

**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Posgrado en Geología Aplicada**



**“Evaluación geológica-geoquímica de las rocas del edificio D y de los  
morteros de la zona arqueológica de Monte Albán, Oaxaca,  
implicaciones a su intemperismo y deterioro”**

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

Presenta:

**Ing. Karen Viridiana Rocha Reina**

Becaria CONACYT (CVU: 1075545)

Asesor:

**Dr. Rubén Alfonso López Doncel**

San Luis Potosí, S.L.P.

Septiembre, 2022





19 de mayo de 2022

**ING. KAREN VIRIDIANA ROCHA REINA  
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 19 de mayo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**“Evaluación geológica-geoquímica de las rocas del edificio D y de los morteros de la zona arqueológica de Monte Albán, Oaxaca, implicaciones a su intemperismo y deterioro”**

- Introducción.
1. Generalidades
  2. Marco histórico y geológico de Monte Albán
  3. Las propiedades petrofísicas de las rocas y su implicación en el intemperismo y deterioro
  4. Evaluación geológica de las rocas del edificio D en la zona arqueológica de Monte Albán
  5. Evaluación geoquímica y física de los morteros de la zona arqueológica de Monte Albán
  6. Discusión
- Conclusiones  
Referencias  
Anexos

**“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”**

**A T E N T A M E N T E**

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN**

**DIRECTOR**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCION

[www.uaslp.mx](http://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

**“Rumbo al centenario de la autonomía universitaria”**

## **Agradecimientos**

A mis padres Francisco Rocha y Aracely Reina, por su apoyo a lo largo de este proyecto, por su confianza, buenos consejos y por motivarme día a día a seguir creciendo como persona.

Agradezco a mi director de tesis el Dr. Rubén Alfonso López Doncel, por seguir apoyándome a lo largo de mi carrera profesional, por su confianza y sus recomendaciones y por brindarme cada uno de sus grandes conocimientos. Muchas gracias.

A mi hermano Francisco y a mis hermanas Cynthia y Nancy, por sus buenos consejos y su apoyo que siempre me brindaron durante mi maestría.

A Carlos por su apoyo y motivación durante la realización de este proyecto. A mi buena amiga Gabriela y a mi amigo Oswaldo, por siempre estar y por su apoyo en todo momento. También a mis buenos amigos Omar, Daniel, Dora y Olivia.

A los buenos amigos que realice durante la maestría Karlita y Geovanni, gracias por su amistad y sus motivaciones, por hacer de la maestría una etapa muy divertida. Además un agradecimiento a mis compañeros de maestría Mariana, Felipe, Helios, Juan Pablo y Victor.

A mis sinodales el M.C. Marco Rojas Beltrán, el Dr. Alfredo Aguillón Robles y el Dr. Damiano Sarocchi por sus consejos, aportaciones y recomendaciones para lograr realizar este trabajo y de igual manera al Dr. Rafael Barboza Gudiño.

Agradezco al Dr. David Andrade, director de la zona arqueológica de Monte Albán, por recibirme y permitirme trabajar en la zona. Así como también un agradecimiento a el personal de Monte Albán por brindarme todas las herramientas para poder trabajar durante mi estancia y a la delegación INAH Oaxaca.

A la Arqlga. Claudia Jiménez y el Arqlgo. Jesus Medina, por recibirme en la ciudad de Oaxaca y por brindarme sus conocimientos en el mundo de la arqueología.

Al ingeniero Erasmo Mata, por su ayuda en la elaboración de láminas delgadas en el Instituto de Geología de la UASLP.

Al Lic. Miguel Angel Cortina, por su ayuda en la elaboración de los análisis geoquímicos en el laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la UASLP.

Al Dr. Nahúm Medellín por su apoyo en el uso del equipo FT-IR y la realización de dichos análisis.

A la MC. Wendy Puente, por ayudarme con la realización de uno de mis experimentos con la prensa hidráulica en el Instituto de Geología de la UASLP.

A cada uno de los profesores del posgrado y el personal del Instituto de Geología.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por proporcionarme la beca durante la maestría.



# INDICE

Lista de figuras .....	IV
Lista de tablas .....	VIII
Resumen .....	IX
Abstract .....	X
INTRODUCCIÓN .....	1
1. GENERALIDADES .....	4
1.1. Justificación.....	4
1.2. Hipótesis.....	4
1.3. Objetivo general .....	5
1.4. Objetivos particulares .....	5
1.5. Localización del área de estudio.....	5
1.6. Clima.....	5
1.7. Metodología.....	6
1.7.1. Gabinete inicial .....	7
1.7.2. Etapa de campo .....	7
1.7.3. Etapa de laboratorio .....	8
1.7.4. Etapa de gabinete final .....	11
2. MARCO HISTÓRICO Y GEOLÓGICO DE MONTE ALBÁN .....	12
2.1. Historia arquitectónica de Monte Albán.....	12
2.1.1. Origen y Fundación de Monte Albán.....	12
2.1.2. Plataforma Norte .....	14
2.1.3. Sistemas constructivos de Monte Albán .....	15
2.2. Geología regional de Oaxaca.....	16
2.3. Geología local.....	17

3. LAS PROPIEDADES PETROFÍSICAS DE LAS ROCAS Y SU IMPLICACIÓN EN EL INTEMPERISMO Y DETERIORO .....	19
3.1. Propiedades petrofísicas .....	19
3.1.1. Densidad y porosidad .....	19
3.1.2. Absorción de agua capilar .....	20
3.1.3. Expansión hídrica .....	20
3.1.4. Expansión térmica .....	21
3.1.5. Resistencia a la compresión uniaxial .....	21
3.1.6. Cristalización de sales .....	22
3.2. Implicaciones del intemperismo y deterioro .....	22
3.2.1. Deterioro por procesos mecánicos .....	22
3.2.2. Deterioro causado por la expansión hídrica e hígrica .....	23
3.2.3. Deterioro causado por ciclos termales .....	24
3.2.4. Deterioro por cristalización de sales .....	25
3.2.5. Deterioro causado por procesos químicos.....	25
4. EVALUACIÓN GEOLÓGICA DE LAS ROCAS DEL EDIFICIO D EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE MONTE ALBÁN.....	27
4.1. Registro litológico y de intensidad de daños del edificio D.....	28
4.1.1. Fachada Sur .....	32
4.1.2. Fachada este .....	37
4.1.3. Fachada norte .....	42
4.1.4. Fachada oeste .....	48
4.2. Petrografía.....	53
4.3. Mediciones <i>in situ</i> : humedad-temperatura .....	60
4.4. Pruebas petrofísicas .....	62
4.4.1. Densidad y porosidad .....	62

4.4.2.	Absorción de agua por capilaridad.....	63
4.4.3.	Resistencia a la compresión uniaxial .....	65
5.	EVALUACIÓN GEOQUÍMICA Y FÍSICA DE LOS MORTEROS DE LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE MONTE ALBÁN.....	66
5.1.	Resultados de la caracterización geoquímica con Fluorescencia de rayos X (LFRX) (cuantitativo por elementos mayores).....	67
5.2.	Resultados del análisis geoquímico ICP-MS.....	70
5.3.	Resultados de difracción de rayos X (DRX).....	72
5.4.	Análisis granulométrico y conteo de componentes .....	77
5.5.	Espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR) .....	85
6.	DISCUSIÓN .....	90
6.1.	Registro litológico y de intensidad de daños de las rocas del edificio D.....	90
6.2.	Propiedades petrofísicas de las rocas de Monte Albán.....	94
6.3.	Evaluación geoquímica y física de los morteros de Monte Albán .....	97
	CONCLUSIONES .....	101
	REFERENCIAS .....	105
	ANEXOS.....	112
	Anexo 1 .....	112
	Anexo 2 .....	113

## Lista de figuras

Figura 1. Localización del área de estudio correspondiente al edificio D y del edificio VG .....	2
Figura 2. Vista sureste del inmueble estudiado, correspondiente al edificio D .....	3
Figura 3. Vista oeste del edificio VG, correspondiente al edificio seleccionado para la recolección de morteros históricos (VG).....	3
Figura 4. Mapa de localización de la zona arqueológica de Monte Albán .....	6
Figura 5. Desglose de la metodología desarrollada en el presente trabajo. ....	7
Figura 6. Vista suroeste desde la Plataforma Norte y ubicación de los inmuebles de estudio en el Sistema Vértice Geodésico .....	15
Figura 7. Mapa geológico del área que rodea la zona arqueológica de Monte Albán. ....	18
Figura 8. Fotografía correspondiente a parte de la fachada este del edificio D en Monte Albán, .	23
Figura 9. Desintegración granular presentada en una de las rocas que forman parte del edificio D en la zona arqueológica de Monte Alban.....	24
Figura 10. Roca perteneciente al edificio D altamente dañada, presentando delaminación .....	25
Figura 11. Parte de la fachada oeste del edificio D en la zona arqueológica de Monte Albán, en donde se puede observar las costras negras. ....	26
Figura 12. Esquema de las fachadas que conforman el edificio D. ....	27
Figura 13. Muestras macroscópicas de las areniscas . ....	28
Figura 14. Muestras macroscópicas de conglomerados. ....	29
Figura 15. Fotografías donde se pueden observar algunos de los daños que fueron identificados en las diferentes fachadas del edificio D.. ....	31
Figura 16. Fachada Sur del edificio D, en la zona arqueológica de Monte Albán.....	33
Figura 17. Registro litológico de la escalinata, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D.	35
Figura 18. Registro de intensidad de daños de la escalinata, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D.....	36
Figura 19. Fachada Este del edificio D, en la zona arqueológica de Monte Albán. ....	37
Figura 20. Registro litológico del lado sur de la fachada Este en el Edificio D. ....	38
Figura 21. Registro litológico del lado norte de la fachada Este del Edificio D.....	39
Figura 22. Registro de intensidad de daños del lado sur, correspondiente a la fachada este del Edificio D.....	40

