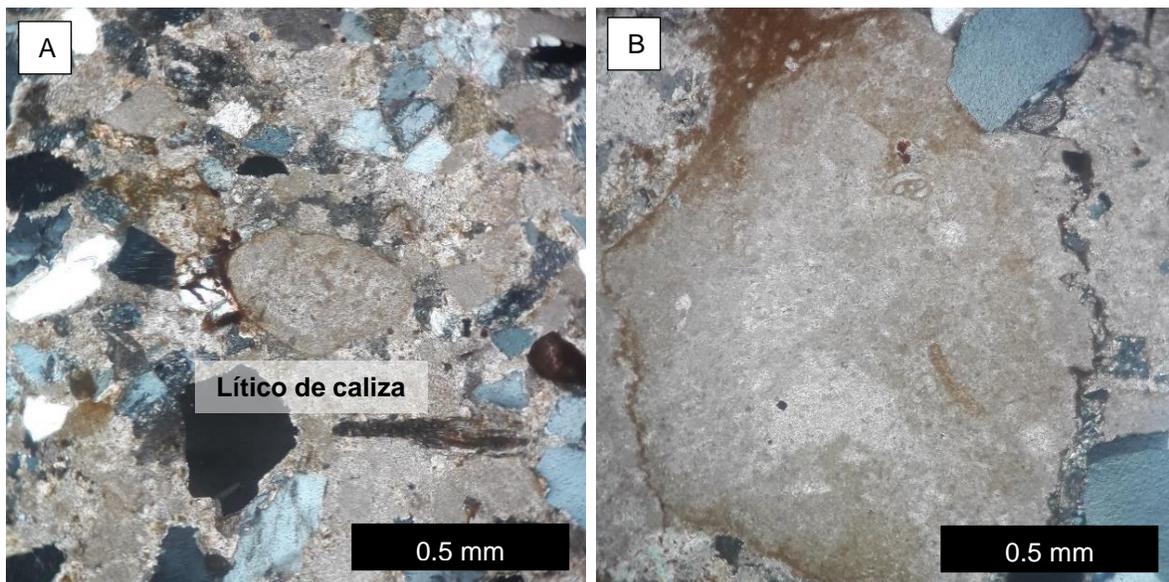


Figura 57. A. Lítico sedimentario de caliza micrítica (muestra MA-EA7). B. Lítico sedimentario de caliza micrítica con un foraminífero y fragmentos de microfósiles (muestra MA-A2). Todas las imágenes fueron tomadas con un objetivo de 10X y luz polarizada.

Los líticos metamórficos identificados con órdenes sedimentarios fueron los metapel ticos y metacarbonatados (Fig. 58). Estos tipos representan un mínimo porcentaje de los fragmentos de roca (Tabla 2).

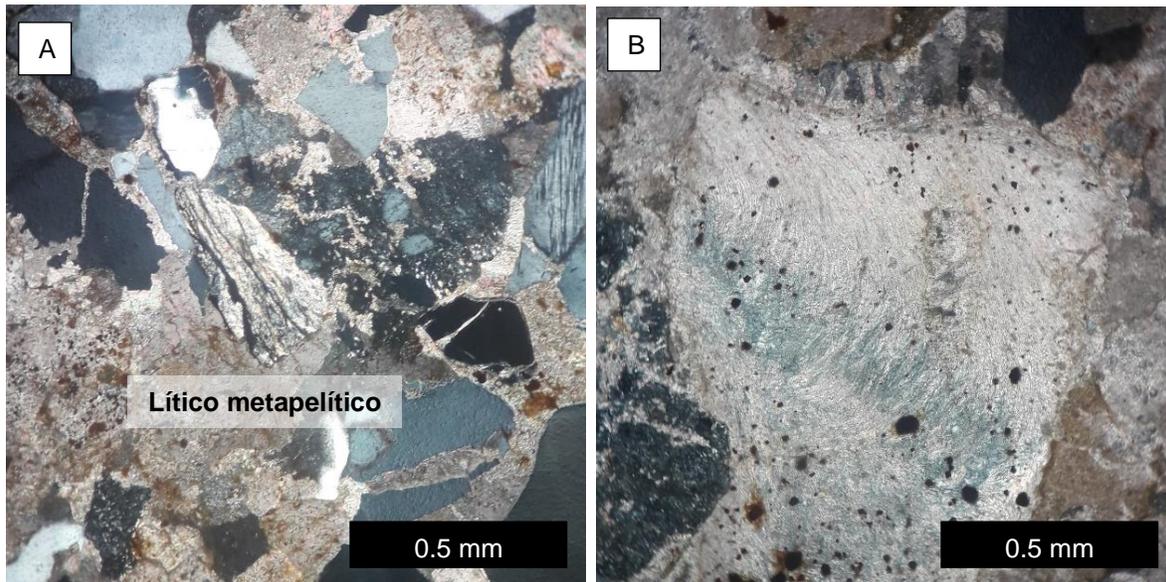


Figura 58. Líticos metamórficos de origen sedimentario. A. Lítico metapelítico de grado 2 (muestra MA-EA5). B. Lítico metacarbonatado de grado 1 (muestra MA-EA7). Todas las imágenes fueron tomadas con un objetivo de 10X y luz polarizada.

En las muestras desde la MA-EA2 hasta la MA-E8, los líticos más abundantes son los metaf lsicos y solamente en la muestra MA-A1 los líticos metab sicos representan un mayor porcentaje (Tabla 2). Los primeros se caracterizan porque sus componentes principales como cuarzo y feldespatos son distinguibles y por el crecimiento y la orientación de micas dependiendo del grado de metamorfismo (Fig. 59A y B). En los líticos metab sicos generalmente no se pueden identificar sus minerales principales y de acuerdo con su grado metamórfico desarrollan clorita y otros minerales (Fig. 59C y D).

Además de los constituyentes principales, en las muestras de conglomerados calcáreos y conglomerados se pudieron encontrar microfósiles como foraminíferos bentónicos (Fig. 60), fragmentos de alga (Fig. 61A y D), ooides (Fig. 61B) y ostrácodos (Fig. 61C).

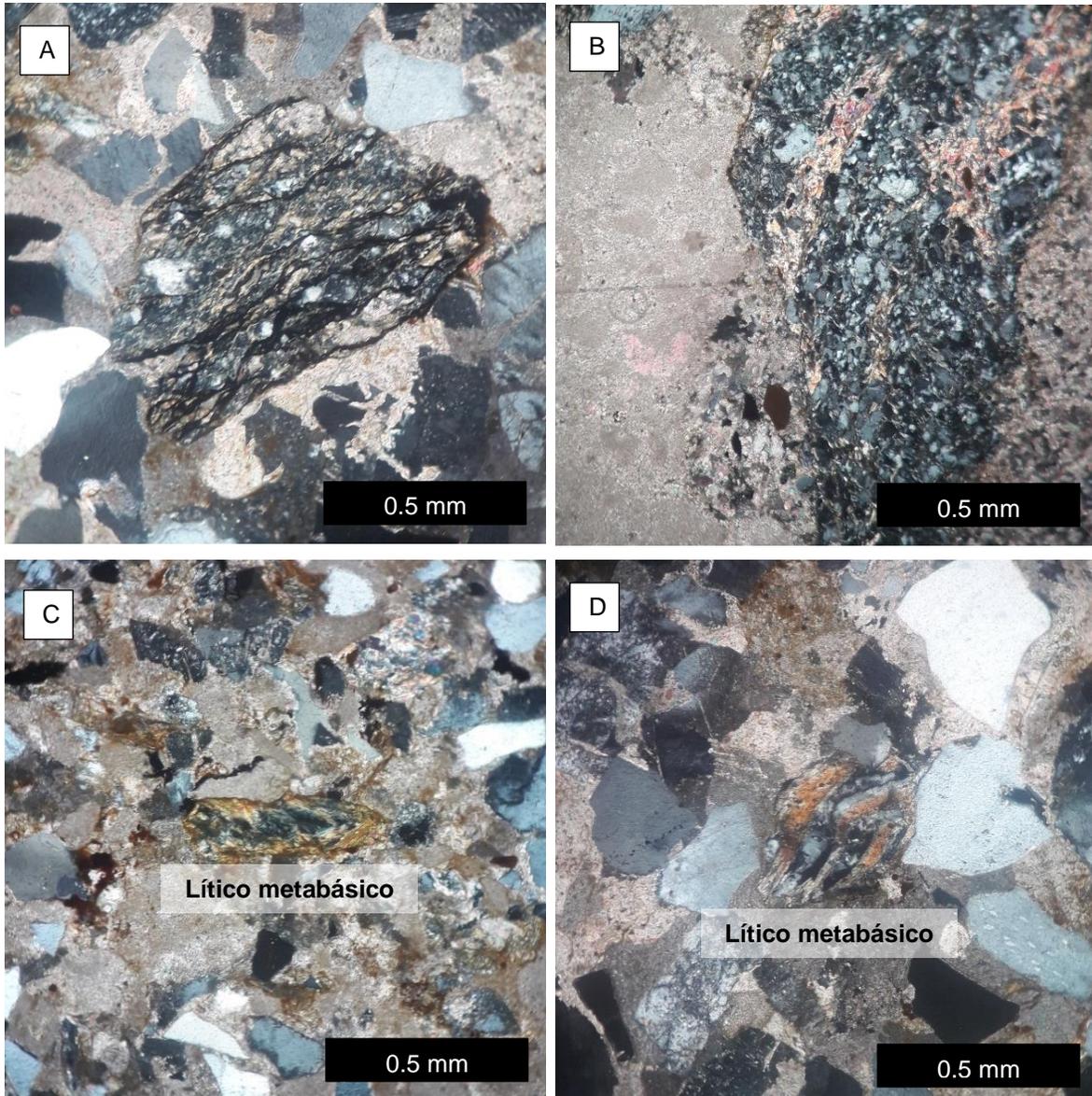


Figura 59. A. Lítico metafésico de grado 1 (muestra MA-EA6). B. Lítico metafésico de grado 3 (muestra MA-EA1). C. Lítico metabásico de grado 2 (muestra MA-EA7). D. Lítico metabásico de grado 4 (muestra MA-EA6). Todas las imágenes fueron tomadas con un objetivo de 10X y luz polarizada.

Minerales accesorio como el circón y el granate se encuentran en todas las láminas, al igual que minerales opacos, principalmente óxidos. También se observaron micas oscuras que según los resultados de la difracción de rayos X se trata de flogopita (Fig. 62A). Otra mica que se encontró con menor proporción fue la moscovita.

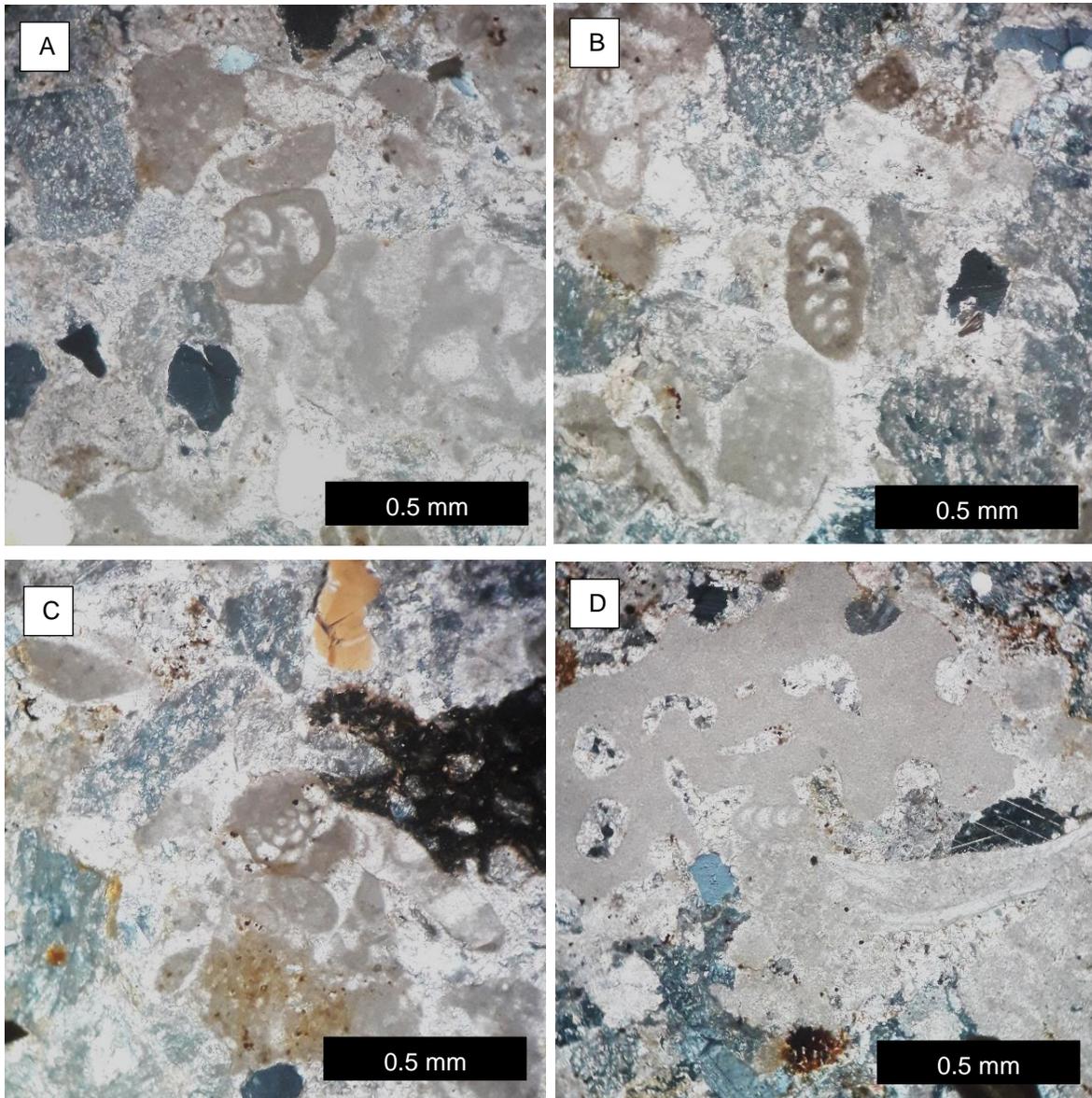


Figura 60. A-D. Cuatro diferentes tipos y cortes de foraminíferos bentónicos (A, B y D muestra MA-EA2. C muestra MA-EA3). Todas las imágenes fueron tomadas con un objetivo de 10X y luz polarizada.

En todas las muestras destaca la presencia de cemento carbonatado, es decir, calcita, que se observa ya sea como micrita o esparita y en ocasiones como calcita bien cristalizada (Fig. 62B).

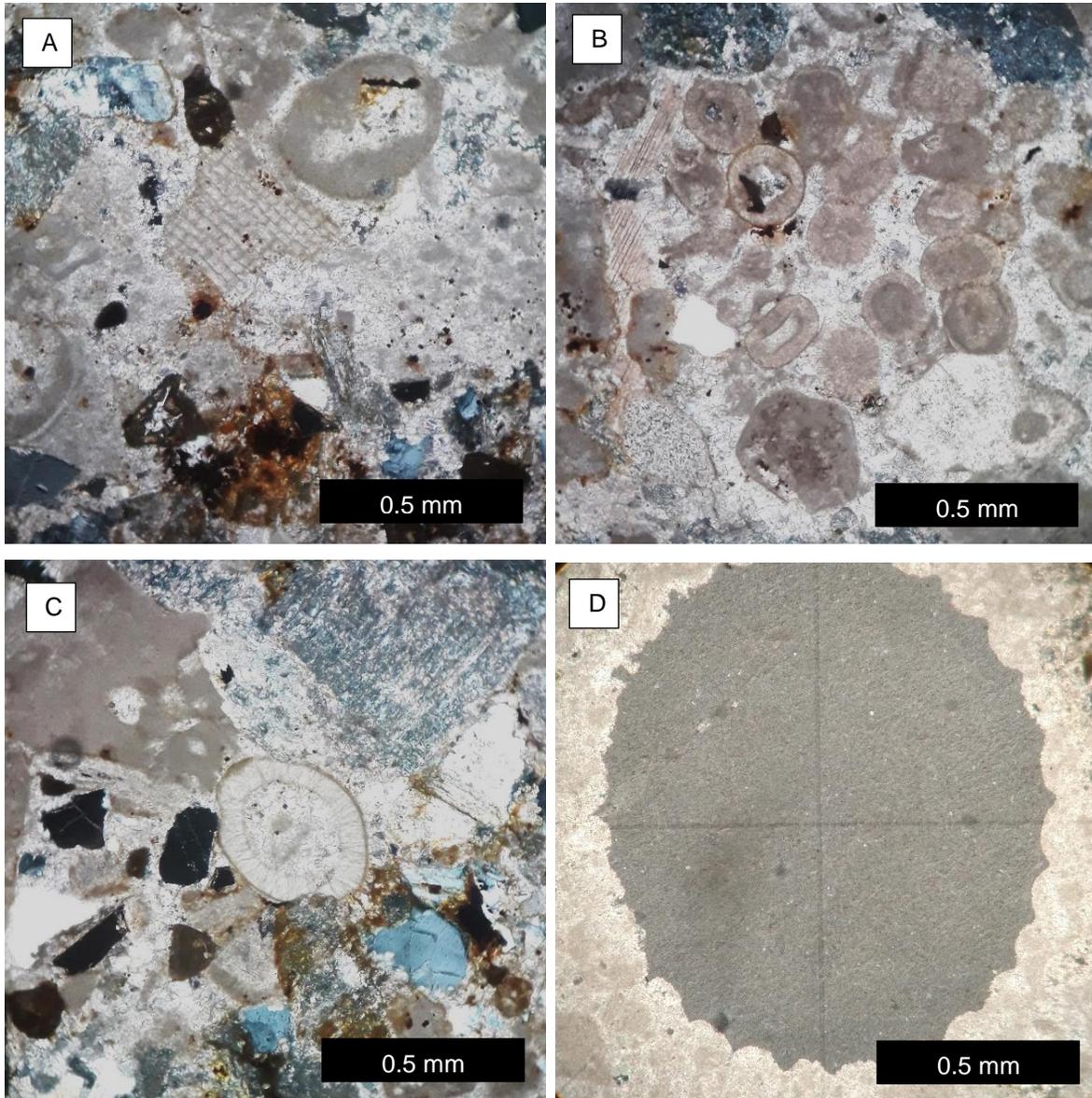


Figura 61. A. Fragmento de alga (muestra MA-EA2). B. Ooides simples dentro de cemento esparítico (muestra MA-EA2). C. Ostrácodo relleno de esparita (muestra MA-EA2). D. Relleno micrítico de un alga (muestra MA-EA1). Todas las imágenes fueron tomadas con un objetivo de 10X y luz polarizada.

Este cemento tiene proporciones desiguales en las muestras (Tabla 2), pero las que tienen un porcentaje mayor son MA-A1, MA-A3, MA-EA1 y MA-EA2 con cantidades entre 40 % y 50 % aproximadamente. En estas muestras y en las areniscas de grano fino MA-EA7 y MA-EA8, las cuales tienen valores cercanos al 40 %, el cemento tiene aún más porcentaje que los constituyentes como el cuarzo y los líticos.

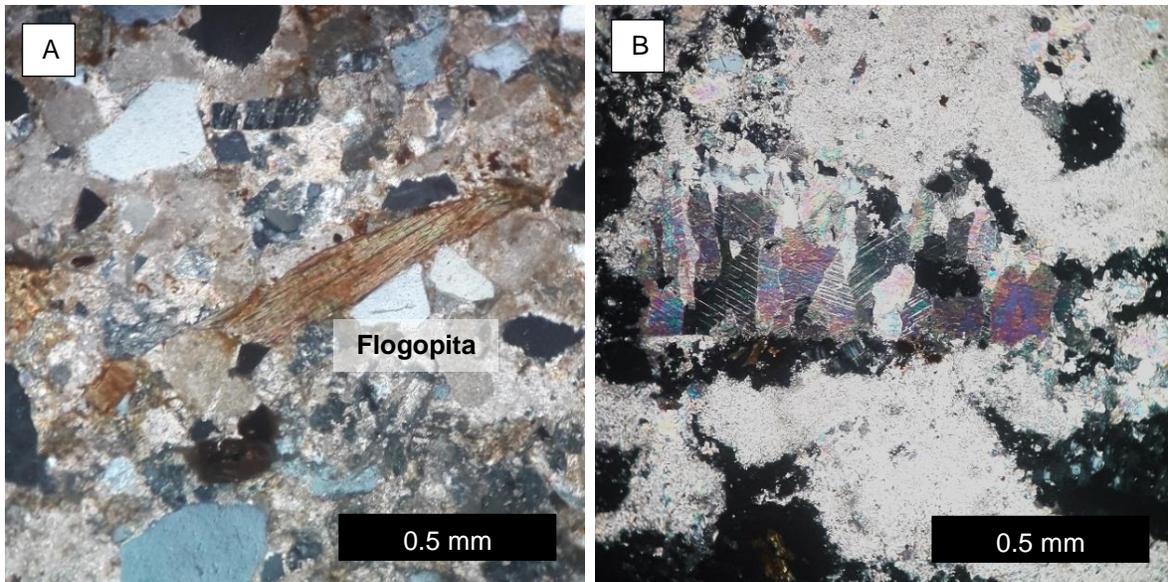


Figura 62. A. Mica, probablemente flogopita (muestra MA-EA7). B. Calcita bien cristalizada (muestra MA-EA2). Todas las imágenes fueron tomadas con un objetivo de 10X y luz polarizada.

El cemento en las demás muestras varía desde el 20 % hasta poco más del 30 %. En la muestra MA-A2 tiene más porcentaje que el cuarzo, pero menos que los líticos. Por otra parte, en las muestras MA-EA3 hasta la MA-EA6 su proporción es menor al cuarzo, pero mayor que la de los líticos y los feldespatos.

5.1.3. Experimentos petrofísicos

Porosidad, densidad y absorción de agua al vacío. Los resultados obtenidos del cálculo de la porosidad, densidad y absorción de agua al vacío de las muestras se encuentran en la Tabla 3.

Algo notable es que todas las rocas tienen valores bajos de porosidad, sin embargo, se tienen varias tendencias: las rocas con tamaño de grano más grueso (MA-EA1, MA-EA2, MA-EA3, MA-EA4) tienen un poco más de porosidad y los valores disminuyen mientras el tamaño de grano decrece (MA-EA5, MA-EA6, MA-EA7, MA-EA8) (Fig. 63). Lo mismo sucede con los valores de absorción de agua al vacío (Fig. 64). Por otra parte, los valores de densidad son bastante uniformes para todas las muestras.

Tabla 3. Valores de porosidad, densidad de matriz, densidad aparente y de la absorción de agua al vacío.

Muestra	Porosidad (%)	Densidad de matriz (g/cm ³)	Densidad aparente (g/cm ³)	Absorción de agua al vacío (%)
MA-EA1	3.53	2.70	2.60	1.36
MA-EA2	3.44	2.70	2.61	1.32
MA-EA3	5.60	2.68	2.53	2.21
MA-EA4	3.76	2.69	2.59	1.45
MA-EA5	2.26	2.68	2.62	0.86
MA-EA6	2.72	2.70	2.63	1.04
MA-EA7	1.50	2.67	2.63	0.57
MA-EA8	2.88	2.68	2.60	1.11

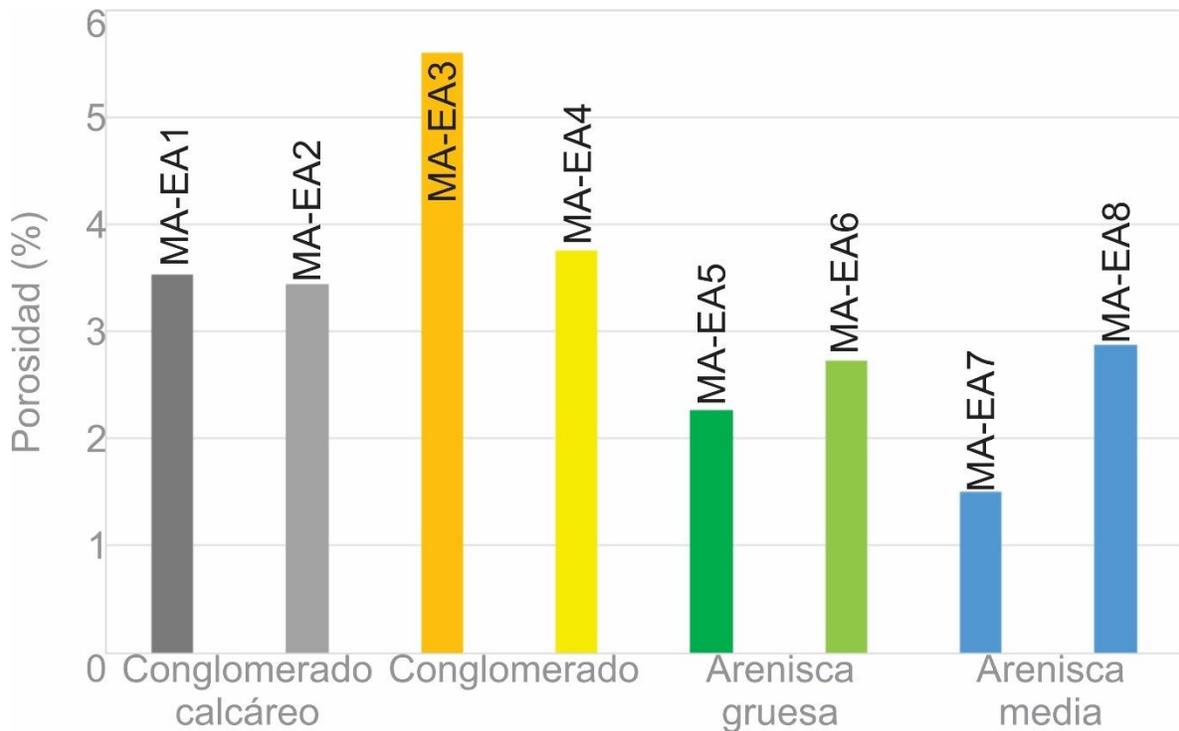


Figura 63. Valores de porosidad comparados con las diferentes litologías.

Distribución de tamaño de poro. La porosidad de las muestras pudo dividirse de acuerdo con el tamaño de poro en microporos (< 0.1 μm) y mesoporos o poros capilares (0.1-100 μm). En la Tabla 4 se registra la distribución de tamaño de poro y en la Figura 65 se grafica este parámetro con histogramas.

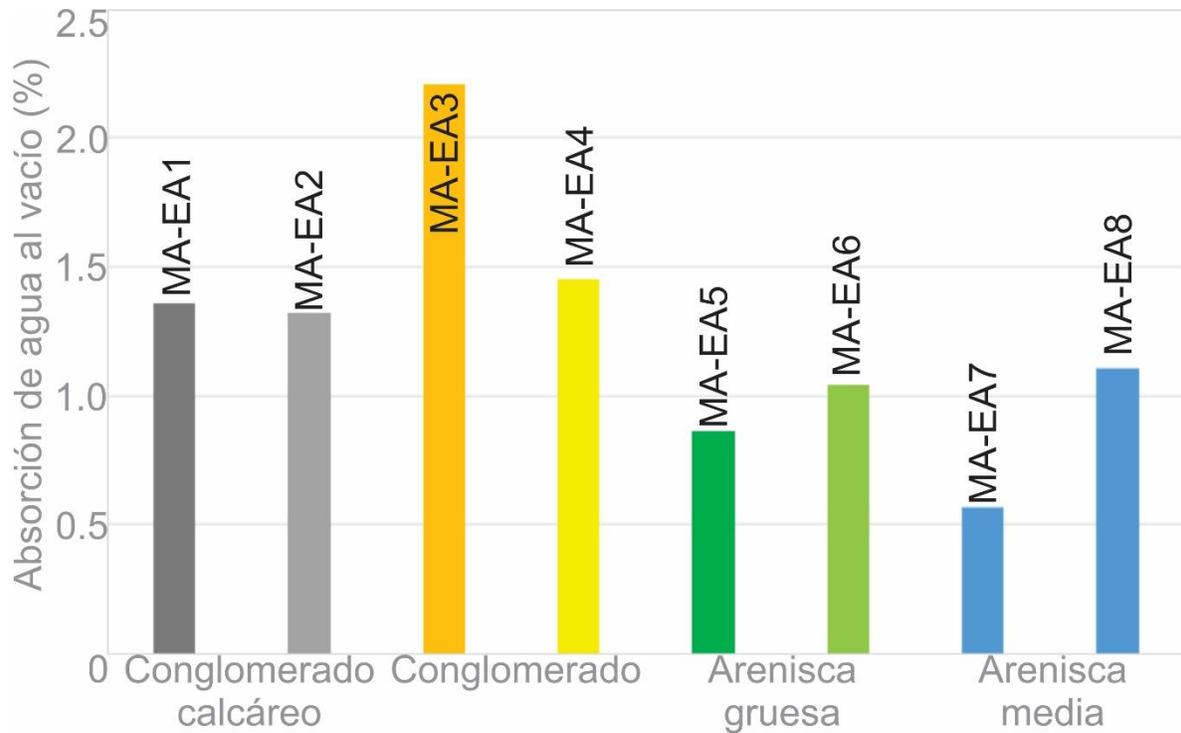


Figura 64. Valores de absorción de agua al vacío comparados con las diferentes litologías.

Tabla 4. Porcentaje de microporos y poros capilares obtenidos del experimento con el porosímetro de mercurio.

Muestra	Microporos (%)	Poros capilares (%)
MA-EA1	53.4	46.6
MA-EA2	44.5	55.5
MA-EA3	33.1	66.9
MA-EA4	65.3	34.7
MA-EA5	43.8	56.2
MA-EA6	50.6	49.4
MA-EA7	62.3	37.7
MA-EA8	59.2	40.8

La muestra con el porcentaje más elevado de poros capilares es la MA-EA3, la cual también registra la porosidad más alta. En las muestras MA-EA2 y MA-EA5, el porcentaje de poros capilares sigue siendo ligeramente mayor que el de microporos. Por otra parte, los microporos predominan en las muestras MA-EA1, MA-EA6 y MA-EA8, alcanzado valores mayores a 60 % en las muestras MA-EA4 y MA-EA7.

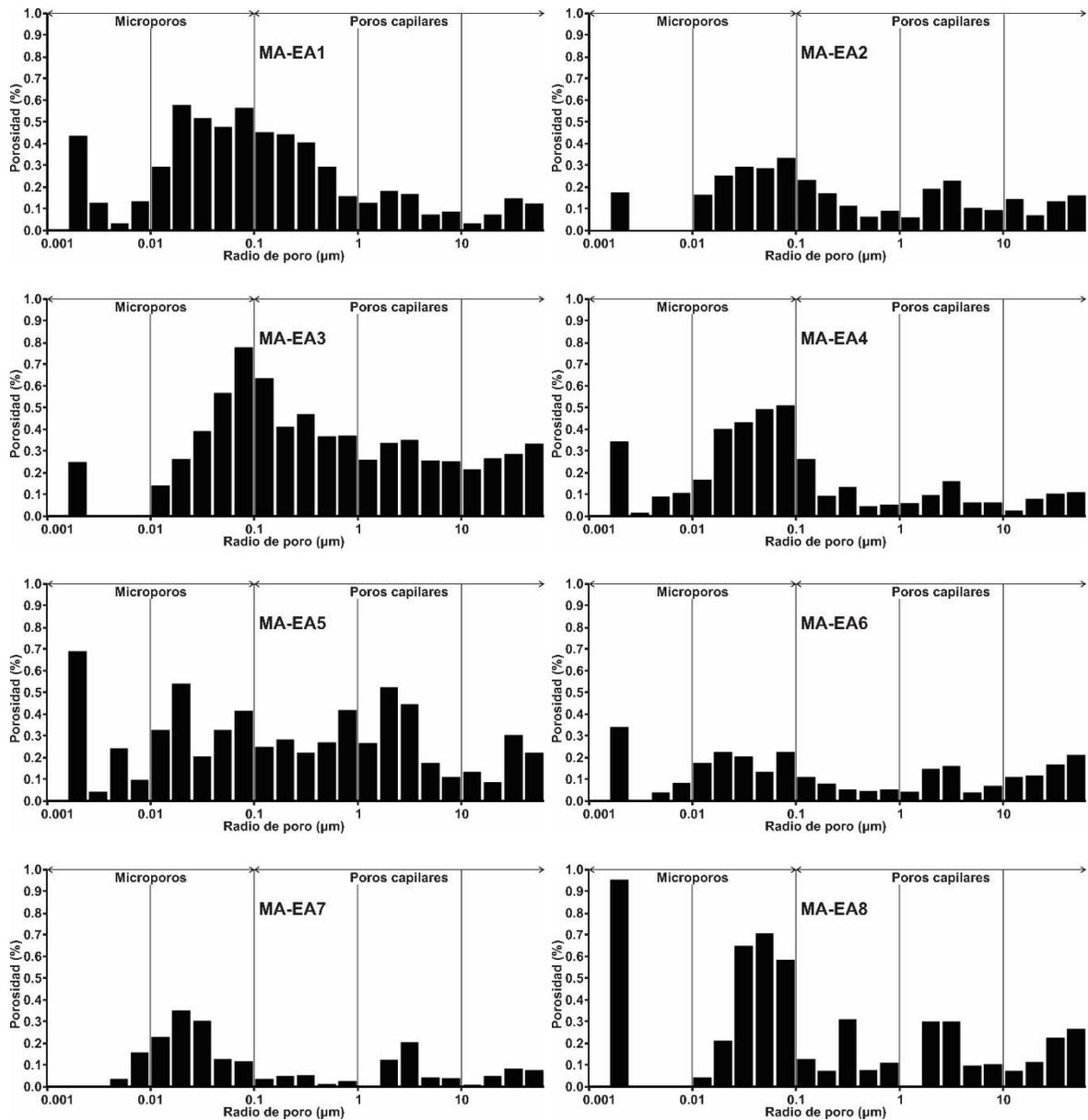


Figura 65. Histogramas con la distribución de radio de poro de todas las muestras.