Figura 23. Registro de intensidad de daños del lado norte, correspondiente a la Fachada Este del Edificio D.....	43
Figura 25. Registro litológico del lado oeste de la fachada Norte del Edificio D.....	44
Figura 26. Registro litológico del lado oeste de la fachada Norte del Edificio D.....	45
Figura 27. Registro de intensidad de daños del lado este, correspondiente a la Fachada Norte del Edificio D.....	46
Figura 28. Registro de intensidad de daños del lado oeste, correspondiente a la Fachada Norte del Edificio D.....	47
Figura 29. Fachada Oeste del edificio D, en la zona arqueológica de Monte Albán. ....	48
Figura 30. Registro litológico del lado sur de la fachada oeste del Edificio D.....	49
Figura 31. Registro litológico del lado sur de la fachada oeste del Edificio D.....	50
Figura 32. Registro de intensidad de daños del lado norte, correspondiente a la fachada oeste del Edificio D.....	51
Figura 33. Registro de intensidad de daños del lado norte, correspondiente a la fachada oeste del Edificio D.....	52
Figura 34. Microfotografía correspondiente a la arenisca de grano fino .....	55
Figura 35. Microfotografía correspondiente a la arenisca de grano medio .....	56
Figura 36. Microfotografía correspondiente a la arenisca de grano grueso.....	57
Figura 37. Microfotografía correspondiente al conglomerado de grano fino e .....	58
Figura 38. Microfotografías correspondientes al conglomerado de grano medio.....	59
Figura 39. Microfotografías correspondientes al conglomerado de grano grueso c .....	60
Figura 40. Gráficos correspondientes a los valores obtenidos de humedad-temperatura en cada una de las fachadas, divididas en dos de las etapas en las cuales fueron medidos.....	61
Figura 41. Grafica de porosidad vs densidad aparente correspondiente a muestras de areniscas y conglomerados. ....	63
Figura 42. Valores de la prueba de absorción capilar en areniscas y conglomerados. ....	64
Figura 43. Valores obtenidos de la prueba de UCS en Mpa. ....	65
Figura 44. Recolección de muestras de morteros originales tomadas de la fachada sur en el edificio VG.....	66
Figura 45. Gráfica de geoquímica de elementos mayores vs CaO.....	69

Figura 46. Diagrama de multielementos normalizados a MMA en muestras de morteros actuales .....	70
Figura 47. Difractogramas correspondientes a los morteros históricos: a) SP4P3 y b) SP4P2 .....	73
Figura 48. Difractogramas correspondientes a los morteros históricos: a) SP4PJ, b) SP4BP2, c) SRPL y d) SP4P2-S .....	74
Figura 49. Difractogramas correspondientes a los morteros históricos: a) SP4BP3, b) J3, c) NT4 y d) F1. ....	75
Figura 50. Difractogramas correspondientes a los morteros de restauración: AC1, ACS3, AJG Y CAG1 .....	76
Figura 51. Gráficos de distribución de tamaño de grano, correspondientes a las muestras de mortero histórico.....	79
Figura 52. Gráficos de distribución de tamaño de grano, correspondientes a las muestras de mortero de restauración. ....	80
Figura 53 . Resultados del análisis de conteo de componentes correspondientes a los morteros históricos: SP4P3 Y SP4P2.....	82
Figura 54. Resultados del análisis de conteo de componentes correspondientes a los morteros históricos: SP4J, SP4BP2, SRPL, SP4P2-S, SP4BP3 Y NT4. ....	83
Figura 55. Resultados del análisis de conteo de componentes correspondientes a los morteros históricos: J3 Y F1. ....	84
Figura 56. Resultados del análisis de conteo de componentes correspondientes a los morteros de restauración: AC1, AJC, ACS3 Y CAG4.....	84
Figura 57. Espectros infrarrojos por FTIR correspondientes a los 10 morteros históricos estudiados en este trabajo. ....	87
Figura 58. Espectros infrarrojos por FTIR correspondientes a los 4 morteros de restauración estudiados en este trabajo.....	88
Figura 59. Gráfico correspondiente a los valores de densidad aparente y densidad de matriz con respecto a la porosidad.....	94
Figura 60. Gráfico correspondiente a los valores de absorción al vacío tanto de areniscas y conglomerados con respecto a la porosidad.....	95
Figura 61. Gráficas correspondientes a la capacidad de absorción por capilaridad con respecto a la porosidad.....	96

Figura 62. Graficas correspondientes a UCS (Mpa) con respecto a la porosidad.....	97
Figura 63. Registro litológico de la pared 1, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D ..	113
Figura 64. Registro de intensidad de daños de la pared 1, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D.....	114
Figura 65. Registro litológico de la pared 2, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D..	115
Figura 66. Registro de intensidad de daños de la pared 2, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D.....	116
Figura 67. Registro litológico de la pared 3, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D ..	117
Figura 68. Registro de intensidad de daños de la pared 3, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D.....	118
Figura 69. Registro litológico de la pared 4, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D. .	119
Figura 70. Registro de intensidad de daños de la pared 3, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D.....	120

## Lista de tablas

Tabla 1. Cronología de Monte Alban.....	13
Tabla 2. Clasificación de patrones de deterioro (tomado y traducido de ICOMOS-ISCS, 2008).	32
Tabla 3. Datos obtenidos de la prueba de porosidad-densidad mediante el método de Arquímedes .....	62
Tabla 4. Valores obtenidos de la prueba de absorción por capilaridad.....	64
Tabla 5. Clave de muestra de morteros históricos y de restauración, donde define su toma de muestra y los análisis que se le realizaron a cada uno .....	67
Tabla 6. Resultados de LFRX, % en peso de los óxidos.....	68
Tabla 7. Resultados del análisis ICP-MS, concentración mg/kg (ppm).....	71
Tabla 8. Descripción de los parámetros estadísticos (Folk y Ward, 1957; Chamley, 1989; tomada y modificada de García-Nava, 2020). .....	77
Tabla 9. Clasificación granulométrica propuesta por Blott y Pye (2012) (Tomada y modificada de García-Nava, 2020).....	77
Tabla 10. Parámetros estadísticos, obtenidos del análisis granulométrico. ....	78
Tabla 11. Clasificación de los componentes identificados en las muestras analizadas durante el conteo de componentes .....	81
Tabla 12. Resumen general correspondiente a la composición de los morteros históricos y de restauración .....	98



## Resumen

La zona arqueológica de Monte Albán, antigua Ciudad Zapoteca, se encuentra ubicada en la cima de una montaña entre los valles centrales de Oaxaca, aproximadamente a 8 km al poniente de dicha ciudad. A lo largo de su historia con la finalidad de proteger el patrimonio cultural, los edificios de la zona arqueológica han tenido que someterse a diversas intervenciones de reconstrucción, en donde, los materiales de construcción utilizados originalmente han sido recolocados o incluso remplazados por otros, debido al deterioro que se ha ido presentando a lo largo del tiempo y que es generado de acuerdo con las propiedades internas de las rocas e inevitablemente por diversos factores naturales y externos que afectan a todo el inmueble.

En ayuda a futuras restauraciones, en el presente trabajo se exponen los resultados de la caracterización de los materiales de construcción del edificio D de Monte Albán.

Mediante el registro litológico, de daños e intemperismo, en conjunto con algunos análisis petrofísicos y mediciones *in situ* realizadas en este trabajo, es posible comprender las propiedades internas de las rocas que rigen el comportamiento de estas ante diversos agentes intrínsecos y extrínsecos, así como evaluar los posibles factores que están afectando directamente a las rocas del edificio.

Adicionalmente y a petición del director de la zona arqueológica de Monte Albán, se llevó a cabo un análisis de los morteros históricos de Monte Albán, con el fin de caracterizarlos e identificar su composición original, así como también diferenciarlos de los que ahora utilizan como morteros de restauración, a través de diversos análisis geoquímicos como FLRX, ICP-MS, DRX y FTIR, así como otros métodos estadísticos como el análisis de componentes y granulométricos.

**Palabras clave:** materiales de construcción, evaluación litológica y de daños, análisis petrofísicos, mediciones *in situ*, morteros, composición original.

## **Abstract**

The archaeological site of Monte Alban, an ancient Zapotec city, is located on the top of a mountain in the central valleys of Oaxaca, approximately 8 km west of the city. Throughout its history, in order to protect the cultural heritage, the buildings of the archaeological zone have had to undergo various reconstruction interventions, where the construction materials originally used have been relocated or even replaced by others, due to the deterioration that has occurred over time and that is generated according to the internal properties of the rocks and inevitably by various natural and external factors that affect the entire property.

In support of future restorations, this paper presents the results of the characterization of the construction materials of building D of Monte Albán.

By means of the lithological, damage and weathering record, together with some petrophysical analyses and in situ measurements carried out in this work, it is possible to understand the internal properties of the rocks that govern their behavior before different intrinsic and extrinsic agents, and also to evaluate the possible factors that are directly affecting the rocks of the building.

Additionally and at the request of the director of the archaeological zone of Monte Alban, an analysis of the historic mortars of Monte Alban was carried out, in order to characterize them and identify their original composition, as well as to differentiate them from those now used as restoration mortars, through various geochemical analyses such as FLRX, ICP-MS, XRD and FTIR as well as other statistical methods such as component and granulometric analysis.

**Keywords:** construction materials, rocks, lithological and damage assessment, petrophysical analysis, in situ measurements, mortars, original composition.