En los histogramas de las primeras cuatro muestras (MA-EA1, MA-EA2, MA-EA3 y MA-EA4), correspondientes a conglomerados, se observa que los valores máximos de porosidad están entre $0.01 \mu\text{m}$ y $0.1 \mu\text{m}$, es decir, en los microporos. A pesar de esto, las muestras MA-EA2, MA-EA3 alcanzan a tener una distribución mayor de poros capilares.

La muestra MA-EA5 tiene una distribución irregular en todo el histograma, pero con un valor máximo en el área de los microporos entre $0.001 \mu\text{m}$ y $0.1 \mu\text{m}$, en donde

también se encuentran los picos máximos para las muestras MA-EA6 y MA-EA8. La muestra MA-EA7 no presenta el característico valor alto entre 0.001 μm y 0.1 μm , pero al igual que las primeras cuatro muestras, su valor máximo se concentra entre 0.01 μm y 0.1 μm .

Absorción capilar. Se midió la absorción capilar en dos planos de cada muestra, el plano XZ y el XY, ya que esta propiedad puede variar si existen estructuras sedimentarias como laminación y por la orientación de los granos minerales. En la Tabla 5 se exponen los resultados de este experimento.

Tabla 5. Máxima cantidad de agua absorbida por capilaridad para los planos XZ (perpendicular a la laminación) y XY (paralelo a la laminación) en un lapso de 3 horas.

Muestra	Absorción en plano XZ (g)	Absorción en plano XY (g)	Promedio
MA-EA1	7.83	2.56	5.20
MA-EA2	6.24	8.13	7.19
MA-EA3	6.26	4.22	5.24
MA-EA4	3.67	4.24	3.96
MA-EA5	3.36	5.21	4.29
MA-EA6	4.19	3.11	3.65
MA-EA7	4.99	5.12	5.06
MA-EA8	6.64	6.79	6.72

En el caso de las rocas conglomeráticas (MA-EA1, MA-EA2, MA-EA3 y MA-EA4), al medir la absorción capilar con la laminación posicionada verticalmente, se observa cómo las rocas de grano más grueso que son el conglomerado calcáreo de grano grueso (MA-EA1) y el conglomerado (MA-EA3) absorbieron una mayor cantidad de agua. El conglomerado calcáreo de grano fino (MA-EA2) tuvo una absorción capilar menor seguido por el conglomerado con arenisca de grano grueso (MA-EA4). Estos resultados parecen indicar que la absorción capilar, al medirse en el plano XZ, está controlada por la granulometría de los conglomerados (Fig. 66).

Para las areniscas (MA-EA5, MA-EA6, MA-EA7 y MA-EA8) medidas en el mismo plano perpendicular a la laminación sucede lo contrario, los valores de absorción capilar aumentan conforme el tamaño de grano disminuye. Claramente existe

también un control granulométrico en la absorción capilar de agua cuando se mide en el plano XZ (Fig. 66).

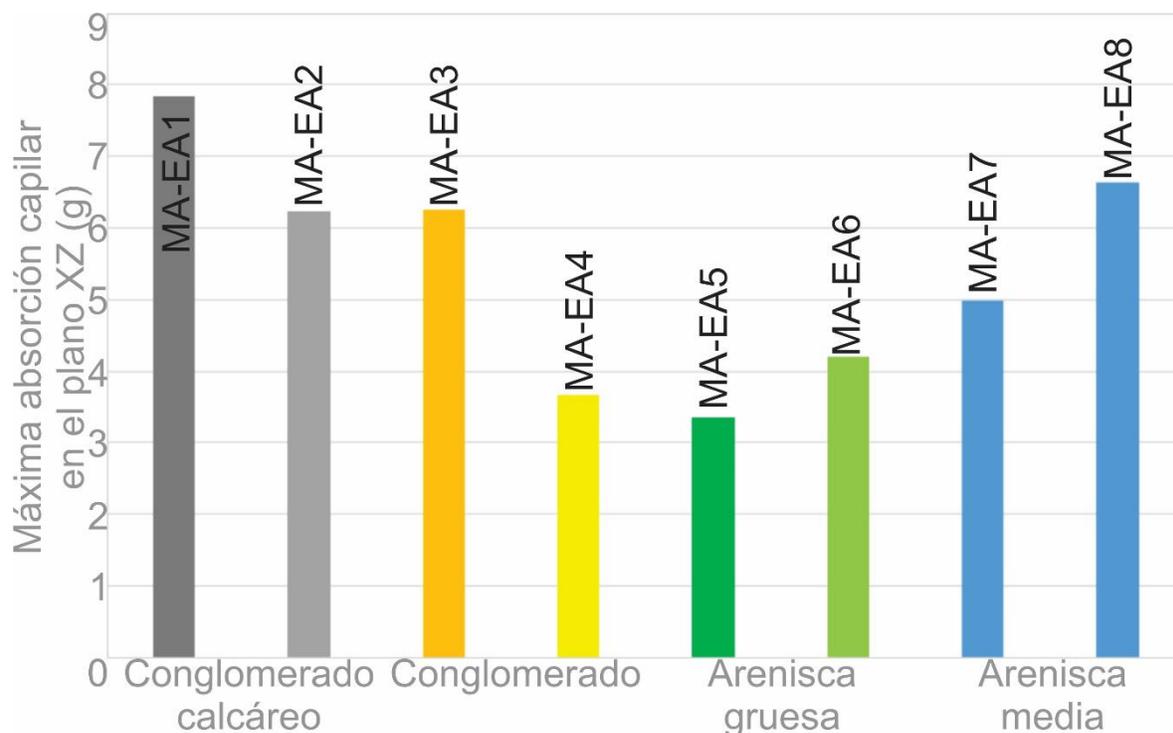


Figura 66. Valores de absorción capilar en el plano XZ comparados con las diferentes litologías.

Al medir la absorción capilar de las muestras conglomeráticas (MA-EA1, MA-EA2, MA-EA3 y MA-EA4) con la laminación paralela a la superficie del agua se encontró que el conglomerado calcáreo de grano fino (MA-EA2) absorbió más. Los conglomerados de las muestras MA-EA3 y MA-EA4 tuvieron valores similares, mientras que el conglomerado calcáreo de grano grueso (MA-EA1) obtuvo los valores más bajos (Fig. 67).

En el mismo plano XY, la muestra de arenisca de grano medio (MA-EA8) tuvo la mayor absorción. Después están las muestras MA-EA5 y MA-EA7 con valores similares, mientras que la menor absorción capilar se registró en la muestra MA-EA6 (Fig. 67).

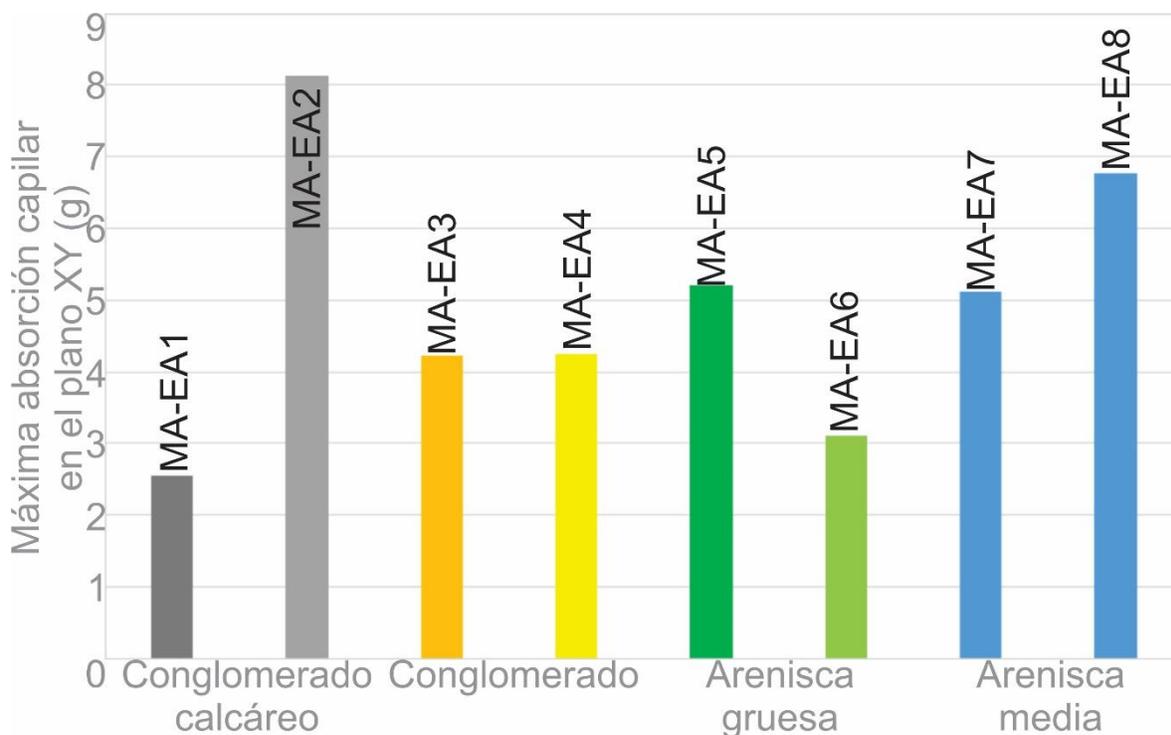


Figura 67. Valores de absorción capilar en el plano XY comparados con las diferentes litologías.

Expansión hídrica. Para determinar la expansión hídrica se sumergieron las rocas en agua destilada por un máximo de 3 horas y se midió su longitud con un micrómetro. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores máximos de expansión hídrica para cada muestra con el tiempo necesario para alcanzarlos.

Muestra	Expansión máxima (mm/m)	Tiempo para alcanzar la expansión máxima (horas)
MA-EA1	0.00	3:00
MA-EA2	0.39	0:40
MA-EA3	0.20	2:30
MA-EA4	0.12	2:45
MA-EA5	0.00	3:00
MA-EA6	0.20	3:00
MA-EA7	0.00	3:00
MA-EA8	0.10	2:05

La roca que se expandió más fue la muestra MA-EA2 con 0.39 mm/m, además fue la única que alcanzó el valor máximo en menos de 1 hora. Las muestras MA-EA3 y MA-EA6 tuvieron expansiones de 0.20 mm/m que quizás estén relacionadas con la

presencia de montmorillonita, ya que es una arcilla expansiva. Las muestras MA-EA4 y MA-EA8 se expandieron 0.10 mm/m. Los especímenes restantes (MA-EA1, MA-EA5 y MA-EA7) no experimentaron un aumento en sus dimensiones al finalizar el experimento a las 3 horas. Esto no significa que tales rocas no puedan expandirse al contacto con agua, sino que podrían necesitar más tiempo para hacerlo.

Resistencia a la cristalización de sal. Para la evaluación de la resistencia de las muestras a la presión de cristalización de sal en los poros se midió el peso y se hizo un registro fotográfico de las rocas para identificar los daños que se producen. En la Tabla 7 se presenta el peso de cada muestra durante 20 ciclos.

Tabla 7. Peso de las muestras para los diferentes ciclos del experimento de resistencia a la cristalización de sal.

Ciclo	Peso (g)						
	MA-EA1	MA-EA2	MA-EA3	MA-EA4	MA-EA5	MA-EA6	MA-EA7
0	747.5	681.1	600.1	651.3	658.7	751.0	728.4
1	748.0	682.2	600.7	651.4	658.7	751.0	728.4
2	748.4	683.5	601.3	651.6	658.7	751.0	728.5
3	748.9	685.5	601.9	651.7	658.7	751.0	728.6
4	748.5	683.4	601.4	651.5	658.6	750.8	728.3
5	748.9	685.4	602.0	651.7	658.5	750.9	728.4
6	749.3	686.0	602.4	651.8	658.6	750.9	728.5
7	749.3	685.9	602.5	651.8	658.5	750.9	728.5
8	750.4	685.2	603.3	653.6	660.0	752.8	730.1
9	748.7	685.7	603.0	653.4	659.7	752.3	729.9
10	738.4	683.3	603.9	654.5	660.2	753.1	730.9
11	735.1	675.1	601.0	653.4	659.7	752.3	729.9
12	734.5	671.4	599.5	653.4	659.6	752.0	729.8
13	733.5	653.0	597.3	653.2	659.5	752.3	729.8
14	726.9	649.0	597.0	653.2	659.6	752.3	729.8
15	725.1	646.6	596.1	653.1	659.5	752.2	729.8
16	723.8	642.7	593.5	653.1	659.5	752.1	729.9
17	715.6	639.2	584.2	653.1	659.4	752.0	730.1
18	712.5	634.9	568.8	653.7	659.5	752.4	729.9
19	712.0	632.8	564.8	653.0	659.5	752.4	729.9
20	709.7	630.7	563.4	653.3	659.3	752.1	729.7

Los resultados indican que las muestras MA-EA1, MA-EA2 y MA-EA3 fueron las únicas que perdieron peso (Fig. 68). Lo anterior significa que la presión ejercida por la cristalización de sal en los poros provocó un desprendimiento de material, lo cual

se confirma con lo observado en las caras de los cubos de estas muestras, donde predomina la deslaminación y descamación (Fig. 69).

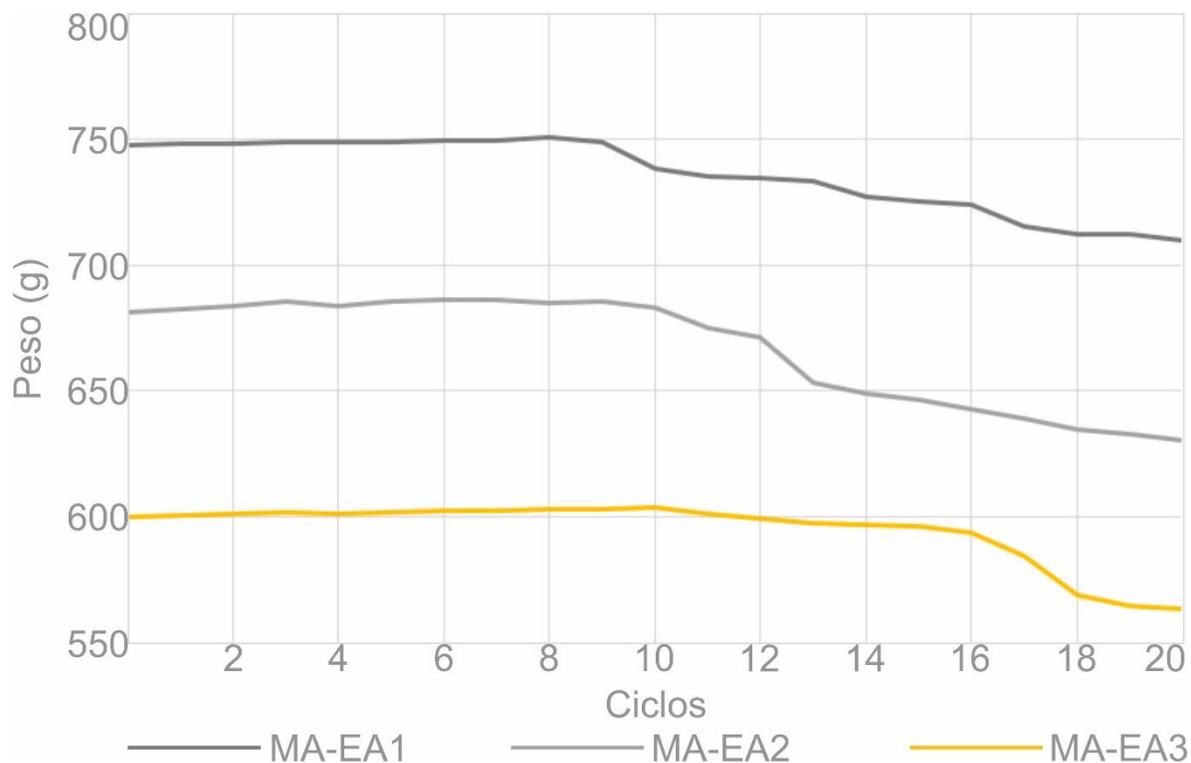


Figura 68. Valores durante el experimento de resistencia a la cristalización de sal para las muestras con pérdida de peso.

Las muestras MA-EA4, MA-EA5, MA-EA6 y MA-EA7 no experimentaron pérdida de peso, sino que aumentaron ligeramente entre 0.5 g y 2 g (Fig. 70). El incremento de peso se debió a que los poros se saturaron de sal, pero la presión de cristalización no es lo suficientemente grande como para fragmentar estas rocas, por lo que no presentaron daños de desprendimiento (Fig. 71).

De esta manera, las muestras con pérdida de material y por lo tanto con la menor resistencia a la cristalización de sal son los conglomerados calcáreos de grano grueso, conglomerados calcáreos de grano fino y conglomerados, mientras que las rocas con una ganancia ligera de peso al final de 20 ciclos contienen arenisca de grano grueso y grano medio (Fig. 72).

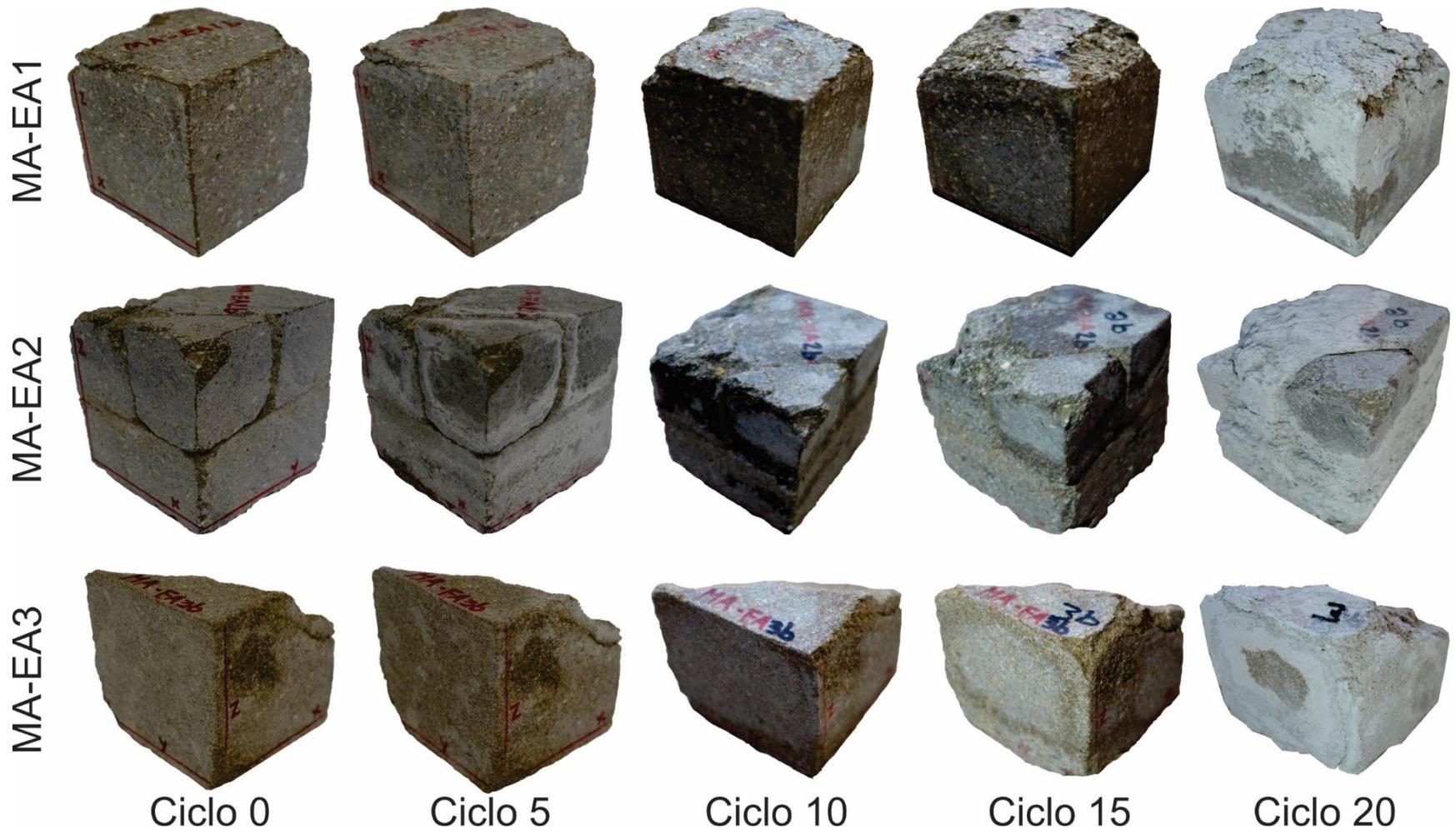


Figura 69. Evolución de las muestras MA-EA1, MA-EA2 y MA-EA3 durante el experimento de resistencia a la cristalización de sal. Las rocas desarrollaron daños por desprendimiento.

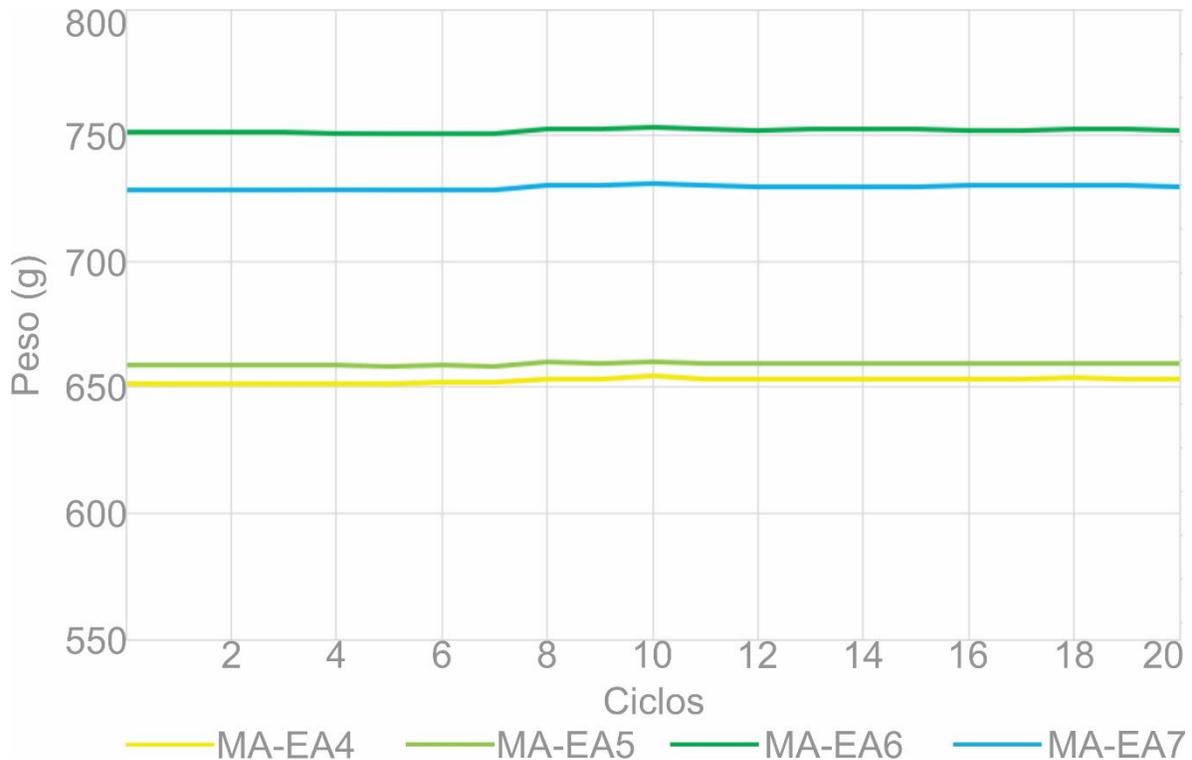


Figura 70. Valores durante el experimento de resistencia a la cristalización de sal para las muestras con aumento de peso.

5.2. Discusión

5.2.1. Mapeos litológicos y de daños

En los mapeos litológicos de todas las paredes del Edificio J y en la Galería de los Danzantes se encontraron patrones en el acomodo de los bloques y en el tipo de rocas utilizadas en las secciones originales y en las reconstruidas. La forma en la que se colocan las rocas ha sido uno de los factores a tomar en cuenta para la restauración de otros monumentos (Heinrichs, 2008; Siedel & Siegesmund, 2014; Martínez-Martínez *et al.*, 2018; Morillas *et al.*, 2018) y debería de considerarse en la zona arqueológica de Monte Albán. La cantidad total de los bloques mapeados en cada pared se encuentran en la Tabla 8, donde están divididos en parte original y reconstruida, además del porcentaje que representan.

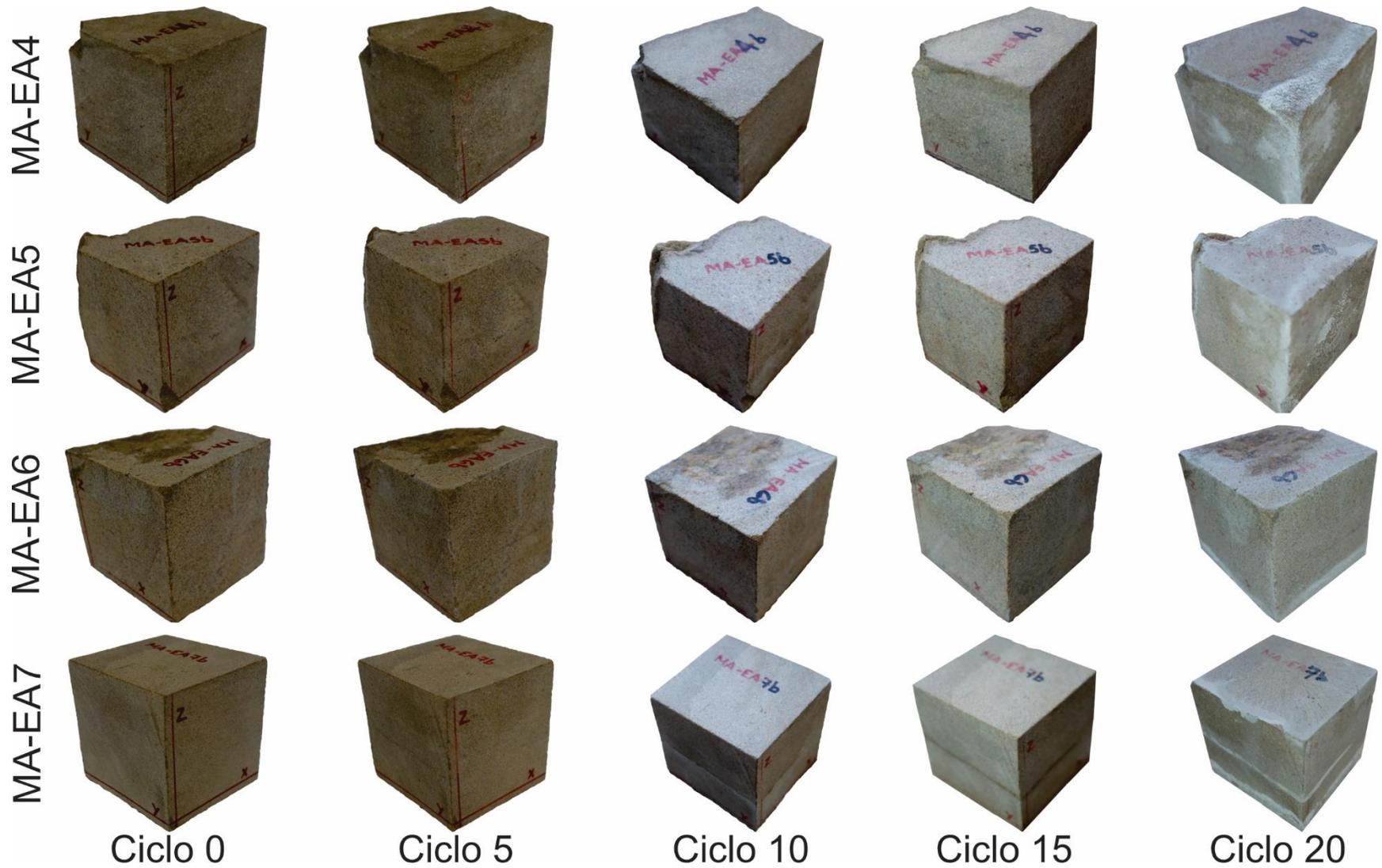


Figura 71. Evolución de las muestras MA-EA4, MA-EA5, MA-EA6 y MA-EA7 durante el experimento de resistencia a la cristalización de sal. Las rocas no desarrollaron daños por desprendimiento, sino solamente eflorescencias.

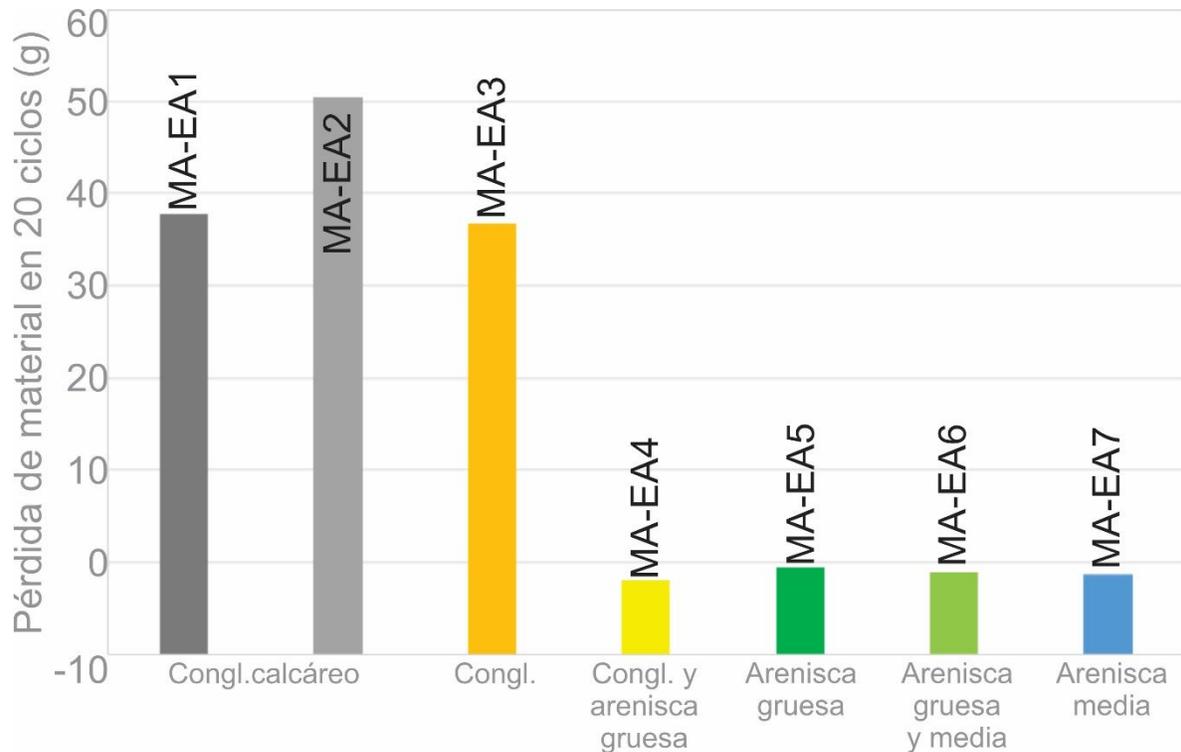


Figura 72. Pérdida de peso total para el experimento de resistencia a la cristalización de sal comparada con las diferentes litologías.

En la base de todas las paredes del Edificio J, ya sea que se compongan de un solo muro o de dos pisos, se colocaron los bloques más grandes. Los mapeos litológicos permitieron reconocer que estos bloques grandes son principalmente conglomerados y conglomerados calcáreos, aunque algunos pocos pueden ser areniscas de grano grueso y medio.

En la parte original de todas las paredes existe un acomodo preferencial de los bloques con su eje más largo en posición horizontal. La orientación vertical es menos común.

Las rocas que más se usaron en la construcción original fueron los conglomerados calcáreos de grano grueso, conglomerados, areniscas de grano grueso y grano medio (Tabla 8).

Tabla 8. Cantidad de bloques mapeados con su respectiva litología para el Edificio J y la Galería de los Danzantes. Cada pared se divide en el número de bloques totales, en la parte original y en la reconstruida, así como el porcentaje que representan.