## INTRODUCCIÓN

Hace aproximadamente 2500 años, los zapotecos fundaron un asentamiento nuevo encima de un conjunto de cerros donde se unen las tres cuencas que forman el Valle de Oaxaca. Esta comunidad, ahora declarada como patrimonio cultural de la humanidad desde 1987 por la UNESCO, es conocida como Monte Albán, surgió como centro ceremonial en el año 500 a.C. y funcionó como capital hasta el año 850-900 d.C. (Winter *et al.*, 2006).

Monte Albán se encuentra ubicado fisiográficamente dentro de la Sierra Madre del Sur, caracterizado por una extensa planicie irregular rodeada de montañas y es una zona de alta actividad sísmica (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1992 y Ferrusquia-Villafranco, 1993). Su geología consta de un basamento de rocas metamórficas (principalmente gneis) que se extienden sobre el cerro Monte Albán, cuyas edades se remontan al Precámbrico, conocidas como Complejo Oaxaqueño y otras cuyo origen se ubica en el Cretácico inferior correspondientes a rocas sedimentarias en el resto del área (Martínez y Ojeda, 2004), así como también rocas volcánicas del Mioceno.

Oaxaca tiene una larga historia de arquitectura, debido a la riqueza cultural y al estilo especial de la arquitectura, muchos edificios de este estado son de gran valor histórico y merecen ser protegidos y preservados (Kück, 2019). Según Martínez y Ojeda (2004) la mayor parte de las rocas utilizadas como rocas de mampostería corresponden a rocas areniscas del Cretácico que fueron extraídas de las laderas circundantes por su gran disponibilidad, así como también se utilizaron en menor cantidad tobas volcánicas.

El presente trabajo está centrado en el estudio de los materiales constructivos del edificio D (Figuras 1 y 2) y el estudio de los morteros históricos de la zona arqueológica de Monte Albán los cuales fueron recolectados del edificio VG (Figuras 1 y 3) y algunos más de los utilizados para restauración de los inmuebles; esto con el fin de identificar las rocas utilizadas en la construcción del inmueble, caracterizarlas mediante métodos experimentales y conocer las causas de su intemperismo y deterioro, además de analizar los morteros que fueron utilizados originalmente para unir dichas rocas y obtener su composición original, para así después describir los daños causados en los inmuebles y poder relacionarlos con los factores físicos y ambientales de la zona que pueden provocarlos, además de obtener y brindar la mayor cantidad de datos de las rocas que ayuden en los trabajos de restauración y conservación del lugar.



la evaluación del deterioro mediante métodos petrofísicos de las rocas en edificios importantes de la zona arqueológica de Monte Albán.



*Figura 2. Vista sureste del inmueble estudiado, correspondiente al edificio D del conjunto Vértice Geodésico en la zona arqueológica de Monte Albán*



*Figura 3. Vista oeste del edificio VG, correspondiente al edificio seleccionado para la recolección de morteros históricos (VG) del conjunto Vértice Geodésico en la zona arqueológica de Monte Albán.*

# **1. GENERALIDADES**

## **1.1. Justificación**

A lo largo de la historia, la arqueología se ha visto en la necesidad de unir esfuerzos con especialistas en geociencias, como lo son los geólogos, quienes se encargan de profundizar el estudio y procesamiento de las materias primas empleadas en la construcción, con la finalidad de llevar a cabo procesos de restauración de buena calidad e identificar rocas similares que han sido utilizadas por los edificadores iniciales, para la preservación del patrimonio de los bienes culturales.

La falta de interés o conocimiento de las propiedades en los materiales constructivos ha provocado el mal uso de estos en importantes sitios arqueológicos como lo es Monte Albán, ya que no se siguen los procesos necesarios al realizar un trabajo de restauración y/o para poder reemplazar o restaurar el material de construcción, por lo que en muchas ocasiones el inmueble termina siendo más afectado.

Por petición del director de la zona arqueológica de Monte Albán, quién sugirió estudiar el edificio D junto con los morteros que unen las rocas de los edificios históricos, se tomó como zona de estudio dicho inmueble, ya que es necesario aplicar métodos geológicos para la caracterización de las propiedades de rocas naturales de construcción, así como también analizar el entorno ambiental y antropogénico que afecta la naturaleza y calidad de estas, con el fin de definir los factores causantes de su deterioro y poder brindar la mayor información posible para trabajos futuros de restauración.

## **1.2. Hipótesis**

Los edificios de Monte Albán se han tenido que someter a diversas restauraciones, por lo que las rocas colocadas originalmente se han reposicionado incluso de un edificio a otro (Robles-García *et al.*, 2009), lo que ha provocado cambios en el arreglo geométrico de cada una de las caras de dichos edificios y en consecuencia se podrían originar diferentes niveles de intemperismo, por lo que se tiene que comprobar si dicho acomodo tiene una relación directa con el grado de alteración y si el intemperismo ha afectado en mayor medida una vez que los bloques fueron colocados de diferente manera a como se tenían originalmente.

Además, se tiene la hipótesis de que los diferentes tipos de morteros que se han ido utilizando durante las restauraciones son muy distintos a los originales, ya que no se tiene documentada la



composición exacta de estos, por lo que se tiene que comprobar este cambio de material en el mortero inicial y el material que se ha ido utilizando y también si habrá sido el causante de gran parte de los daños estructurales que se presentan en el inmueble (Robles-García *et al.*, 2009).

### **1.3. Objetivo general**

Caracterizar las rocas utilizadas como materiales de construcción en los inmuebles ubicados dentro de la zona de estudio y conocer su comportamiento ante el deterioro o la resistencia mediante estudios geológicos, petrofísicos y geoquímicos; así como también conocer el origen y composición constituyente de los morteros que se han usado para unir dichas rocas, y verificar si influye de gran manera en los daños estructurales.

### **1.4. Objetivos particulares**

- Descripción y mapeo litológico de la roca presente en el edificio a estudiar.
- Identificación e interpretación del deterioro en las rocas presentes en la construcción.
- Analizar y diferenciar la composición y origen de los morteros que unen las rocas.
- Análisis facial y microfacial de las rocas estudiadas.
- Caracterización física, química y geológica de los materiales de construcción.
- Conocer las causas y los agentes de deterioro de las rocas de construcción.

### **1.5. Localización del área de estudio**

La zona arqueológica de Monte Albán se sitúa dentro del municipio de Oaxaca de Juárez; el área que abarca su polígono tiene una superficie irregular de 2078 ha, orientada de sureste a noroeste y se encuentra dentro de las coordenadas geográficas con Latitud N 17°02'47" y Longitud W 96°45'56", aproximadamente a 8 km al poniente de la ciudad de Oaxaca de Juárez y al centro del Valle de Oaxaca. Además, dentro de la zona se encuentra el edificio D, el cual se estará estudiando a lo largo del trabajo y se encuentra ubicado en la Plataforma Norte de la zona, con coordenadas geográficas de Latitud N 17°02'44" y Longitud W 96°45'56" (Figura 4).

### **1.6. Clima**

La región zapoteca es de clima semiárido, el año se divide en una temporada de secas (noviembre-abril) y una temporada de lluvias (mayo-octubre) recibiendo unos 500-700 mm de lluvia al año, casi todo en esta última temporada.

La temperatura media anual del estado es de 22°C, la temperatura máxima promedio es de 31°C se presenta en los meses de abril y mayo, la temperatura mínima promedio es de 12.5°C la cual se presenta en el mes de enero.

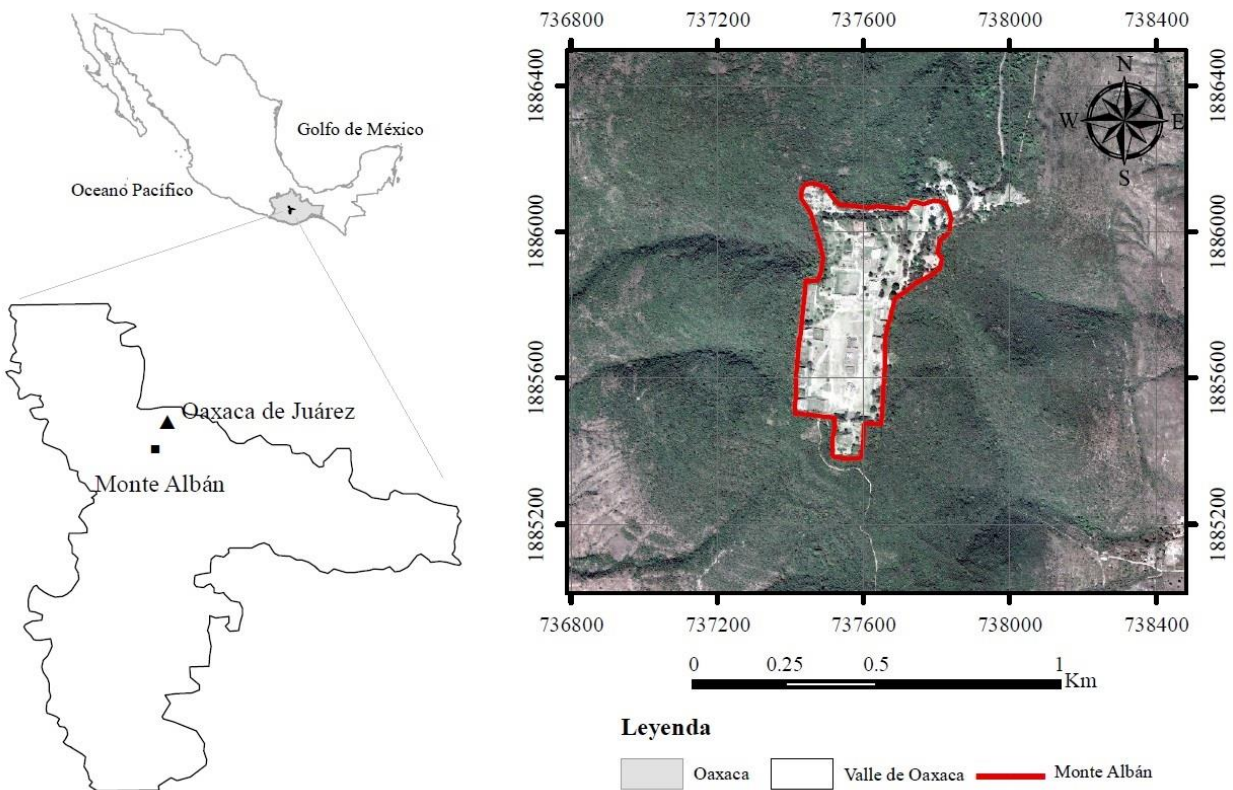


Figura 4. Mapa de localización de la zona arqueológica de Monte Albán

## 1.7. Metodología

En el presente capítulo se dará a conocer la metodología que se aplicó durante la realización del trabajo (Figura 5); se detallan cada una de las etapas que se siguieron durante el proceso de este escrito, así como también los pasos que se siguieron y experimentación que se realizó para cumplir cada uno de los objetivos marcados.