Pared	Caliza	Conglomerado calcáreo		Conglomerado	Arenisca			Limolita	Total
		Grano grueso	Grano fino		Grano grueso	Grano medio	Grano fino		
1 (total)	4	7	6	89	224	209	42	11	592
1 (original)	3	3	0	18	81	54	12	3	174
1 (reconstruida)	1	4	6	71	143	155	30	8	418
1 (% total)	0.68	1.18	1.01	15.03	37.84	35.31	7.09	1.86	100
1 (% original)	1.72	1.72	0.00	10.35	46.55	31.04	6.90	1.72	100
1 (% reconstruida)	0.24	0.96	1.44	16.98	34.21	37.08	7.18	1.91	100
2 (total)	0	7	8	23	64	52	6	0	160
2 (original)	0	3	2	5	17	19	1	0	47
2 (reconstruida)	0	4	6	18	47	33	5	0	113
2 (% total)	0.00	4.37	5.00	14.37	40.00	32.50	3.76	0.00	100
2 (% original)	0.00	6.38	4.25	10.64	36.17	40.43	2.13	0.00	100
2 (% reconstruida)	0.00	3.54	5.31	15.93	41.60	29.20	4.42	0.00	100
3 (total)	0	31	2	21	55	74	19	0	202
3 (original)	0	18	0	5	26	36	8	0	93
3 (reconstruida)	0	13	2	16	29	38	11	0	109
3 (% total)	0.00	15.35	0.99	10.40	27.23	36.63	9.40	0.00	100
3 (% original)	0.00	19.35	0.00	5.38	27.96	38.71	8.60	0.00	100
3 (% reconstruida)	0.00	11.93	1.83	14.68	26.61	34.86	10.09	0.00	100
4 (total)	9	232	5	186	344	385	71	4	1236
4 (original)	0	19	0	29	34	39	8	0	129
4 (reconstruida)	9	213	5	157	310	346	63	4	1107
4 (% total)	0.73	18.77	0.41	15.05	27.83	31.15	5.74	0.32	100
4 (% original)	0.00	14.73	0.00	22.48	26.36	30.23	6.20	0.00	100
4 (% reconstruida)	0.81	19.24	0.45	14.18	28.01	31.26	5.69	0.36	100
5 (total)	0	4	0	30	50	27	11	0	122
5 (original)	0	3	0	12	20	13	5	0	53
5 (reconstruida)	0	1	0	18	30	14	6	0	69
5 (% total)	0.00	3.28	0.00	24.59	40.98	22.13	9.02	0.00	100
5 (% original)	0.00	5.66	0.00	22.64	37.74	24.53	9.43	0.00	100
5 (% reconstruida)	0.00	1.44	0.00	26.09	43.48	20.29	8.70	0.00	100

Continúa en la siguiente página

Continuación

6 (total)	0	4	0	17	57	75	13	1	167
6 (original)	0	2	0	8	11	9	5	0	35
6 (reconstruida)	0	2	0	9	46	66	8	1	132
6 (% total)	0.00	2.40	0.00	10.18	34.13	44.91	7.78	0.60	100
6 (% original)	0.00	5.71	0.00	22.86	31.43	25.71	14.29	0.00	100
6 (% reconstruida)	0.00	1.52	0.00	6.81	34.85	50.00	6.06	0.76	100
7 (total)	5	66	6	88	165	156	29	2	517
7 (original)	1	8	0	19	9	11	2	0	50
7 (reconstruida)	4	58	6	69	156	145	27	2	467
7 (% total)	0.97	12.77	1.16	17.02	31.91	30.17	5.61	0.39	100
7 (% original)	2.00	16.00	0.00	38.00	18.00	22.00	4.00	0.00	100
7 (% reconstruida)	0.86	12.42	1.28	14.78	33.40	31.05	5.78	0.43	100
8 (total)	0	18	13	16	42	69	13	0	171
8 (original)	0	11	9	6	15	19	4	0	64
8 (reconstruida)	0	7	4	10	27	50	9	0	107
8 (% total)	0.00	10.53	7.60	9.36	24.56	40.35	7.60	0.00	100
8 (% original)	0.00	17.19	14.06	9.37	23.44	29.69	6.25	0.00	100
8 (% reconstruida)	0.00	6.54	3.74	9.35	25.23	46.73	8.41	0.00	100
9 (total)	4	40	11	32	110	91	19	0	307
9 (original)	4	27	3	19	69	66	10	0	198
9 (reconstruida)	0	13	8	13	41	25	9	0	109
9 (% total)	1.30	13.03	3.58	10.43	35.83	29.64	6.19	0.00	100
9 (% original)	2.02	13.64	1.51	9.60	34.85	33.33	5.05	0.00	100
9 (% reconstruida)	0.00	11.93	7.34	11.93	37.61	22.93	8.26	0.00	100
10 (total)	3	67	1	39	258	234	47	0	649
10 (original)	3	54	0	18	122	110	20	0	327
10 (reconstruida)	0	13	1	21	136	124	27	0	322
10 (% total)	0.46	10.32	0.15	6.01	39.76	36.06	7.24	0.00	100
10 (% original)	0.92	16.51	0.00	5.50	37.31	33.64	6.12	0.00	100
10 (% reconstruida)	0.00	4.04	0.31	6.52	42.24	38.50	8.39	0.00	100

Continúa en la siguiente página

Continuación

11 (total)	8	96	2	63	180	208	35	2	594
11 (original)	2	32	1	7	23	35	4	0	104
11 (reconstruida)	6	64	1	56	157	173	31	2	490
11 (% total)	1.35	16.16	0.34	10.61	30.30	35.02	5.89	0.33	100
11 (% original)	1.92	30.77	0.96	6.73	22.12	33.65	3.85	0.00	100
11 (% reconstruida)	1.22	13.06	0.20	11.43	32.04	35.31	6.33	0.41	100
12 (total)	1	36	0	22	112	124	17	0	312
12 (original)	1	26	0	7	65	56	7	0	162
12 (reconstruida)	0	10	0	15	47	68	10	0	150
12 (% total)	0.32	11.54	0.00	7.05	35.90	39.74	5.45	0.00	100
12 (% original)	0.62	16.05	0.00	4.32	40.12	34.57	4.32	0.00	100
12 (% reconstruida)	0.00	6.67	0.00	10.00	31.33	45.33	6.67	0.00	100
13 (total)	0	20	1	22	72	104	19	1	239
13 (original)	0	4	0	4	26	22	5	1	62
13 (reconstruida)	0	16	1	18	46	82	14	0	177
13 (% total)	0.00	8.37	0.42	9.20	30.13	43.51	7.95	0.42	100
13 (% original)	0.00	6.45	0.00	6.45	41.94	35.48	8.07	1.61	100
13 (% reconstruida)	0.00	9.04	0.56	10.17	25.99	46.33	7.91	0.00	100
Danzantes (total)	0	11	7	21	8	30	6	0	83
Danzantes (% total)	0.00	13.25	8.43	25.30	9.64	36.15	7.23	0.00	100

En las secciones reconstruidas, las rocas se colocaron de forma irregular. Sin embargo, en algunas paredes en donde el acomodo horizontal de los bloques originales era evidente, como en las paredes 4, 9, 10, 11 y 12, se siguió esa misma orientación. Además, en las paredes 6, 7 y 8 se tiene una saliente de bloques posicionados de forma horizontal que no se observó en otras paredes.

Al igual que en las partes originales, en las secciones reconstruidas se utilizaron conglomerados calcáreos de grano grueso, conglomerados, areniscas de grano grueso y grano medio con porcentajes variables (Tabla 8).

El mapeo litológico de la pared de la Galería de los Danzantes muestra un patrón de acomodo para estas losas talladas. Primero se colocaron de forma vertical, luego horizontal y en la tercera fila de nuevo se pusieron verticalmente para finalizar con una orientación horizontal en la última fila.

Esta manera de colocar los bloques difiere de la usada en el Edificio J. Sin embargo, en algo que coinciden es en la litología principal usada para los bloques más grandes que son los conglomerados y conglomerados calcáreos de grano grueso. Para los demás bloques se usaron mayormente areniscas de grano medio (Tabla 8).

Los mapeos de daños permitieron reconocer qué zonas están más deterioradas y en cuáles predomina algún patrón de daño. En el caso de los rasgos inducidos por la pérdida de material, la erosión y el *pitting* son los más comunes, seguidos por microkarstificación y en menor medida perforaciones. Estos daños se encuentran repartidos por todas las paredes del Edificio J, pero más en las secciones reconstruidas. Una excepción a esto son las paredes 6, 10 y la parte superior de la pared 12 donde este tipo de deterioro ocupa más superficie en la parte original.

Los rasgos inducidos por pérdida de material se manifiestan casi totalmente en conglomerados y conglomerados calcáreos. La erosión ocurre en rocas conglomeráticas al perder sus componentes o su matriz, mientras que el *pitting* se concentra en las rocas más calcáreas, lo cual es un fenómeno común en este tipo de litología (ICOMOS-ISCS, 2011; Steiger *et al.*, 2014). Estas observaciones confirman la hipótesis planteada sobre que el tipo de roca condiciona el deterioro.

En los Danzantes, los rasgos inducidos por pérdida de material, especialmente la erosión y el *pitting*, son el deterioro dominante, afectando, de igual manera que en el Edificio J, a los conglomerados.

El desprendimiento engloba los daños de deslaminación, descamación, ampollas y fragmentación, de los cuales los primeros dos son los más comunes. Este tipo de deterioro abarca aproximadamente la misma superficie tanto en la parte original como en la reconstruida, siendo excepciones notables las paredes 1, 4 y 8 en donde predomina el desprendimiento en los bloques de la parte reconstruida.

A diferencia de los rasgos inducidos por la pérdida de material que están controlados por la litología, el desprendimiento parece depender de la posición de los bloques, laminación y de la superficie que tienen expuesta. Tómese como ejemplo las paredes 9, 10 y 11: los bloques que están colocados de forma horizontal tienen menos deslaminación y descamación, pero los demás que tienen una gran superficie expuesta, tanto en la parte original como en la reconstruida, presentan más desprendimiento. Este hecho confirma la hipótesis inicial donde se planteó que el acomodo de los bloques, además de la litología, afecta los patrones de deterioro.

En la Galería de los Danzantes se nota que no existen tantos daños de desprendimiento al compararla con las paredes del Edificio J. Sin embargo, puede que esto se deba a que están cubiertos por estuco y otro material que impide que la superficie de los Danzantes esté expuesta.

En la parte original, el depósito mapeado sobre la superficie de algunos bloques es el estuco con el que estaban recubiertas las paredes de los edificios en Monte Albán (Scott, 1978; Carter, 2017; Forde, 2020). La presencia de este depósito es alta en la mayoría de las paredes, pero en otras, como en la 5 y 8, es baja. En ocasiones, la cubierta de estuco protege a las rocas de daños de desprendimiento. Por lo anterior, puede considerarse a este material no como un tipo de deterioro, sino como un elemento original del edificio.

En las secciones reconstruidas también hay depósito sobre los bloques, sobre todo en su periferia, pero la mayoría se trata de materiales de mampostería de diferente

composición que la del estuco original. En todas las paredes se tiene gran cantidad de depósito, exceptuando las paredes 2, 5 y 8.

En los Danzantes, como se explicó anteriormente, el depósito de estuco u otro material cubre la superficie de todos bloques. Al igual que en las partes originales del Edificio J, el estuco usado por los zapotecas para recubrir las rocas no se debería de considerar como un deterioro y debería ser preservado en donde sea posible.

De acuerdo con los mapeos de daños, se interpreta que el material de mampostería empleado en la reconstrucción y restauraciones, al estar compuesto por una mezcla distinta al estuco original, es disuelto parcialmente por el agua de lluvia y precipitado en las rocas, provocando daños como incrustaciones y eflorescencias. Estos tipos de deterioro se generan en las zonas reconstruidas, como se observa en las paredes 1, 3, 4, 7, 11 y 12. Es posible que haya incrustaciones y eflorescencias en las partes originales también, como en las paredes 9 y 10, donde parece que estos daños no proceden de los materiales de mampostería de la reconstrucción.

En los Danzantes no existen incrustaciones ni eflorescencias debido a que esta área está techada, impidiendo que el agua de lluvia disuelva y precipite materiales. Como se describió en la hipótesis, la Galería de los Danzantes tiene patrones de deterioro diferentes a los del Edificio J debido al techo colocado después de los sismos de septiembre de 1999.

El enmugrecimiento es el deterioro con mayor extensión en la totalidad del Edificio J. Generalmente sigue los patrones de escurrimiento del agua de lluvia, comenzando desde la parte superior de las paredes y en ocasiones cubriendo hasta la parte inferior. En la pared 4, la mayoría de los escalones tienen enmugrecimiento, lo que significa que este tipo de acomodo aumenta la exposición de la superficie de los bloques hacia el enmugrecimiento. Esto se puede observar también en menor medida sobre los pequeños escalones de las paredes 9, 10, 11 y 12. Por otra parte, las paredes 2, 3 y 8 casi no tienen enmugrecimiento.

Esto mismo pasa con los Danzantes, no tienen enmugrecimiento ya que el techo impide que el agua de lluvia recorra la pared. Solamente un Danzante que no se encuentra protegido de la lluvia presenta enmugrecimiento. Por estos hechos se reafirma la hipótesis inicial sobre que el acomodo de los bloques condiciona el deterioro y que los patrones de daños son diferentes en el Edificio J y en la Galería de los Danzantes.

La colonización biológica se puede desarrollar principalmente por la presencia de agua o humedad. Los resultados de los experimentos indican que las rocas usadas en Monte Albán, al tener porosidades muy bajas, no pueden absorber una gran cantidad de agua y por lo tanto se esperaría que no tuvieran colonización biológica. Esto se observa en los mapeos de las paredes del Edificio J, en donde el crecimiento de organismos sucede en el material de mampostería, mayormente en las partes reconstruidas y restauradas, debido quizás por tener más porosidad y así conservan más humedad. Ejemplos notables de esto son las paredes 4, 6, 7, 9, 11, 12 y 13. Para lo anterior se sugiere realizar una evaluación completa de la composición de los materiales, lo cual ha sido recomendado por diversos autores en otros monumentos (Siegesmund *et al.*, 2002; Goudie & Viles, 2010).

Hay paredes que, al contrario, tienen escasa colonización biológica como la 2, 3, 5 y 8. Posiblemente estos contrastes se deban a materiales de mampostería diferentes utilizados a través de todo el historial de restauraciones y al mantenimiento que se les da a los edificios (Robles-García & Landa-Alarcón, 2009). Nuevamente, la pared de la Galería de los Danzantes no presenta este tipo de deterioro debido a que está protegida por el techo.

Las grietas predominan en las partes reconstruidas, ya sea cortando los bloques de roca o a través de los materiales de mampostería. Un ejemplo notable de este último fenómeno se tiene en la pared 2, donde las grietas cortan toda la pared con una orientación vertical y se inclinan hacia la derecha (noroeste). Posiblemente se generaron por algún sismo o por la sobrecarga estructural. La pared con menos grietas es la 8.

Al igual que esta pared, en los Danzantes las grietas no son un daño predominante, encontrándose solo en tres bloques: dos pequeños y en un Danzante.

El análisis de los mapeos de daños de todas las paredes del Edificio J demuestra que los deterioros principales son el enmugrecimiento, descamación, deslaminación, erosión y *pitting* respectivamente. La pared con menos deterioro es la pared 8, quizás respondiendo a que fue restaurada después de los sismos de 1999 (Bautista-Hernández *et al.*, 2009). Las demás paredes mantienen aproximadamente la misma superficie con daños, por lo que no es posible definir cuál de todas tiene más deterioro.

En la Galería de los Danzantes, los deterioros principales son la erosión, el *pitting*, la descamación y deslaminación. Es notable cómo la colocación del techo ayudó a reducir los daños como el enmugrecimiento, incrustaciones, eflorescencias y la colonización biológica.

Los resultados de los mapeos confirman la hipótesis: los patrones de deterioro responden al tipo de litología, al acomodo de los bloques, al material de mampostería y son diferentes en el Edificio J y en los Danzantes.

5.2.2. Difracción de rayos X y petrografía

Las similitudes minerales observadas en los análisis de difracción de rayos X entre las rocas de los afloramientos de la Formación Jaltepetongo y de las utilizadas en la construcción de los edificios de Monte Albán reafirma la idea de que los zapotecas, después de nivelar el terreno, usaron esas mismas rocas para construir diferentes elementos (Duverger & Letouzé, 2017; Gendron *et al.*, 2019).

Manzanilla *et al.* (2017) estudiaron la composición de la cerámica de Monte Albán mediante difracción de rayos X y encontraron que contenía micas, específicamente flogopita, que sugirieron que provenía de pegmatitas del Complejo Oaxaqueño. La difracción de rayos X efectuada aquí también reveló la presencia de flogopita, por lo que probable que las rocas usadas para la construcción hayan servido además para elaborar cerámica.

La descripción petrográfica de las muestras de los afloramientos y de las rocas de construcción demostró que contienen porcentajes similares de cuarzo, feldespatos, líticos y cemento, lo cual es otra razón a favor de que los zapotecas usaron las rocas de la Formación Jaltepetongo para construir los edificios.

Otros autores hicieron petrografía en fragmentos de cerámica de Monte Albán (Fargher, 2007; Minc & Sherman, 2011; Minc *et al.*, 2016). Encontraron algunos minerales representativos como microlina, calcita y granate, los cuales también están presentes en las muestras de este trabajo. Como se mencionó antes, los zapotecas probablemente usaron las rocas de construcción para otros propósitos como la producción de cerámica, aunque pudieron haber mezclado otros componentes.

5.2.3. Experimentos petrofísicos

Los valores de porosidad obtenidos para las rocas de construcción de Monte Albán son muy bajos porque durante la diagénesis se produjeron procesos de cementación, lo cual resulta evidente al analizar la descripción petrográfica y el conteo donde el cemento tiene valores entre 25 % y 50 %. En la Figura 73 se muestra cómo varía la porosidad de acuerdo con el porcentaje del cemento.

Como se presentó en los resultados, la porosidad es más alta en los conglomerados y disminuye conforme el tamaño de grano decrece. Es probable que por esta razón los conglomerados son más propensos a experimentar rasgos inducidos por la pérdida de material como la erosión y el *pitting*.

La porosidad y la distribución del tamaño de poro son parámetros importantes porque influyen en todas las demás propiedades físicas como la absorción capilar, expansión hídrica y resistencia a la cristalización de sal (Benavente *et al.*, 2004; Siegesmund & Dürrast, 2014; López-Doncel *et al.*, 2015).

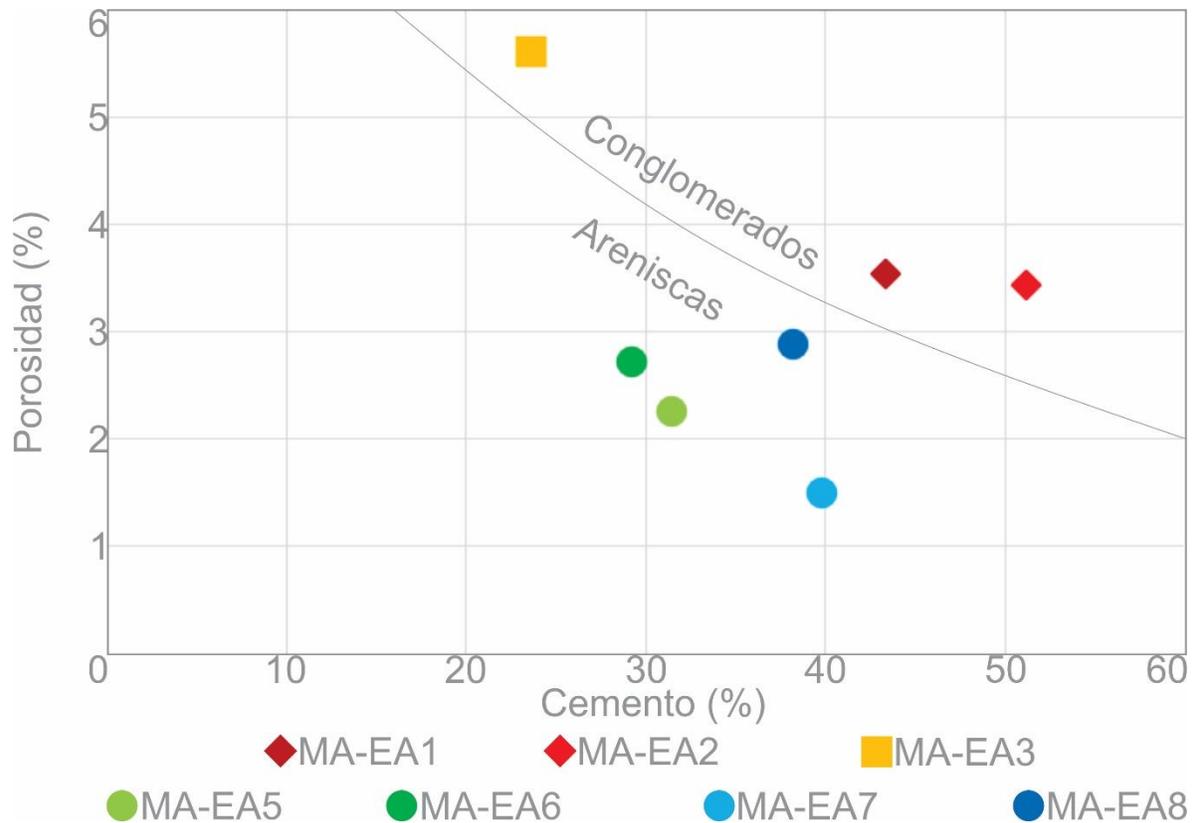


Figura 73. Relación entre porosidad y el porcentaje de cemento determinado con el conteo petrográfico.

La absorción capilar está relacionada con la distribución de tamaño de poro: entre mayor porcentaje de poros capilares más absorción capilar (Franzoni *et al.*, 2014; Martínez-Martínez *et al.*, 2018). Esto se puede observar más claramente al comparar las rocas de igual tamaño de grano (Fig. 74).

Es sabido que los valores bajos de expansión hídrica pueden deberse a la porosidad baja (López-Doncel *et al.*, 2013; Wedekind *et al.*, 2013), especialmente en rocas calcáreas (Siegesmund & Dürrast, 2014), tal como las rocas Monte Albán. Sin embargo, al contrastar los resultados de la expansión hídrica con la porosidad, la distribución de tamaño de poro y la granulometría de las muestras se encontró que los conglomerados se comportan de diferente manera a las areniscas: los conglomerados con mayor expansión hídrica son los que tienen más porcentaje de poros capilares (muestras MA-EA2 y MA-EA3; esta última contiene montmorillonita),

mientras que las areniscas con mayor expansión hídrica tienen más porosidad (muestras MA-EA6 y MA-EA8; la primera contiene montmorillonita).

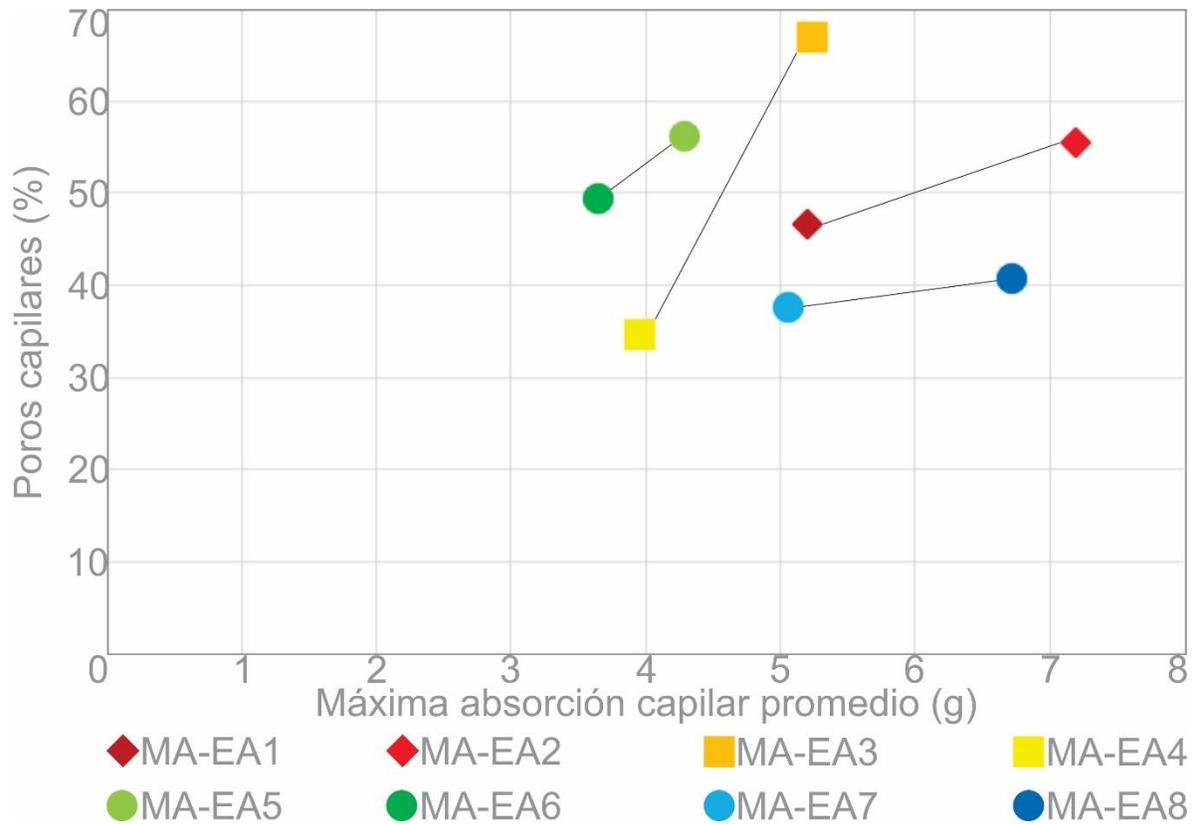


Figura 74. Comparación entre el porcentaje de poros capilares y el valor máximo de absorción capilar promedio de los planos XZ y XY. Las líneas unen las rocas con el mismo tamaño de grano.

En el caso de la resistencia a la cristalización de sal, las rocas con el porcentaje más alto de porosidad (conglomerados calcáreos y conglomerado) experimentaron mayor pérdida de material (Fig. 75). Este comportamiento es común y se ha reportado en otros estudios (López-Doncel *et al.*, 2016; Özşen *et al.*, 2017; Pötzl *et al.*, 2018; Çelik & Aygün, 2019; Sun & Zhang, 2019). La resistencia a la cristalización de sal puede depender también de la distribución de tamaño de poro. Se ha demostrado que las rocas con una distribución unimodal de tamaño de poro y un porcentaje pequeño de microporos completan más ciclos que las rocas con un porcentaje más alto de microporos (Siegesmund & Dürrast, 2014; López-Doncel *et al.*, 2016). Las rocas de Monte Albán tienen una distribución multimodal irregular y

porcentajes similares de microporos y poros capilares, por lo que la resistencia a la cristalización de sal estuvo controlada mayormente por la porosidad, como se explicó antes.

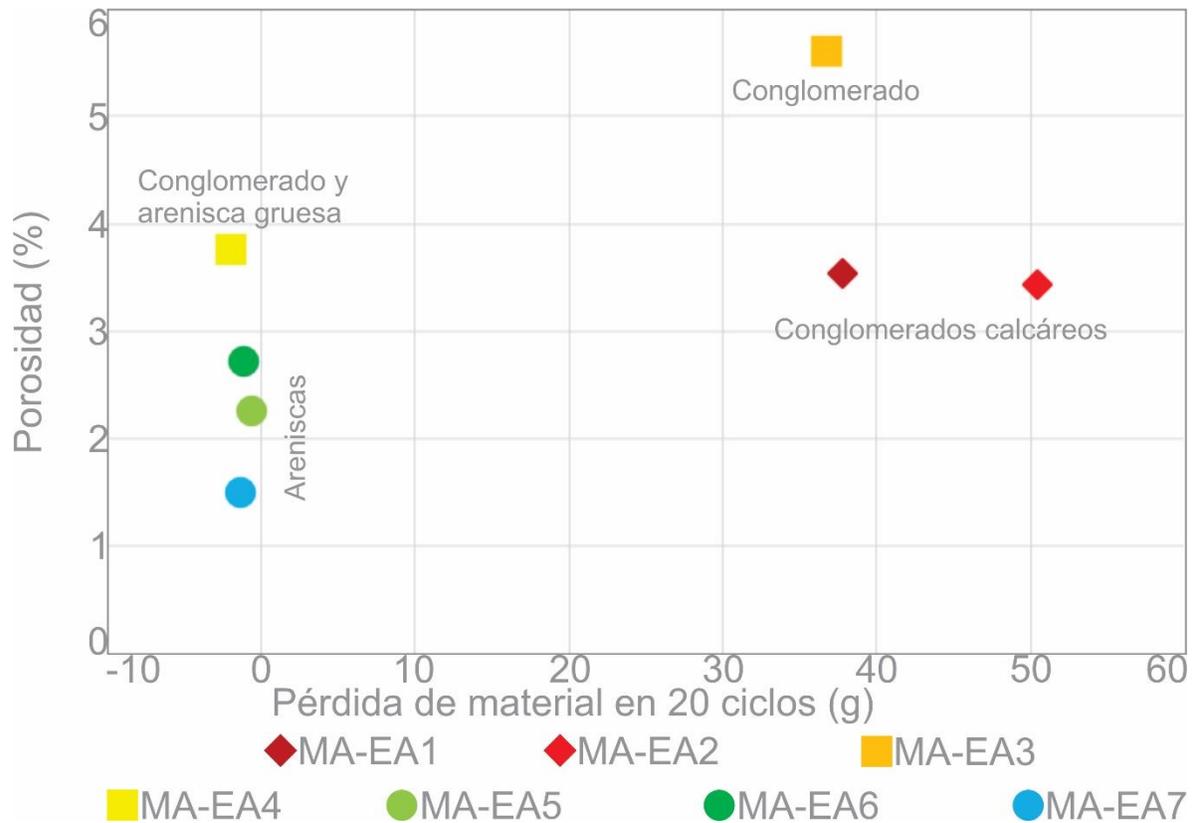


Figura 75. Relación entre porosidad y la pérdida máxima de peso. Nótese cómo estas propiedades varían de acuerdo con la litología y el tamaño de grano.

En los mapeos de daños destaca la poca superficie que ocupan las incrustaciones y eflorescencias. En primer lugar, esto se explica por la poca porosidad de las rocas, lo cual no permite el desarrollo de eflorescencias porque la cantidad de agua absorbida es poca. En segundo lugar, no existe una presencia suficientemente alta de sal en el ambiente como para que se generen estos daños.

5.2.4. Conservación y restauración

La integración de los resultados obtenidos de los mapeos, análisis y experimentos petrofísicos permite reconocer que las rocas con menor porosidad, es decir, las areniscas, tienen más oportunidad de resistir el deterioro. Por esto se sugiere se empleen estas rocas en la medida de lo posible para la conservación y restauración de los edificios de Monte Albán, siempre tomando en cuenta que la orientación de las estructuras sedimentarias sea perpendicular a la superficie de las paredes y que se coloque de forma horizontal para evitar daños de desprendimiento.

Los materiales de mampostería utilizados pueden propiciar el desarrollo de incrustaciones, eflorescencias y colonización biológica, por lo que son necesarios estudios sobre la composición y porosidad de dichos materiales, así como del estuco original.

Los resultados obtenidos pueden ampliarse aún más con metodologías indirectas no destructivas en otros edificios de la zona arqueológica que pueden derivar en más información sobre las causas del deterioro. Asimismo, una evaluación de los daños de cada monumento de Monte Albán complementará la hipótesis presentada.

Conclusiones

El objetivo de esta investigación fue determinar los daños del Edificio J y de la Galería de los Danzantes, además de cómo la litología y las propiedades físicas se relacionan con los patrones de deterioro en las rocas de construcción utilizadas en Monte Albán.

De acuerdo con la hipótesis planteada, se descubrió inicialmente que los patrones, la extensión y el tipo de daños entre el Edificio J y en la Galería de los Danzantes son diferentes. En el primero predomina el enmugrecimiento, mientras que en el segundo no existe este deterioro debido a que está cubierto por un techo, el cual también protege del agua de lluvia que impide el desarrollo de colonización biológica, incrustaciones y eflorescencias que son comunes en el Edificio J.

Otro elemento que se encontró que influye en el deterioro de las rocas de construcción es el acomodo de los bloques y su litología, al igual que los materiales de mampostería empleados durante la reconstrucción y restauraciones. La posición horizontal de los bloques reduce la superficie expuesta a la intemperie, lo que a su vez evita mayores daños de descamación, mientras que la colocación horizontal de la laminación impide la deslaminación. Esto se puede observar en las partes originales del Edificio J, en donde los zapotecas procuraron poner los bloques más grandes en los cimientos y posteriormente colocar rocas más pequeñas con su eje más largo en forma horizontal. Al contrario, en algunas secciones reconstruidas a principios del siglo XX, los bloques pequeños se posicionaron con orientaciones irregulares y con una mayor superficie expuesta.

El tipo de roca influye también en el deterioro, como se observa en los conglomerados y conglomerados calcáreos de grano grueso y medio, los cuales experimentan en gran medida rasgos inducidos por la pérdida de material como erosión y *pitting*. Mediante los experimentos petrofísicos se determinó que estas litologías son las que tienen valores más altos de porosidad, por lo que es probable que absorban más agua y se expandan más al contacto con agua. Sin embargo, se encontró que la porosidad de las rocas de Monte Albán es muy baja comparada con otro tipo de areniscas. Al realizar la descripción petrográfica se encontró que los

valores bajos porosidad son causados por la proliferación de cemento de carbonato, es decir, calcita. La petrografía también permitió confirmar que las rocas pertenecen a la Formación Jaltepetongo, lo cual es significativo porque aparte de las rocas se pudieron haber extraído otros materiales para la elaboración de estuco o cerámica, lo cual se podría demostrar con análisis geoquímicos futuros de estos materiales.

En cuanto a los materiales de mampostería utilizados en la reconstrucción y en las restauraciones, generalmente permiten el desarrollo de colonización biológica, así como de incrustaciones y eflorescencias, por lo que se necesitan estudios para determinar su porosidad, la cual es la propiedad que seguramente permite estos daños.