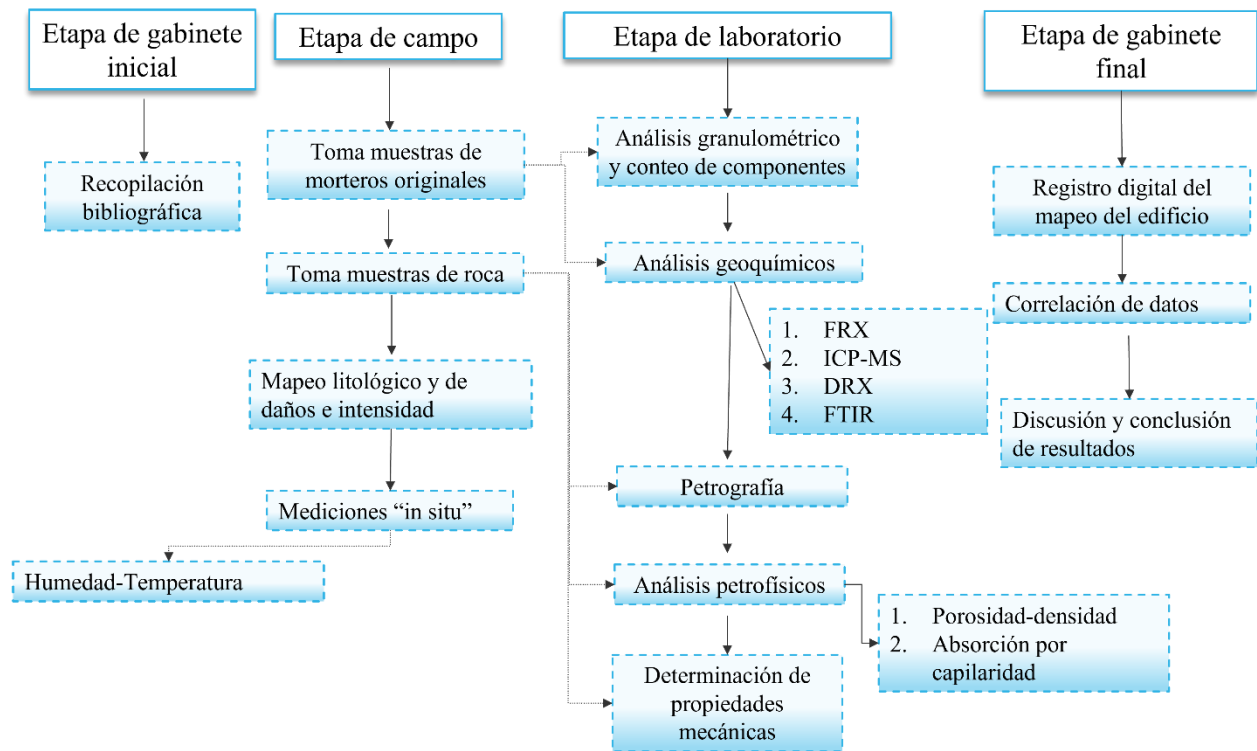


Figura 5. Desglose de la metodología desarrollada en el presente trabajo.

### 1.7.1. Gabinete inicial

El trabajo inició con la recopilación de información bibliográfica acerca de la historia y geología del lugar a estudiar, además de la metodología utilizada en trabajos previos.

### 1.7.2. Etapa de campo

Durante la etapa de campo se comenzó con la inspección de la zona de estudio con la finalidad de visualizar las condiciones del inmueble a estudiar (Edificio D), se realizó la toma de fotografías de cada una de las fachadas, se localizaron los afloramientos de roca utilizada para la construcción de los inmuebles y se hizo la recolección de muestras de roca y mortero de los edificios para los procesos de experimentación en laboratorio. Además, durante esta etapa fue necesario realizar ciertos procedimientos para la evaluación del edificio, los cuales se enlistan de la siguiente manera:

#### 1.7.2.1. Mapeo litológico y mapeo de daños e intensidad

Este proceso se realizó mediante la diferenciación de los tipos de roca presente, principalmente por su color y además se tomaron en cuenta rasgos propios de estas como lo son su tamaño de grano,

composición y presencia de clastos en cada una de ellas, se realiza una descripción megascópica de cada una de las rocas y se realiza el registro de colores en un esquema predeterminado.

Mientras que para el mapeo de daños e intensidad el reconocimiento se realizó tomando como base el glosario del “*International Council on Monuments and Sites-International Scientific Committee for Stone (ICOMOS-ISCS, 2011)*”, registrando cada cierto tipo de daño como pueden ser fracturas, deformación, deposición de materia, pérdida de material o decoloración; para después hacer su registro de igual manera en un esquema predeterminado con el que se ira evaluando la condición de alteración del edificio D.

#### 1.7.2.2. Mediciones “*in situ*”

Estas mediciones se realizaron con la finalidad de conocer las condiciones en que se encuentra la roca bajo las condiciones ambientales presentes en el lugar donde se ubica, deberán ser realizadas en cada una de las cuatro caras del edificio D en distintas rocas que serán seleccionadas de acuerdo con la diferente litología.

- a) Humedad-Temperatura, las cuales se realizaron con un medidor de humedad (*DURO, Bau & Holzfeuchte-messgerät*) el cual se coloca directamente sobre la roca para registrar su valor y una pistola térmica (*FLUKE, thermometer*) con la que se obtuvieron los valores de temperatura apuntando hacia ellas desde una distancia considerable. Las mediciones consistieron en la toma de los dos parámetros mencionados en tres distintas rocas de cada fachada (arenisca, conglomerado y caliza), en tres lapsos de tiempo durante el día.

#### 1.7.3. Etapa de laboratorio

En el presente trabajo la etapa de laboratorio se divide en dos apartados, enlistando primeramente los análisis y técnicas que fueron realizados para las rocas que forman parte del edificio como material de construcción (sección 1.7.3.1 y 1.7.3.2) y además los análisis que se realizaron para el estudio de los morteros que unen dichas rocas (sección 1.7.3.3 y 1.7.3.4).

##### 1.7.3.1. Secciones delgadas

Para la elaboración de láminas delgadas, las muestras se recortaron para extraer dos briquetas de aproximadamente 2.5 cm x 5 cm, la técnica de elaboración de lámina delgada elaboradas en el Instituto de Geología, es detallada por Jaime-Rodríguez (2018).

### 1.7.3.2. *Análisis petrofísicos*

Para los análisis petrofísicos fue necesario cortar cubos de roca con la sierra punto diamante, de  $6.5 \text{ cm}^3$ , así como también se elaboraron prismas rectangulares con una altura de 10 cm, todo esto para someterlas a las siguientes pruebas:

- a. Pruebas de porosidad-densidad, las cuales se llevaron a cabo mediante pesaje hidrostático aplicando el método de Arquímedes que mide el empuje que actúa sobre una muestra sumergida en agua, se hizo uso de una cámara de vacío para poder crear un vacío en las rocas y poder medirlas en condiciones saturadas y completamente sumergidas en agua.
- b. Absorción por capilaridad, se obtiene colocando la muestra de roca en una balanza con un sistema de sujeción, el cual permite que la roca tenga contacto con una superficie con agua para registrar la velocidad en que el ejemplar absorbe agua capilarmente.
- c. Determinación de propiedades mecánicas mediante técnicas de resistencia a la compresión, que se llevará a cabo utilizando una prensa hidráulica (*Digital rock strengthindex apparatus*), la cual crea una tensión longitudinal en la roca, que la acorta hasta lograr su falla o ruptura final y se realizará en el Instituto de Geología de la UASLP.

### 1.7.3.3. *Análisis geoquímicos.*

Para la realización de los siguientes análisis geoquímicos, fue necesario utilizar un pulverizador (*Retsch RS200*) para la elaboración de polvo de mortero que se sometió a las pruebas que se enlistan a continuación:

- a. Difracción de rayos X (DRX), para la caracterización cristalográfica de minerales, en la cual el mortero pulverizado se analizó en un difractómetro de rayos X para polvo (*Bruker D8 Advance*) y se realizó en el Instituto de Metalurgia de la UASLP.
- b. Fluorescencia de Rayos X (LRFX), la determinación de elementos mayores fue realizada en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía en el Instituto de Geología, UNAM, mediante el método de fluorescencia de rayos X en el que se empleó el uso de un espectrómetro secuencial de rayos X (*Rigaku Primus II*) equipado con tubo de rodio y ventana de berilio de 30 micras, utilizado para la determinación cuantitativa elementos mayores (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K y P) en muestras de rocas, minerales, sedimentos y suelos.