Los mapeos litológicos y de daños constituyeron herramientas fundamentales para evaluar el grado de deterioro de cada pared del Edificio J y en los Danzantes, por lo que un mapeo detallado de los demás edificios de Monte Albán puede ampliar los resultados de esta tesis. Igualmente, la evaluación de otras propiedades petrofísicas como la resistencia a la compresión y tensión de las rocas de construcción ayudará a los análisis estructurales y proporcionará datos invaluable para evaluar posibles zonas de riesgo en los edificios. De igual importancia es la realización de mediciones indirectas no destructivas que permitan definir propiedades como la velocidad de onda, radioactividad gamma y resistividad.

Referencias

- Adams, R.E.W. (2005): Prehistoric Mesoamerica. – EUA, University of Oklahoma Press, 521 pp.
- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, Á.F. & Ortega-Gutiérrez, F. (1994): Structural evolution of the Sierra de Juárez mylonitic complex, state of Oaxaca, Mexico. – *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11 (2), 147-156.
- Arnott, R.W.C. (2010): Deep-marine sediments and sedimentary systems. – *in* James, N.P. & Dalrymple, R.W. (eds.): *Facies models 4*. – Canadá, Geological Association of Canada, *GEOtext* 6, 295-322.
- Balkansky, A.K. (1998): Origin and collapse of complex societies in Oaxaca (Mexico): evaluating the era from 1965 to the present. – *Journal of World Prehistory*, 12 (4), 451-493.
- Bautista-Hernández, J., Villegas-H., M., Ibáñez, Á., Salinas-Contreras, A., Juárez-Osnaya, A., García-Argüelles, G., Landa-Alarcón, O.L., Tenorio, J.L., Mejía, E., Robles, I. & Olvera, M. (2009): Intervención de restauración de los edificios por zona arqueológica y de acuerdo con el tipo de material constructivo. – *en* Robles-García, N.M. (ed.): *Los monumentos arqueológicos de Monte Albán ante los desastres naturales: el sismo de 1999*. – México, Instituto Nacional de Antropología e Historia, 55-324.
- Benavente, D., García-del Cura, M.A., Fort, R. & Ordóñez, S. (2004): Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. – *Engineering Geology*, 74 (1-2), 113-127.
- Blanton, R.E., Appel, J., Finsten, L., Kowalewski, S., Feinman, G. & Fisch, E. (1979): Regional evolution in the Valley of Oaxaca, Mexico. – *Journal of Field Archaeology*, 6 (4), 369-390.
- Blanton, R.E., Feinman, G.M., Kowalewski, S.A. & Nicholas, L.M. (2005): *Ancient Oaxaca: The Monte Albán state*. – Reino Unido, Cambridge University Press, 153 pp.
- Blomster, J.P. (2008): Changing cloud formations: the sociopolitics of Oaxaca in Late Classic/Postclassic Mesoamérica. – *in* Blomster, J.P. (ed.): *After Monte Albán: transformation and negotiation in Oaxaca, Mexico*. – Canadá, University Press of Colorado, 3-46.
- Blomster, J.P. & Glascock, M.D. (2011): Obsidian procurement in formative Oaxaca, Mexico: diachronic changes in political economy and interregional interaction. – *Journal of Field Archaeology*, 36 (1), 21-41.
- Boggs, S. (2006): *Principles of sedimentology and stratigraphy*. – EUA, Pearson Prentice Hall, 662 pp.
- Böse, E. (1910): Neue Beiträge zur Kenntnis der mexikanischen Kreide. – *Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, 11 (1), 652-662.

- Campagno, M. (2019): Initial urbanization and the emergence of the state in Hierakonpolis (Nile Valley) and Monte Albán (Oaxaca Valley). – *Journal of Archaeological Method and Theory*, 26 (1), 217-246.
- Campos-Enríquez, J.O., Alatorre-Zamora, M.A., Keppie, J.D., Belmonte-Jiménez, S.I. & Ramón-Márquez, V.M. (2014): Interpretation of gravity profiles across the northern Oaxaca terrane, its boundaries and the Tehuacán Valley, southern Mexico. – *Journal of South American Earth Sciences*, 56 (1), 396-408.
- Campos-Enríquez, J.O., Belmonte-Jiménez, S.I., Keppie, J.D., Ortega-Gutiérrez, F., Arzate, J.A., Martínez-Silva, J. & Martínez-Serrano, R.G. (2010): Gravity and magnetic survey of the Oaxaca city region: Cenozoic horst-and-graben structure superimposed on the Oaxaca-Juarez terrane boundary, southern Mexico. – *Journal of South American Earth Sciences*, 29 (3), 572-585.
- Carfentan, J.C. (1981): Evolución estructural del sureste de México; paleogeografía e historia tectónica de las zonas internas mesozoicas. – *Revista del Instituto de Geología*, 5 (2), 207-216.
- Carter, N.P. (2017): Epigraphy and empire: reassessing textual evidence for Formative Zapotec imperialism. – *Cambridge Archaeological Journal*, 27 (3), 433-450.
- Caso, A. (1932): Reading the riddle of ancient jewels: an analysis of the historical significance of the Monte Alban treasure—the ritualistic meaning of the ancient Mixtec inscriptions. – *Natural History*, 32 (5), 464-480.
- 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.
- Centeno-García, E. & Keppie, J.D. (1999): Latest Paleozoic-early Mesozoic structures in the central Oaxaca Terrane of southern Mexico: deformation near a triple junction. – *Tectonophysics*, 301 (3-4), 231-242.
- Charlton, T.H., Fournier, P. & Charlton, C.L.O. (2009): Historical archaeology in Central and Northern Mesoamerica: development and current status. – *in*: Majewski, T. & Gaimster, D. (eds.): *International handbook of historical and archaeology*. – USA, Springer Science+Business Media, 409-428.
- De Clercq, H., Jovanović, M., Linnow, K. & Steiger, M. (2013): Performance of limestones laden with mixed salt solutions of Na₂SO₄-NaNO₃ and Na₂SO₄-K₂SO₄. – *Environmental Earth Sciences*, 69 (5), 1751-1761.

- Deutsches Institut für Normung (DIN) (1999): DIN EN 12370:1999-06 (D). Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung des Widerstandes gegen Kristallisation von Salzen; Deutsche Fassung EN 12370:1999. – Alemania, Deutsches Institut für Normung (DIN), Reporte Técnico, 4 pp.
- Deutsches Institut für Normung (DIN) (2013): DIN 52102:2013-10 (D). Prüfverfahren für Gesteinskörnungen - Bestimmung der Trockenrohichte mit dem Messzylinderverfahren und Berechnung des Dichtigkeitsgrades. – Alemania, Deutsches Institut für Normung (DIN), Reporte Técnico, 10 pp.
- Deutsches Institut für Normung (DIN) (2018): DIN EN ISO 15148:2018-12 (D). Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen (ISO 15148:2002 + Amd 1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 15148:2002 + A1:2016. – Alemania, Deutsches Institut für Normung (DIN), Reporte Técnico, 18 pp.
- Dinçer, İ. & Bostancı, M. (2019): Capillary water absorption characteristics of some Cappadocian ignimbrites and the role of capillarity on their deterioration. – *Environmental Earth Sciences*, 78 (1), A7.
- Duverger, C. & Letouzé, A. (2017): Monte Albán: campagnes de fouilles au sein du Sistema Siete Venado, 2009-2012. – Francia, Presses de l'université Paris-Sorbonne, 782 pp.
- Elson, C.M. & Sherman, R.J. (2007): Crema ware and elite power at Monte Albán: ceramic production and iconography in the Oaxaca Valley, Mexico. – *Journal of Field Archaeology*, 32 (3), 265-282.
- Fahmel-Beyer, B. (2005): Monte Albán: introducción. – *en* de la Fuente, B. & Fahmel-Beyer, B. (eds.): *La pintura mural prehispánica en México III: Oaxaca. Tomo I: catálogo*. – México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Estéticas, 22-33.
- Fahmel-Beyer, B. (2017): Monte Albán V y los mixtecos. – *Anales de Antropología*, 51 (2), 131-141.
- Fargher, L.F. (2007): A microscopic view of ceramic production: an analysis of thin-sections from Monte Alban. – *Latin American Antiquity*, 18 (3), 313-332.
- Farkas, O., Siegesmund, S., Licha, T. & Török, Á. (2018): Geochemical and mineralogical composition of black weathering crusts on limestones from seven different European countries. – *Environmental Earth Sciences*, 77 (5), A211.
- Feinman, G.M., Kowalewski, S.A., Finsten, L., Blanton, R.E. & Nicholas, L. (1985): Long-term demographic change: a perspective from the Valley of Oaxaca, Mexico. – *Journal of Field Archaeology*, 12 (3), 333-362.

- Feinman, G.M. & Nicholas, L.M. (2016): Reconsiderando la “invasión mixteca” del valle de Oaxaca en el Posclásico. – *Anales de Antropología*, 50 (2), 247-265.
- Feinman, G.M. & Nicholas, L.M. (2017): Settlement patterns in the Albarradas area of Highland Oaxaca, Mexico: frontiers, boundaries, and interaction. – *Fieldiana Anthropology*, 46 (1), 1-162.
- Forde, J.E. (2020): Broken flowers: Christian *spolia* in a colonial Mixtec household. – *Colonial Latin American Review*, 29 (2), 195-222.
- Franzoni, E., Bandini, S. & Graziani, G. (2014): Rising moisture, salts and electrokinetic effects in ancient masonries: from laboratory testing to on-site monitoring. – *Journal of Cultural Heritage*, 15 (2), 112-120.
- Garduño-Monroy, V.H., Figueroa-Soto, A., Magaña-García, N., Ruiz-Figueroa, A. Gómez-Cortés, J., Jiménez-Haro, A. & Hernández-Madrigal, V.M. (2019): The Mitla landslide, an event that changed the fate of a Mixteco/Zapoteco civilization in Mesoamérica. – *International Journal of Geophysics*, 11 (1), 14 pp.
- Garzanti, E. & Vezzoli, G. (2003): A classification of metamorphic grains in sands based on their composition and grade. – *Journal of Sedimentary Research*, 73 (5), 830-837.
- Gendron, F., Calligaro, T., Richardin, P., Duverger, C., Letouzé, A., Garcia, F., Cuynet, F., Marigo, S., Sakowicz, K. & Mancina, P. (2019): The evolution of obsidian procurement in ancient Oaxaca, Mexico: new data from the Sistema 7 Venado architectural complex, Monte Albán. – *Journal of Archaeological Science: Reports*, 23 (1), 583-591.
- González-Gómez, W.S., Quintana, P., Gómez-Cornelio, S., García-Solis, C., Serra-Fernández, A., Ortega-Morales, O. & de la Rosa-García, S.C. (2018): Calcium oxalates in biofilms on limestone walls of Maya buildings in Chichén Itzá, Mexico. – *Environmental Earth Sciences*, 77 (6), A230.
- González-Ramos, A., Sánchez-Rojas, L.E., Mota-Mota, S., Arceo-y Cabrilla, F.A., Onofre-Espinosa, L., Zárate-López, J. & Soto-Araiza, R. (2000): Carta geológica-minera Oaxaca E14-9. – México, Servicio Geológico Mexicano, Mapa, escala 1:250,000.
- Goudie, A.S. & Viles, H. (2010): Weathering hazards. – *in* Alcántara-Ayala, I. & Goudie, A.S. (eds.): *Geomorphological hazards and disaster prevention*. – Reino Unido, Cambridge University Press, 145-159.
- Gunn, J. & Adams, R.E.W. (1981): Climatic change, culture, and civilization in North America. – *World Archaeology*, 13 (1), 87-100.

- Hatir, M.E., Korkanç, M. & Başar, M.E. (2019): Evaluating the deterioration effects of building stones using NDT: the Küçükköy Church, Cappadocia Region, central Turkey. – *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78 (5), 3465-3478.
- Heinrichs, K. (2008): Diagnosis of weathering damage on rock-cut monuments in Petra, Jordan. – *Environmental Geology*, 56 (3-4), 643-675.
- Herrera, R.S., Neff, H., Glascock, M.D. & Elam, J.M. (1999): Ceramic patterns, social interaction, and the Olmec: neutron activation analysis of Early Formative pottery in the Oaxaca Highlands of Mexico. – *Journal of Archaeological Science*, 26 (8), 967-987.
- Imlay, R.W. (1944): Cretaceous Formations of Central America and Mexico. – *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 28 (8), 1077-1195.
- International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) (1987): World heritage list N°415. – Francia, International Council on Monuments and Sites, Reporte técnico, 3 pp.
- International Council on Monuments and Sites-International Scientific Committee for Stone (ICOMOS-ISCS) (2011): Illustrated glossary on stone deterioration patterns/Glosario ilustrado de formas de deterioro de la piedra. – Francia, International Council on Monuments and Sites-International Scientific Committee for Stone (ICOMOS-ISCS), 80 pp.
- Keppie, J.D., Dostal, J., Cameron, K.L., Solari, L.A., Ortega-Gutiérrez, F. & Lopez, R. (2003): Geochronology and geochemistry of Grenvillian igneous suites in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: tectonic implications. – *Precambrian Research*, 120 (3-4), 365-389.
- Keppie, J.D., Dostal, J., Ortega-Gutiérrez, F. & Lopez, R. (2001): A Grenvillian arc on the margin of Amazonia: evidence from the southern Oaxacan Complex, southern Mexico. – *Precambrian Research*, 112 (3-4), 165-181.
- Loeza-García, J.P. & Mendoza-Torres, A. (2007): Carta geológico-minera Oaxaca de Juárez E14-D47, Oaxaca. – México, Servicio Geológico Mexicano, Mapa, escala 1:50,000.
- López-Doncel, R.A., Cardona-Velázquez, N. & Wedekind, W. (2015): El rescate del patrimonio cultural pétreo de San Luis Potosí. – *Universitarios Potosinos*, 194 (1), 4-10.
- López-Doncel, R.A., 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), A338.
- López-Doncel, R.A., Wedekind, W., Dohrmann, R. & Siegesmund, S. (2013): Moisture expansion associated to secondary porosity: an example of the Loseros Tuff of Guanajuato, Mexico. – *Environmental Earth Sciences*, 69 (4), 1189-1201.

- López-Doncel, R.A., Wedekind, W., Leiser, T., Molina-Maldonado, S., Velasco-Sánchez, A., Dohrmann, R., Kral, A., Wittenborn, A., Aguillón-Robles, A. & Siegesmund, S. (2016): Salt bursting tests on volcanic tuff rocks from Mexico. – *Environmental Earth Sciences*, 75 (3), A212.
- López-Ticha, D. (1985): Revisión de la estratigrafía y potencial petrolero de la Cuenca de Tlaxiaco. – *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 37 (1), 49-92.
- Manzanilla, L.R., Bokhimi, X., Tenorio, D., Jiménez-Reyes, M., Rosales, E., Martínez, C. & Winter, M. (2017): Procedencia de la mica de Teotihuacan: control de los recursos suntuarios foráneos por las élites gobernantes. – *Anales de Antropología*, 51 (1), 23-38.
- Marcus, J. (1974): The iconography of power among the Classic Maya. – *World Archaeology*, 6 (1), 83-94.
- Marszałek, M., Alexandrowicz, Z. & Rzepa, G. (2014): Composition of weathering crusts on sandstones from natural outcrops and architectonic elements in an urban environment. – *Environmental Science and Pollution Research*, 21 (24), 14023-14036.
- Martínez-Lira, P. & Corona-Martínez, E. (2016): Possible co-existence of two species of genus *Meleagris* at Monte Albán, Oaxaca. – *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10 (1), 632-639.
- Martínez-Martínez, J., Pola, A., García-Sánchez, L., Reyes-Agustin, G., Osorio-Ocampo, L.S., Macías-Vázquez, J.L. & Robles-Camacho, J. (2018): Building stones used in the architectural heritage of Morelia (México): quarries location, rock durability and stone compatibility in the monument. – *Environmental Earth Sciences*, 77 (5), A167.
- Martinho, E. & Dionísio, A. (2020): Assessment techniques for studying the effects of fire on stone materials: a literature review. – *International Journal of Architectural Heritage*, 14 (2), 275-299.
- McCafferty, S.D. & McCafferty, G.G. (1994): Engendering Tomb 7 at Monte Alban: respinning an old yarn. – *Current Anthropology*, 35 (2), 143-166.
- Méndez-Gaona, A. (2020): Medición de rayos gamma como método para evaluar el deterioro en las rocas de construcción de Real de Catorce, San Luis Potosí. – México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Tesis de Maestría, 190 pp.
- Minc, L.D. & Sherman, R.J. (2011): Assessing natural clay composition in the Valley of Oaxaca as a basis for ceramic provenance studies. – *Archaeometry*, 53 (2), 285-328.
- Minc, L.D., Sherman, R.J., Elson, C., Winter, M., Redmond, E.M. & Spencer, C.S. (2016): Ceramic provenance and the regional organization of pottery production during the later Formative

- periods in the Valley of Oaxaca, Mexico: results of trace-element and mineralogical analyses. – *Journal of Archaeological Science: Reports*, 8 (1), 28-46.
- Molina-Maldonado, S.A. (2016): Estudios geológicos, petrográficos, geoquímicos y geotécnicos en las rocas de construcción del centro histórico de Santiago de Querétaro y su comportamiento al intemperismo. – México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Tesis de Maestría, 137 pp.
- Möller, M., Buntebarth, G. & Weller, A. (2018): Expansion and shrinkage of sandstones during spontaneous imbibition of fluids. – *Environmental Earth Sciences*, 77 (16), A571.
- Montaño-Perches, R.Á. (2003): Monte Albán. Su desarrollo sociocultural desde las primeras manifestaciones culturales a su consolidación política (8000 a. C.-250 d. C.). – *Estudios Mesoamericanos*, 5 (1), 22-46.
- Mora-Navarro, G. (2015): Estudio de los mecanismos de alteración del Edificio B «Altar de Cráneos» zona arqueológica Templo Mayor, Ciudad de México. Implicaciones petrográficas, geoquímicas y mecánicas. – México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Tesis de Maestría, 163 pp.
- Morillas, H., Vazquez, P., Maguregui, M., Marcaida, I. & Silva, L.F.O. (2018): Composition and porosity study of original and restoration materials included in a coastal historical construction. – *Construction and Building Materials*, 178 (1), 384-392.
- Navarro-Santillán, D., Sour-Tovar, F. & Centeno-García, E. (2002): Lower Mississippian (Osagean) brachiopods from the Santiago Formation, Oaxaca, Mexico: stratigraphic and tectonic implications. – *Journal of South American Earth Sciences*, 15 (3), 327-336.
- Nichols, D.L., Covey, R.A. & Abdi, K. (2008): Rise of civilization and urbanism. – *in* Pearsall, D.M. (ed.): *Encyclopedia of archaeology*. – EUA, Elsevier/Academic Press, 1003-1015.
- O'Brien, M.J. & Lewarch, D.E. (1992): Regional analysis of the Zapotec empire, Valley of Oaxaca, Mexico. – *World Archaeology*, 23 (3), 264-282.
- O'Brien, M.J., Lewarch, D.E., Mason, R.D. & Neely, J.A. (1980): Functional analysis of water control features at Monte Alban, Oaxaca, Mexico. – *World Archaeology*, 2 (3), 342-355.
- Ordoñez, E. (1936): Principal physiographic provinces of Mexico. – *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 20 (10), 1277-1307.
- Orenday-Tapia, E.E., Pacheco-Martínez, J., Padilla-Ceniceros, R. & López-Doncel, R.A. (2018): In situ and nondestructive characterization of mechanical properties of heritage stone masonry. – *Environmental Earth Sciences*, 77 (7), A286.

- Ortega-Avilés, M., Tenorio-Castilleros, D., Segura-Venzor, I.L., Miranda-Hernández, J.G. & Velasco, M.A. (2020): An archaeometallurgical study of Mixtec silver gold alloy foils from Tomb No. 7, Monte Alban, Oaxaca, México. – *Materials Chemistry and Physics*, 242 (1), 10 pp.
- Ortega-Gutiérrez, F., Ruiz, J. & Centeno-García, E. (1995): Oaxaquia, a Proterozoic microcontinent accreted to North America during the late Paleozoic. – *Geology*, 23 (12), 1127-1130.
- Ortega-Obregon, C., Keppie, J.D., Solari, L.A., Ortega-Gutiérrez, F., Dostal, J., Lopez, R., Ortega-Rivera, A. & Lee, J.W.K. (2003): Geochronology and geochemistry of the ~917 Ma, calc-alkaline Etna granitoid pluton (Oaxaca, southern Mexico): evidence of post-Grenvillian subduction along the northern margin of Amazonia. – *International Geology Review*, 45 (7), 596-610.
- Ovando-Shelley, E., Ossa, A. & Santoyo, E. (2013): Effects of regional subsidence and earthquakes on architectural monuments in Mexico City. – *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65 (1), 157-167.
- Özşen, H., Bozdağ, A. & İnce, İ. (2017): Effect of salt crystallization on weathering of pyroclastic rocks from Cappadocia, Turkey. – *Arabian Journal of Geosciences*, 10 (12), A258.
- Padilla-Ceniceros, R., Pacheco-Martínez, J., López-Doncel, R.A. & Orenday-Tapia, E.E. (2017): Rock deterioration in the masonry walls of the Cathedral Basilica of Aguascalientes, Mexico. – *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34 (2), 138-149.
- Pantoja-Alor, J. & Robison, R.A. (1967): Paleozoic sedimentary rocks in Oaxaca, Mexico. – *Science*, 157 (9), 1033-1035.
- Patchett, P.J. & Ruiz, J. (1987): Nd isotopic ages of crust formation and metamorphism in the Precambrian of eastern and southern Mexico. – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 96 (4), 523-528.
- Peeler, D.E. & Winter, M. (1995): Building J at Monte Alban: a correction and reassessment of the astronomical hypothesis. – *Latin American Antiquity*, 6 (4), 362-369.
- Phillipson, M.C., Baker, P.H., Davies, M., Ye, Z., McNaughtan, A., Galbraith, G.H. & McLean, R.C. (2007): Moisture measurement in building materials: an overview of current methods and new approaches. – *Building Services Engineering Research and Technology*, 28 (4), 303-316.
- Pötzl, C. (2015): Las Casas Tapadas de Plazuelas – Bauschäden, Verwitterungscharakteristik und gesteintechnische Eigenschaften von Tuffsteinen in Guanajuato, Mexiko. – *Alemania, Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Geowissenschaften und Geographie, Tesis de Maestría*, 169 pp.

- Pötzl, C., Siegesmund, S., Dohrmann, R., Koning, J.M. & Wedekind, W. (2018): Deterioration of volcanic tuff rocks from Armenia: constraints on salt crystallization and hydric expansion. – *Environmental Earth Sciences*, 77 (19), A660.
- Přikryl, R. (2013): Durability assessment of natural stone. – *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 46 (4), 377-390.
- Přikryl, R. (2017): Constructional geomaterials: versatile earth resources in the service of humankind— introduction to the thematic set of papers on: challenges to supply and quality of geomaterials used in construction. – *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76 (1), 1-9.
- Quiroz-Barroso, S.A. & Perrilliat, M.C. (1997): Pennsylvanian nuculoids (*Bivalvia*) from the Ixtaltepec Formation, Oaxaca, Mexico. – *Journal of Paleontology*, 71 (3), 400-407.
- Quiroz-Barroso, S.A. & Perrilliat, M.C. (1998): Pennsylvanian bivalves from the Ixtaltepec Formation, Mexico. – *Journal of Paleontology*, 72 (6), 1011-1024.
- Reading, H.G. & Richards, M. (1994): Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system. – *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 78 (5), 792-822.
- Redmond, E.M. & Spencer, C.S. (2008): Rituals of sanctification and the development of standardized temples in Oaxaca, Mexico. – *Cambridge Archaeological Journal*, 18 (2), 239-266.
- Redmond, E.M. & Spencer, C.S. (2012): Chiefdoms at the threshold: the competitive origins of the primary state. – *Journal of Anthropological Archaeology*, 31 (1), 22-37.
- Robison, R.A. & Pantoja-Alor, J. (1968): Tremadocian trilobites from the Nochixtlán region, Oaxaca, Mexico. – *Journal of Paleontology*, 42 (3), 767-800.
- Robles-García, N.M. (2009): Evaluación preliminar en las zonas arqueológicas. – *en* Robles-García, N.M. (ed.): *Los monumentos arqueológicos de Monte Albán ante los desastres naturales: el sismo de 1999*. – México, Instituto Nacional de Antropología e Historia, 17-21.
- Robles-García, N.M., Bautista, J. & Juárez, A. (2009): Historia de las intervenciones de restauración. – *en* Robles-García, N.M. (ed.): *Los monumentos arqueológicos de Monte Albán ante los desastres naturales: el sismo de 1999*. – México, Instituto Nacional de Antropología e Historia, 45-54.
- Robles-García, N. & Corbett, J. (2018): From archaeological site to world heritage site: the emergence of social management at Monte Alban, Mexico. – *in* Makuva, S. (ed.): *Aspects of management planning for cultural world heritage sites: principles, approaches and practices*. – Suiza, Springer, 39-48.

- Robles-García, N.M. & Landa-Alarcón, O.L. (2009): Estrategias de prevención de riesgos. – en Robles-García, N.M. (ed.): Los monumentos arqueológicos de Monte Albán ante los desastres naturales: el sismo de 1999. – México, Instituto Nacional de Antropología e Historia, 351-366.
- Ruedrich, J., Bartelsen, T., Dohrmann, R. & Siegesmund, S (2011): Moisture expansion as a deterioration factor for sandstone used in buildings. – *Environmental Earth Sciences*, 63 (7-8), 1545-1564.
- Sánchez-Rojas, L.E., Aranda-Osorio, J.N., Zárate-López, J. & Castro-Rodríguez, M.G. (2000): Carta geológica-minera Zaachila E14-12. – México, Servicio Geológico Mexicano, Mapa, escala 1:250,000.
- Santamaría-Díaz, A., Alaniz-Álvarez, S.A. & Nieto-Samaniego, Á.F. (2008): Deformaciones cenozoicas en la cobertura de la falla Caltepec en la región de Tamazulapam, sur de México. – *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25 (3), 494-516.
- Scott, J.F. (1978): The Danzantes of Monte Alban. Part I: text. – *Studies in Pre-Columbian Art and Archaeology*, 19 (1), 1-79.
- Shanmugam, G. (2012): New perspectives on deep-water sandstones. Origin, recognition, initiation and reservoir quality. – Reino Unido, Elsevier, 488 pp.
- Sherman, R.J., Balkansky, A.K., Spencer, C.S. & Nicholls, B.D. (2010): Expansionary dynamics of the nascent Monte Albán state. – *Journal of Anthropological Archaeology*, 29 (3), 278-301.
- Sherman, R.J., Minc, L.D., Elson, C., Redmond, E.M. & Spencer, C.S. (2019): Ceramic exchange and the shifting political landscape in the Valley of Oaxaca, Mexico, 700 BCE-200 CE. – *Journal of Anthropological Archaeology*, 56 (1), 21 pp.
- Siedel, H. & Siegesmund, S. (2014): Characterization of stone deterioration on buildings. – in Siegesmund, S. & Snethlage, R. (eds.): *Stone in architecture: properties, durability*. – Alemania, Springer, 349-414.
- Siegesmund, S. & Dürrast, H. (2014): Physical and mechanical properties of rocks. – in Siegesmund, S. & Snethlage, R. (eds.): *Stone in architecture: properties, durability*. – Alemania, Springer, 97-224.
- Siegesmund, S. & Török, Á. (2014): Building stones. – in Siegesmund, S. & Snethlage, R. (eds.): *Stone in architecture: properties, durability*. – Alemania, Springer, 11-95.
- Siegesmund, S., Weiss, T. & Vollbrecht, A. (2002): Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies: introduction. – in Siegesmund, S., Weiss, T. & Vollbrecht, A. (eds.): *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*. – Reino Unido, Geological Society of London, Special Publication 205, 1-7.

- Singh, S.K., Ordaz, M., Alcántara, L., Shapiro, N., Kostoglodov, V., Pacheco, J.F., Alcocer, S., Gutiérrez, C., Quaas, R., Mikumo, T. & Ovando, E. (2000): The Oaxaca earthquake of 30 September 1999 ($M_w = 7.5$): a normal-faulting event in the subducted Cocos Plate. – *Seismological Research Letters*, 71 (1), 67-78.
- Snethlage, R. (2014a): Natural stones in architecture: introduction. – *in* Siegesmund, S. & Snethlage, R. (eds.): *Stone in architecture: properties, durability*. – Alemania, Springer, 1-9.
- Snethlage, R. (2014b): Stone conservation. – *in* Siegesmund, S. & Snethlage, R. (eds.): *Stone in architecture: properties, durability*. – Alemania, Springer, 415-550.
- Solari, L.A., Keppie, J.D., Ortega-Gutiérrez, F., Cameron, K.L., López, R. & Hames, W.E. (2003): 990 and 1100 Ma Grenvillian tectonothermal events in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: roots of an orogen. – *Tectonophysics*, 365 (1-4), 257-282.
- Spencer, C.S. (2019): Cultural macroevolution and social change. – *in* Prentiss, A.M. (ed.): *Handbook of evolutionary research in archaeology*. – Suiza, Springer, 183-213.
- Spencer, C.S. & Redmond, E.M. (2001): Multilevel selection and political evolution in the Valley of Oaxaca, 500-100 B.C. – *Journal of Anthropological Archaeology*, 20 (2), 195-229.
- Spencer, C.S. & Redmond, E.M. (2004): Primary state formation in Mesoamerica. – *Annual Review of Anthropology*, 33 (1), 173-199.
- Spencer, C.S., Redmond, E.M. & Elson, C.M. (2008): Ceramic microtypology and the territorial expansion of the early Monte Alban state in Oaxaca, Mexico. – *Journal of Field Archaeology*, 33 (3), 321-341.
- Steiger, M., Charola, A.E. & Sterflinger, K. (2014): Weathering and deterioration. – *in* Siegesmund, S. & Snethlage, R. (eds.): *Stone in architecture: properties, durability*. – Alemania, Springer, 225-316.
- Stück, H., Plagge, R. & Siegesmund, S. (2013): Numerical modeling of moisture transport in sandstone: the influence of pore space, fabric and clay content. – *Environmental Earth Sciences*, 69 (4), 1161-1187.
- Sun, Q. & Zhang, Y. (2019): Combined effects of salt, cyclic wetting and drying cycles on the physical and mechanical properties of sandstone. – *Engineering Geology*, 248 (1), 70-79.
- Theodoridou, M. & Török, Á. (2019): In situ investigation of stone heritage sites for conservation purposes: a case study of the Székesfehérvár Ruin Garden in Hungary. – *Progress in Earth and Planetary Science*, 6 (1), A15.
- Turkington, A.V. & Paradise, T.R. (2005): Sandstone weathering: a century of research and innovation. – *Geomorphology*, 67 (1), 229-253.

- Urrutia-Fucugauchi, J. & Ferrusquía-Villafranca, I. (2001): Paleomagnetic results for the Middle-Miocene continental Suchilquitongo Formation, Valley of Oaxaca, southeastern Mexico. – *Geofísica Internacional*, 40 (3), 191-205.
- Wedekind, W., Gross, C.J., Hoffmann, A. & Siegesmund, S. (2018): Damage phenomenon and petrophysical properties of sandstones at the Phnom Bakheng Temple (Angkor, Cambodia): first investigations and possible conservation measures. – *Environmental Earth Sciences*, 77 (21), A735.
- Wedekind, W., López-Doncel, R.A., Dohrmann, R., Kocher, M. & Siegesmund, S. (2013): Weathering of volcanic tuff rocks caused by moisture expansion. – *Environmental Earth Sciences*, 69 (4), 1203-1224.
- Wedekind, W., Ruedrich, J. & Siegesmund, S. (2011): Natural building stones of Mexico–Tenochtitlán: their use, weathering and rock properties at the Templo Mayor, Palace Heras Soto and the Metropolitan Cathedral. – *Environmental Earth Sciences*, 63 (7-8), 1787-1798.
- Weltje, G.J. (2002): Quantitative analysis of detrital modes: statistically rigorous confidence regions in ternary diagrams and their use in sedimentary petrology. – *Earth-Science Reviews*, 57 (3-4), 211-253.
- Williams, H. & Heizer, R.F. (1965): Geological notes on the ruins of Mitla and other Oaxacan sites, Mexico. – *Contributions of the University of California Archaeological Research Facility*, 1 (1), 40-54.
- Winter, M. (2001): Palacios, templos y 1.300 años de vida urbana en Monte Albán. – *en* Ciudad-Ruiz, A., Iglesias-Ponce de León, M.J. & Martínez-Martínez, M.C. (eds.): *Reconstruyendo la ciudad maya: el urbanismo en las sociedades antiguas*. – España, Sociedad Española de Estudios Mayas, 277-301.
- Winter, M. (2006): La fundación de Monte Albán y los orígenes del urbanismo temprano en los Altos de Oaxaca. – *en* Iglesias-Ponce de León, M.J., Valencia-Rivera, R. & Ciudad-Ruiz, A. (eds.): *Nuevas ciudades, nuevas patrias. Fundación y relocalización de ciudades en Mesoamérica y el Mediterráneo antiguo*. – España, Sociedad Española de Estudios Mayas, 209-239.
- Winter, M. (2011): Social memory and the origins of Monte Alban. – *Ancient Mesoamerica*, 22 (2), 393-409.
- World Heritage Committee (2013): Convention concerning the protection of the world cultural and natural heritage. – Francia, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Reporte técnico, 302 pp.