- c. Espectrometría de Masas (ICP-MS), análisis mediante el cual se pueden detectar o medir concentraciones de elementos en niveles muy bajos (ppt, ppb y ppm).

Para poder estudiar las muestras de mortero bajo ICP-MS, fue necesario realizar la preparación de estas mediante una digestión ácida, la cual consiste en digerir 0.1 g de muestra (depositada en un vial) en 0.5 ml de HNO<sub>3</sub> grado ULTREX, seguido de 4.5 ml de HF ULTREX, dejándola refluja a una temperatura de 100 °C alrededor de 8 horas para la disolver las muestras. Posteriormente se liberan los vapores producidos y una vez obtenida una especie de costra en el vial se añade 1 ml de HCL grado ULTREX para continuar de igual manera con el mismo proceso de refluja; después de que el proceso de evaporación haya finalizado, se añadió nuevamente 1 ml de HNO<sub>3</sub> y 1 ml agua destilada repitiendo una vez más el proceso de refluja, para finalmente proseguir con el aforo de las muestras registrando un peso total de 50 ml. Todo esto con el fin de poder someterlas al análisis en el equipo ICP-MS marca Thermo SCIENTIFIC modelo X SERIES 2, en el laboratorio de geoquímica del Instituto de Geología (LGIG) (Almaguer-Rodríguez, 2010).

- d. Espectroscopía infrarroja o Espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR); con el fin de identificar los materiales, así como conocer los compuestos orgánicos que conforman los morteros y su cuantificación, este análisis se basa en la interacción entre la radiación infrarroja aplicada y las moléculas de los compuestos; el cual que nos arroja un espectro mediante señales en forma de picos, que son producto de las interacciones moleculares (moléculas en vibración) que se generan absorbiendo la energía de un haz infrarrojo (Middendorf *et al.*, 2005; Silva-Cascante *et al.*, 2020).

Para esta técnica se utilizó un Espectrómetro *Thermo Scientific Nicolet iS 10* FT-IR en el cual se coloca la muestra entre la fuente de radiación infrarroja y un detector que registra los tiempos de absorción infrarroja como intensidad reducida y se pueden relacionar con tipos específicos de enlaces atómicos característicos en grupos funcionales de los compuestos, mediante el software *Thermo Scientific OMNIC*. Los espectros de FT-IR fueron medidos en un rango de 550-4000 cm<sup>-1</sup> con una resolución de 6 y 16 escaneos acumulativos utilizando la técnica de transmitancia.

#### 1.7.3.4. Análisis granulométrico y conteo de componentes

Mediante el análisis granulométrico, o también llamado análisis de distribución del tamaño de partículas, es posible determinar la distribución poblacional de tamaños de partículas que conforman una muestra de sedimentos, suelos u otro material (Blott y Pye, 2012). Para iniciar el proceso granulométrico fue necesario primeramente obtener el peso total (en seco) de la muestra, en una báscula con precisión (0.001 g) antes de ser tamizadas. El proceso consistió en un tamizado mecánico durante un tiempo aproximado de 7 min utilizando una maquina *Tyler RoTap*, en la que se realiza una separación granulométrica en intervalos de 1  $\phi$ , abarcando los tamaños del -4 a 4  $\phi$ . Posteriormente para el procesamiento de datos y generación de graficas se utilizó el software GRADISTAD 8.0 (Blott, 2010) el cual calcula los parámetros estadísticos de media ( $\bar{x}$ ), mediana ( $M_e$ ), moda (s), desviación estándar ( $\sigma$ ), asimetría (sk) y curtosis (k), calculados de manera aritmética y geoméricamente (micras) y logarítmicamente (usando la escala phi  $\phi$ ) (Krumbein y Pettijohn, 1938). Es decir, el programa proporciona datos de la distribución de tamaño de grano y muestra los porcentajes del grupo textural (grava, arena y limo).

En cuanto al análisis de componentes se empleó la técnica propuesta por Browne y Gardner (2004). Inicialmente el proceso comenzó con el lavado de partículas en agua destilada, colocando cada muestra (posterior a contar) en una tina ultrasónica dentro de vasos precipitados en una serie de 3 a 5 ciclos de 5 min, con la finalidad de eliminar impurezas y facilitar el reconocimiento de partículas. Se analizaron bajo microscopio aproximadamente 1200 partículas de los rangos de tamaño 0  $\phi$  hasta 3  $\phi$  (300 partículas contadas por cada rango  $\phi$ ) para cada una de las muestras que fueron sometidas al proceso granulométrico.

#### 1.7.4. Etapa de gabinete final

Finalmente, durante esta etapa se hará el registro digital en el software AutoCAD de cada mapeo realizado en campo y además se elaborarán mapas de localización en ArcMap, se recabará la información y los datos obtenidos de cada prueba, para así poder correlacionar las propiedades de la roca con los daños que pueden desarrollar las rocas estudiadas.

## **2. MARCO HISTÓRICO Y GEOLÓGICO DE MONTE ALBÁN**

### **2.1. Historia arquitectónica de Monte Albán**

En Oaxaca como en otras partes de Mesoamérica las sociedades aldeanas emergieron de manera relativamente sencilla y se distinguen de las demás por elementos tales como su arquitectura monumental, uso de escritura y estilos propios de cada región. En este apartado, con el fin de adentrarnos en la historia del sitio, se describirán las fases en las cuales fue conformándose Monte Albán (MA), así como la conformación de la Plataforma Norte lugar donde se ubica los edificios que se estudiaron en este trabajo (Edificio D y Edificio VG) y los sistemas de construcción se han utilizado a lo largo de la historia de este sitio.

#### **2.1.1. Origen y Fundación de Monte Albán**

Monte Albán es el sitio arqueológico más grande de Oaxaca y uno de los más impresionantes de México, fue fundada hace aproximadamente 500 años a.C. como un centro de poder y autoridad, llegó a ser la primera ciudad en la región montañosa del sur de México, edificando sus casas en terrazas situadas a 300 m por encima del valle (González-Licón, 2011; Winter 2006); algunos arqueólogos han propuesto modelos que explican la causa del origen de Monte Albán de acuerdo a diferentes perspectivas, de las cuales quizás el modelo más aceptado fue el propuesto por Winter (2006) quién propuso que la fundación se llevó a cabo por personas de las aldeas distribuidas por el centro del valle de Oaxaca para asegurar y defender territorio e imponer su dominio sobre el centro del valle.

La cronología del Valle de Oaxaca comienza desde la época cazadora recolectora en el periodo Formativo (1500-850 a.C.) dividida en tres fases según Flannery (Tierras Largas, San Jose de Mogote, fase Guadalupe y fase Rosario). MA fue inicialmente postulada por Alfonso Caso *et al.* (1967) en cinco fases que van de la I a la V y que a su vez están relacionados con los tres periodos de desarrollo mesoamericano, que son, el Formativo, Clásico y Posclásico y se describen a continuación:

Tabla 1. Cronología de Monte Alban

Periodo	Etapa	Fecha	Descripción
Formativo	Monte Albán I:	500-100 a.C.	El establecimiento de la ciudad comenzó con el acondicionamiento del cerro y la construcción de la Plaza Central. Durante este periodo se construyeron alrededor de 20 plataformas piramidales que fueron empleadas en diversas funciones administrativas (González-Licón, 2011; Caso, 1965), como lo es el Edificio L, el Montículo K, una estructura de la Plataforma Norte y el más importante de la época el Edificio de los Danzantes (Medina-Villalobos, 2015); se considera que estos edificios tienen una gran solidez en comparación con los periodos constructivos posteriores a este (Acosta, 1965).
	Monte Albán II	100 a.C.-200 d.C.	El desarrollo arquitectónico de esta época se define por la construcción de gran cantidad de estructuras públicas para el posterior desarrollo de un Estado (Paddock, 1996; Fahmel, 1994; Blanton <i>et al.</i> , 1999; Flannery y Marcus 2003; Joyce, 2004; Wiesheu, 2006; González Licón, 2011; Robles García, 2011). Se nivela la Gran Plaza se construyen muros defensivos y edificios su alrededor, para los cuales la roca madre fue aprovechada durante su construcción, como los son el Altar Central, Juego de Pelota, además de otros elementos que conformaron la Plataforma Norte y el Templo X (Acosta 1965; Medina-Villalobos, 2015).
Clásico	Monte Albán IIIA	200-400 d.C.	Fue el periodo de gran esplendor y auge económico en donde se adoptaron nuevos estilos arquitectónicos; los montículos presentan terrazas y alfardas, los templos dividen su entrada con columnas, comienza la decoración en las construcciones recubriendo sus paredes con estuco y pintándolas generalmente de rojo (Acosta,1965).
	Monte Albán IIIB-IV	400-800 d.C.	La ciudad alcanzo su máximo desarrollo urbano alcanzando una población aproximada de 30 000 habitantes y Plaza Principal adquirió su actual morfología delimitada en sus cuatro lados y con un total de 14 estructuras, en donde los edificios principales eran la Plataforma Norte y la Plataforma Sur.  Durante esta etapa muchas de las estructuras utilizadas para la construcción fueron reutilizadas como materia prima para la edificación de otras estructuras (Medina-Villalobos, 2015; Rivera, 1992; Urcid, 2011).

<b>Posclásico</b>	Monte Albán V	800 d.C.	La gran urbe murió; la ciudad comenzó a decaer generando escasez económica y dando comienzo a la fractura del estado Zapoteca, el declive se fue dando lentamente y se reflejó en el Valle (Caso <i>et al.</i> , 1967; Medina-Villalobos, 2015), algunos espacios funerarios fueron reutilizados por los mixtecas.
-------------------	---------------	----------	--

### 2.1.2. Plataforma Norte

La Plataforma Norte de la cual forma parte el inmueble estudiado en este trabajo (Figura 6), comprende las estructuras más grandes del sitio arqueológico (residencias de la élite.). La plataforma norte limita la plaza central en esa dirección y se levanta como un punto importante como centro ceremonial, tiene una base de 50 000 m<sup>2</sup>, mide 25 m de norte a sur, 200 m de este a oeste y 10 m de altura, hasta 12 m sobre el nivel de la Gran Plaza y corresponde a la fase IIIB (500-750 d.C.), teniendo también subestructuras correspondientes a las construcciones de la fase Ia (Caso *et al.*, 1976, 2006); según Winter (2006) parece que esta plataforma fue la sede y área de acceso exclusivo de las familias principales de Monte Albán, la cual define la separación de clases sociales y sobre la cual se manejaba el control político, social y económico de la ciudad (Oliveros, 2002).

Dicha plataforma consiste en un enorme basamento que incluye varios conjuntos de edificios y patios que se edificaron en diferentes etapas del desarrollo del sitio, como lo son el Montículo A, el Edificio B y otro conjunto arquitectónico interesante llamado Sistema del Vértice Geodésico ubicado al noreste de la plataforma (Morales-Isunza, 1992), el cual está conformado por la plataforma A, el Vestíbulo B y tres edificios más de los cuales destaca el Edificio D que es el inmueble que se estará estudiando en dicho trabajo y el edificio VG del cual fueron recolectadas las muestras de mortero histórico (Figura 6).

El conjunto Vértice Geodésico, es correspondiente a la época II está localizado en el área de más difícil acceso y desde el cual se domina visualmente la Plaza Principal y sus templos están orientados hacia los puntos cardinales, más sin embargo aún es difícil interpretar la verdadera funcionalidad de este espacio, ya que se carece de información u elementos en el registro arqueológico (Medina-Villalobos, 2015; Oliveros, 2002).



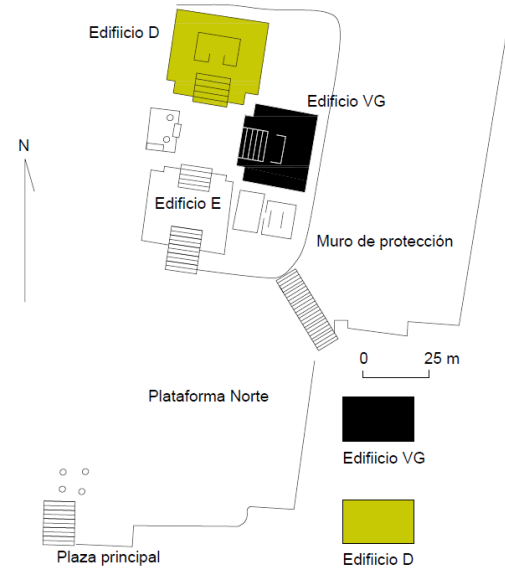


Figura 6. Vista suroeste desde la Plataforma Norte y ubicación de los inmuebles de estudio en el Sistema Vértice Geodésico

### 2.1.3. Sistemas constructivos de Monte Albán

De forma general, la arquitectura monumental zapoteca se conformaba por basamentos de dos o tres cuerpos, con grandes alfardas y escalinatas que daban accesos a la estructura localizada en la parte superior, además de otros elementos decorativos y característicos de su arquitectura como el tablero de doble escapulario que sirvieron como arranque y remate de las alfardas. Los basamentos presentaron mayores dimensiones en la base de la estructura, como solución tecnológica para el soporte de la estructura y las condiciones geomorfológicas de la región. Asimismo, las alfardas y taludes de la arquitectura monumental se construyeron mediante muros en talud escalonados, lo que permitía una mayor firmeza del estuco con el cual se recubrían los edificios (Robles García, 2011; Medina-Villalobos, 2015).

Los muros se caracterizan por tener tres tipos de sistemas constructivos (Opus viejo<sup>1</sup>, Opus nuevo<sup>2</sup> y opus mixteco<sup>3</sup>), los cuales son importantes ya que esto define uno los principales problemas de deterioro de acuerdo con la orientación de la roca, además para ello se utilizaron diferentes tamaños de roca, entre ellos enormes bloques, algunos de rehúso que fueron desmantelados de otros

<sup>1</sup> **Opus viejo:** Hiladas de roca horizontales alternadas con hiladas de roca labrada en cuadro (Época I y II).

<sup>2</sup> **Opus nuevo:** Dos hiladas horizontales con una hilada de roca en cuadro (Época II y IIIA).

<sup>3</sup> **Opus mixteco:** Bloques verticales con alternancia de lajas horizontales (IIIB-IV y V).

edificios y colocados en algunos otros de ellos (Robles García, 2011; Urcid, 2011; Medina-Villalobos, 2015).

## **2.2. Geología regional de Oaxaca**

De acuerdo a los archivos geológicos de INEGI, el municipio de Oaxaca se encuentra ubicado dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur (SMS), el cual es caracterizado por un sistema de bloques montañosos de diferente composición y edad; presenta zonas abruptas en la región sur y norte del estado, mientras que en la zona central está representada por el Valle de Oaxaca, un graben de forma alargada con tendencia NW-SE que se divide en tres subvalles más (Etlá al noroeste, Tlacolula al este y Ocotlán), desde el cual se observan sierras abruptas donde las elevaciones varían de 1540 a 3100 msnm (Raíz E., 1964; Loeza-García y Mendoza-Torres 2007). Según Ortega-Gutiérrez *et al.*, (1992), forma parte de la provincia geológica Zapoteca, cuya morfología es abrupta y presenta pendientes muy pronunciadas.

Oaxaca de Juárez está representado por los terrenos Zapoteco (Oaxaca) y Cuicateco (Juárez) los cuales conforman la geología del sur de México por las unidades litológicas que los conforman (Sedlock, R.L. *et al.*, 1993; Campa *et al.*, 1993; Urrutia-Fucugauchi y Ferrusquía-Villafranca, 2001) (Figura 7).

- a. Terreno Zapoteco: Es representado por el complejo Oaxaqueño (Precámbrico), el cual consiste en rocas de alto grado de metamorfismo de edad Grenvilliana como lo son anortositas, gneises, paragneiss, charnokita, mármol y diques pegmatíticos, las cuales son afectadas por un metagranito del Permo-Triásico. El paleozoico de este terreno no aflora en el Valle de Oaxaca y lo conforman las Formaciones Tiñu (Cámbrico-Ordovícico Inferior), Santiago (Mississippiano Inferior), Ixtaltepec (Pennsylvaniano Inferior-Medio) y Formación Yododeñe (Pennsylvaniano Superior-Triásico) (Loeza-García y Mendoza-Torres 2007).
- b. Terreno Cuicateco: rocas de bajo metamorfismo y rocas sedimentarias que constituyen por el complejo milonítico Aloapan (Jurásico Medio) formado por esquistos; cubren al Terreno Maya y subyacen al Terreno Zapoteco (Rodríguez-Elizarraras, 2011).

Sobreyaciendo a las unidades anteriores se encuentra la cobertura del Mesozoico, que ha sido estudiada por Gonzales, A.J. (1970) y establece como parte de ella la Cuenca de Oaxaca, constituida por lechos rojos de la Formación Todos Santos (Jurásico Medio); la Formación

Jaltepetongo (Necomiano-Aptiano) que consta de dos facies tipo *flysh* y a la cima una plataforma somera correspondiente a la Formación Yushé (Albiano-Cenomaniano) constituida por calizas con nódulos y lentes de pedernal; calizas y lutitas con intercalaciones de areniscas de la Formación Yucunama (Cenomaniano-Maastrichtiano) (Urrutia-Fucuguchi y Ferrusquía-Villafranca, 2001; Loeza-García y Mendoza-Torres, 2007; Rodríguez-Elizarraras, 2011).

Además, el magmatismo de la Sierra Madre del Sur (Eoceno-Mioceno) está representado por una secuencia volcanosedimentaria que aflora en el valle de Oaxaca y se constituye por tobas andesíticas y andesita (Sánchez-Rojas *et al.*, 2000), toba riolítica y riolita, y además un intrusivo granito-granodiorítico. Hacia ETLA se tiene la Fm. Sulchiquitongo, que consta de ignimbritas, conglomerados polimícticos, toba andesítica color verde, arenisca y caliza (Loeza-García y Mendoza-Torres, 2007).

Aluvión, conglomerados polimícticos, limos y arenas, son los constituyentes de los depósitos cuaternarios de las unidades más recientes.

### **2.3. Geología local**

La zona de Monte Albán se encuentra situada dentro de la subprovincia de los Valles Centrales de Oaxaca (Ferrusquía-Villafranca, 1993), la cual se caracteriza por la presencia de una planicie irregular rodeada por montañas; es una zona de alta actividad sísmica, producto de la interacción de placas (placa de Cocos y placa de América del Norte) y actividad producto de las fallas que atraviesan la zona o se encuentran cerca del área, como lo son las fallas normales Santa María y Monte Albán I de orientación NW-SE y la falla lateral derecha Monte Alban con orientación NW-SE (Minster y Jordan, 1993; Loeza-García y Mendoza-Torres, 2007).

Las rocas que se han encontrado dentro del área de estudio en primer lugar corresponden a las rocas del Precámbrico, que se extienden desde la porción sur del cerro de MA, correspondientes al Complejo Oaxaqueño y otras cuyo origen se ubica en el Cretácico inferior, sobre las cuales se asentó Monte Albán y dominan casi toda el área (Hose, 1993) correspondientes a rocas sedimentarias de la Formación Jaltepetongo que se caracteriza por una secuencia terrígena constituida por conglomerados y arenisca hacia su base y después muestra un cambio transicional a una alternancia de arenisca, lutita y en la cima conglomerado calcáreo, caliza y caliza arcillosa (Martínez y Ojeda, 2004).

La mayor parte de rocas que han sido usadas en las construcciones de MA corresponde a rocas areniscas, conglomerados y en menor medida a roca caliza (Formación Jaltepetongo) y cantera verde (Figura 7), incluso las terrazas encontradas alrededor del polígono son producto de la extracción de rocas que se hacía para la construcción de estas (Hose, 1993). Lerma-Pérez (2020) reporta afloramientos de dichas rocas sedimentarias en los alrededores de Monte Albán, que sostienen la idea de que los zapotecas extraían las rocas del mismo lugar.

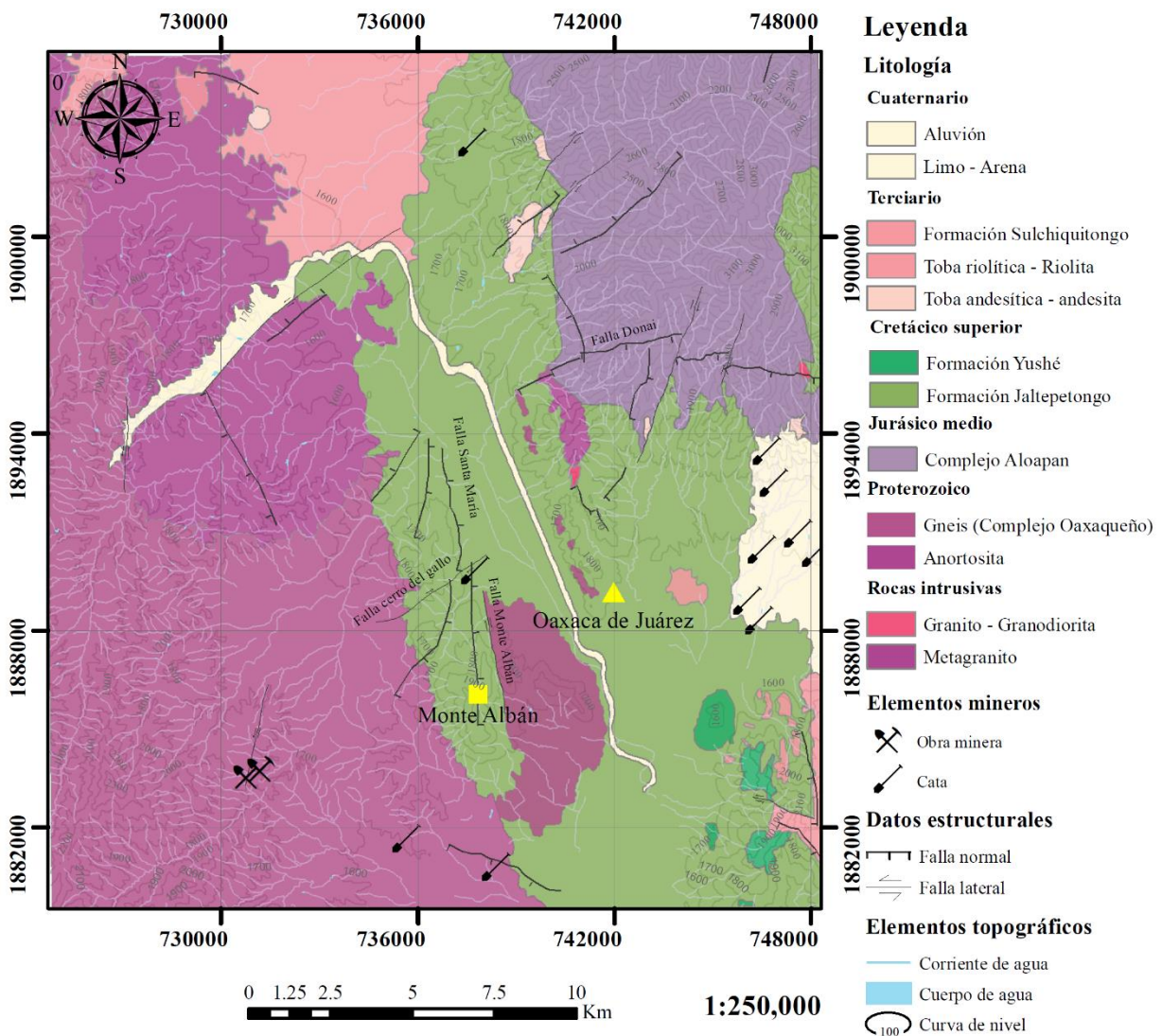


Figura 7. Mapa geológico del área que rodea la zona arqueológica de Monte Albán (Tomado y modificado de Loeza-García y Mendoza-Torres, 2007).

### 3. LAS PROPIEDADES PETROFÍSICAS DE LAS ROCAS Y SU IMPLICACIÓN EN EL INTEMPERISMO Y DETERIORO

Las rocas dimensionales se han utilizado desde la antigüedad para la construcción en su mayoría de edificios importantes o templos, debido a su belleza natural y disponibilidad en el lugar, sin embargo, estas están expuestas a ciertos agentes ambientales que provocan su deterioro y hoy en día deben cumplir con ciertos parámetros físicos y mecánicos que se estudiaron en el presente trabajo, los cuales son detallados o pueden consultarse en Rocha-Reina (2020) y se definen de la siguiente manera:

#### 3.1. Propiedades petrofísicas

##### 3.1.1. Densidad y porosidad

Se determinaron dos tipos de densidad, la densidad de matriz ( $\rho_{Matrix}$ ), densidad aparente o *Bulk density* ( $\rho_{Bulk}$ ).

Para determinar la densidad aparente y densidad de matriz de la roca se utilizó el método de Arquímedes (Monicard, 1980) que mide el empuje que actúa sobre una muestra sumergida en agua, donde se utilizaron muestras cúbicas, a las que se le determinaron los siguientes parámetros para determinar su densidad (Siegesmund y Snethlage, 2011).

- El peso de la muestra en condiciones secas.
- El peso en condiciones totalmente saturadas.
- El peso de la muestra completamente sumergida en agua.

Por otra parte, según Fitzner y Basten (1994) todos los espacios o huecos en una roca se definen como poros. La porosidad se considera el parámetro de la roca más importante por tener un efecto directo en la mayoría de las propiedades físicas de la roca. Se define como el valor resultante del volumen de poros entre el volumen total de la roca (Siegesmund y Dürrast, 2011). En este caso se utilizaron los mismos parámetros para calcular la porosidad que para calcular la densidad. Se distinguen dos tipos de porosidad, la porosidad efectiva y la porosidad total.

Existe una clasificación establecida por von Moos y Quervain (1948) que desarrollaron una clasificación utilizando el valor de porosidad efectivo, para rocas con <1% de porosidad compactas, 1-2.5% poco porosa, 2.5-5% ligeramente porosa, 5-10% significativamente porosa, 10-20% muy

porosa, y más del 20% significa mucho espacio poroso (microporos, meso poros, macro poros y poros largos).

### 3.1.2. Absorción de agua capilar

El agua es una de las principales variables en los procesos de meteorización de las rocas dimensionales, tiene gran impacto a largo plazo en la estabilidad de estas mismas y en las propiedades petrofísicas y mecánicas de la roca. Esto está influenciado por el contenido de humedad que entra a la roca, y a su vez está controlada por el espacio poroso de la misma.

Las rocas de mampostería absorben agua cuando se exponen a la lluvia, así como también cuando está en contacto con agua subterránea. Una superficie porosa absorberá agua en contacto con agua, la absorberá por capilaridad. La capilaridad es la principal fuerza impulsora para este mecanismo de absorción de agua capilar y depende del tamaño de poro, de diámetro de entre 1  $\mu\text{m}$  y 1 mm, así como también de la geometría del sistema de poros, (Siegesmund y Snethlage, 2011). Una roca con un sistema de poros natural con poros capilares de diferentes tamaños tendrá como resultado que la absorción de agua sea rápida por poros más grandes y lentos por poros más pequeños.

La absorción de agua capilar de los materiales porosos se establece a partir del coeficiente de absorción de agua ( $w$ ). Este parámetro se determina a partir de la relación de absorción de agua frente al tiempo, midiendo periódicamente el cambio de peso, producida por la absorción vertical de la roca.

### 3.1.3. Expansión hídrica

La presencia de humedad en rocas dimensionales influye mucho para el caso de cambios de longitud o volumen en las mismas, que es uno de los factores más importantes que afectan a las rocas de construcción, fenómeno conocido como expansión o contracción hídrica e hídrica.

Por lo general la causa de la expansión hídrica es provocada por la hinchazón y reducción de minerales arcillosos, pero en el caso de los materiales que tienen una pequeña cantidad o están libres de arcillas, la dilatación es provocada por que tienen una gran cantidad de microporos que absorben el agua (Stockhausen, 1981). Y así mismo, está controlada por la temperatura y la humedad relativa que se encuentra en el aire, por los tipos de poros, su número y tamaño. Las rocas con una buena red de poros conectados y porosidades más altas muestran una expansión hídrica más rápida que las rocas con menos poros conectados.

Otro proceso que causa expansión, la asociada a la porosidad secundaria, que se produce cuando la roca se sumerge en agua, y en esta se comienza a disolver la matriz del material rocoso, causando una porosidad secundaria, que causa que el agua llegue a espacios con los que no tenía contacto (contacto con arcillas) y comienza una expansión (López-Doncel *et al.*, 2013, Wedekind *et al.*, 2013).

#### 3.1.4. Expansión térmica

La expansión térmica es otra propiedad importante en las rocas dimensionales, ya que en ocasiones las rocas son utilizadas como aislantes térmicos, como paneles de revestimiento en el exterior o pisos y son afectadas por los cambios de temperatura de la región, que pueden causar pérdida de la estructura de estas rocas (Bland y Rolls, 1998).

Una roca cambia su longitud o volumen cuando se expone a un impacto de temperatura (Grüneisen, 1926). El cambio ocurre de acuerdo con sus propiedades térmicas que pueden derivarse de su contenido mineral y composición, y es importante saber que después de que una roca experimente un cambio de temperatura, el volumen de la roca no se restablecerá a su valor original, lo que significa que el impacto de temperatura ha producido una expansión residual. Por lo que en la mayoría de los casos las construcciones pueden verse afectadas por este fenómeno, aunque la expansión sea relativamente pequeña, ya que las rocas se exponen a dos procesos (expansión y contracción) que causa la tensión residual y a largo plazo provoca su acelerado deterioro de estas (pérdida de cohesión, ablandamiento y pérdida de material).

#### 3.1.5. Resistencia a la compresión uniaxial

La resistencia de los materiales es uno de los parámetros básicos para clasificar la calidad de las rocas de mampostería, depende de la fábrica de la roca y está influenciada por su composición, forma y tamaño.

Para la compresión uniaxial se utiliza una prensa hidráulica con la finalidad de que experimente una tensión longitudinal, que la acorta hasta la falla y su rotura final. La resistencia a la compresión no confinada (UCS) de una muestra seca expresa el valor donde la muestra experimenta una pérdida total de cohesión a lo largo de la superficie de la fractura (Siegesmund y Snethlage, 2011). En general se han hecho las siguientes clasificaciones para determinar la carga que se le aplicara a

cada roca durante la prueba y son: para rocas duras más de 110 MPa, para rocas duras a medias entre 70 MPa y 110 MPa y rocas débiles entre 55 MPa y 70 MPa.

Existen ciertos factores que influyen en la resistencia a la compresión, como lo es el llamado envejecimiento de la muestra, la humedad residual y por la distribución de radio de poros (Greger, 1930; Peschel, 1974; Morales *et al.*, 2007)

#### 3.1.6. Cristalización de sales

La cristalización de sales se considera también otro de los principales mecanismos de daño de las rocas. El crecimiento de cristales en un material rocoso crea la llamada presión de cristalización que puede provocar daños estructurales en su microestructura (Steiger *et al.*, 2011). Esto se produce principalmente por el crecimiento de cristales de sal dependiendo de la porosidad de la roca. La condición para formar una presión de cristalización es que se forme un límite espacial contra el cual, el cristal pueda crecer y, por lo tanto, ejerce una presión sobre la estructura circundante (Steiger, 2005).

### **3.2. Implicaciones del intemperismo y deterioro**

Las rocas son los materiales más duraderos que pueden existir para ser utilizados como material de construcción (Steiger y Charola, 2011), sin embargo, existen muchos agentes naturales y externos que provocan el rápido deterioro de las rocas dimensionales y actúan en conjunto con las propiedades mismas de las rocas que se exponen en el apartado 3.1, por lo que en este apartado se expondrán los factores naturales y antropogénicos que intervienen en el deterioro de estas.

#### 3.2.1. Deterioro por procesos mecánicos

La mayoría de los daños provocados por cargas o tensiones superiores a la resistencia mecánica que tiene el material, resultan a causa del mal diseño de edificaciones, o del lugar donde se encuentran asentadas (Steiger y Charola, 2011).

Como resultado de estas tensiones los muros y estructuras de las construcciones comienzan por agrietarse, además de fisuras y pérdida de material, para finalmente provocar la ruptura de los muros de roca, ya sea debido al nivel diferencial del suelo que provoca cargas asimétricas en estas o también debido al crecimiento de vegetación a sus alrededores creando tensiones inducidas por sus raíces, como se muestra en la figura 8.



Cabe destacar que en Oaxaca se describen reportes sísmicos desde la época colonial, que han provocado gran cantidad de daños en la ciudad de Oaxaca, ocasionando probablemente de la misma manera gran cantidad de daños mecánicos en las estructuras debido a las vibraciones provocadas por los temblores, causando una mayor inestabilidad en los edificios, ya que se ubica en zonas de alta a muy alta sismicidad (Rodríguez-Elizarrarás, 2011).



*Figura 8. Fotografía correspondiente a parte de la fachada este del edificio D en Monte Albán, donde se puede observar el desnivel del lugar en donde se encuentra asentado este edificio y además la cantidad de vegetación que crece entre y a su alrededor.*

### 3.2.2. Deterioro causado por la expansión hídrica e higríca

Los deterioros causados por expansión higríca o hídrica (consultar Rocha-Reina, 2020), se deben a materiales porosos cuando pueden absorber en su superficie el vapor de agua de la atmósfera (humedad relativa) o cuando agua entra directamente (agua de precipitación o subterránea) y sufren cambios de expansión. En rocas de mampostería la expansión higríca que se sufre no es tan significativa como la de otros materiales, pero el daño a largo plazo es inevitable, en especial para rocas con contenido arcilloso que generan dilatación en presencia de agua (Steiger y Charola, 2011) y según Lerma-Pérez (2021), aunque de manera minoritaria, en sus análisis de DRX, las rocas que forman parte de las construcciones de Monte Albán tanto conglomerados como areniscas si contienen arcillas (caolinita y montmorillonita).

La expansión para rocas que no contienen ningún mineral arcilloso, puede también ocurrir debido a una presión de separación que es la diferencia de presión de una película de agua entre dos superficies y la presión del volumen de masa (Weimann, 2001).

### 3.2.3. Deterioro causado por ciclos termales

Los cambios de temperatura ya sea que aumenten o disminuyan, pueden provocar cambios por expansión o contracción en el volumen de las rocas. En general ciclos térmicos de entre 20°C y 90°C causan otro de los daños mecánicos en la mayoría de las rocas (Weiss *et al.*, 2004) que raramente ocurren solos, es decir son más susceptibles si se encuentran en conjunto con agua o humedad (Koch y Siegesmund, 2004).

Para las rocas que contienen minerales de calcita, se podría decir que están más expuestas al daño por ciclos térmicos, ya que es uno de los minerales que al calentarse se expande en una dirección y se contrae en otra, esto conduce a una desintegración granular de la matriz (Figura 9), debido a la tensión que se crea por la dilatación térmica (Kessler, 1919; Franzini *et al.*, 1983) y como punto importante de igual manera que las arcillas. Lerma-Pérez (2021) en su estudio de DRX en los materiales de construcción de Monte Albán, se detectaron picos de intensidad muy altos en calcita, por lo que más adelante se verá la implicación de este factor en el intemperismo de las rocas del edificio D.



Figura 9. Desintegración granular presentada en una de las rocas que forman parte del edificio D en la zona arqueológica de Monte Alban.



### 3.2.4. Deterioro por cristalización de sales

La cristalización de sales es de los mecanismos de tensión más dañinos para las rocas; estas sales se albergan principalmente en la atmósfera, suelo y agua subterránea para depositarse en cualquier tipo de construcción, Estas por sí solas no son dañinas, se necesita la presencia de cierta cantidad de agua que, a su vez, depende de la porosidad en la roca para que induzca un daño en la roca, formando así un continuo deterioro que se refleja como desintegración granular, descamación, delaminación (Figura 10), así como alveolización, dependiendo del tipo de material y las condiciones bajo las cuales cristaliza la sal (Snethlage y Wendler, 1997).

Otro factor de deterioro es la formación de eflorescencias salinas, que si bien esta se forma en la superficie no es significativa, pero siendo una roca porosa, se forma dentro de ellas las llamadas subflorescencias y si afectan a la roca (Steiger y Charola, 2011).



*Figura 10. Roca perteneciente al edificio D altamente dañada, presentando delaminación*

### 3.2.5. Deterioro causado por procesos químicos

Los efectos del daño químico son a causa de la disolución o alteración de los componentes minerales de un material de roca por reacciones químicas y están directamente relacionadas con la contaminación atmosférica y la deposición ácida, la velocidad de reacción depende principalmente

de la cantidad y el tiempo de contacto de agua líquida, la solubilidad del mineral y la disponibilidad de acidez, es decir el pH de la solución acuosa en contacto con la superficie, siendo la principal fuente de agua en las construcciones la de precipitación.

En general las rocas compuestas de  $\text{CaCO}_3$ , presentan solubilidades más altas, la solubilidad siempre será más alta al disminuir los contenidos de sílice y aumentar el carbonato y magnesio y cuando están expuestos a soluciones ácidas, como lo es el dióxido de carbono el ácido responsable de la meteorización en presencia de agua, así como también otra fuente es la lluvia ácida y la acidez atmosférica. Para rocas carbonatadas el principal producto de reacción de la disolución es el sulfato de calcio en forma de yeso y según Camuffo *et al.* (1982), las costras de yeso que se forman en las superficies de las construcciones tienen un aspecto de color negro, el cual es dado por la incrustación de partículas contaminantes en el aire (Figura 11).



*Figura 11. Parte de la fachada oeste del edificio D en la zona arqueológica de Monte Albán, en donde se puede observar las costras negras incrustadas en las rocas de la parte superior de la estructura.*



#### 4. EVALUACIÓN GEOLÓGICA DE LAS ROCAS DEL EDIFICIO D EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE MONTE ALBÁN

A lo largo de la historia las rocas dimensionales han sido la principal materia prima para la construcción de muchos edificios antiguos e importantes debido a su gran disponibilidad en el lugar y su gran duración (Steiger y Charola, 2011), por lo que es importante conocer sus propiedades y sus condiciones ante los agentes naturales y externos a los que siempre se encuentran expuestas.

En el presente capítulo se darán a conocer los resultados obtenidos de la metodología que fue empleada tanto para la evaluación litológica y de intensidad de daños, la evaluación de las condiciones ambientales a las que se encuentran expuestas las rocas y además del conocimiento de las propiedades físicas de estas mismas.

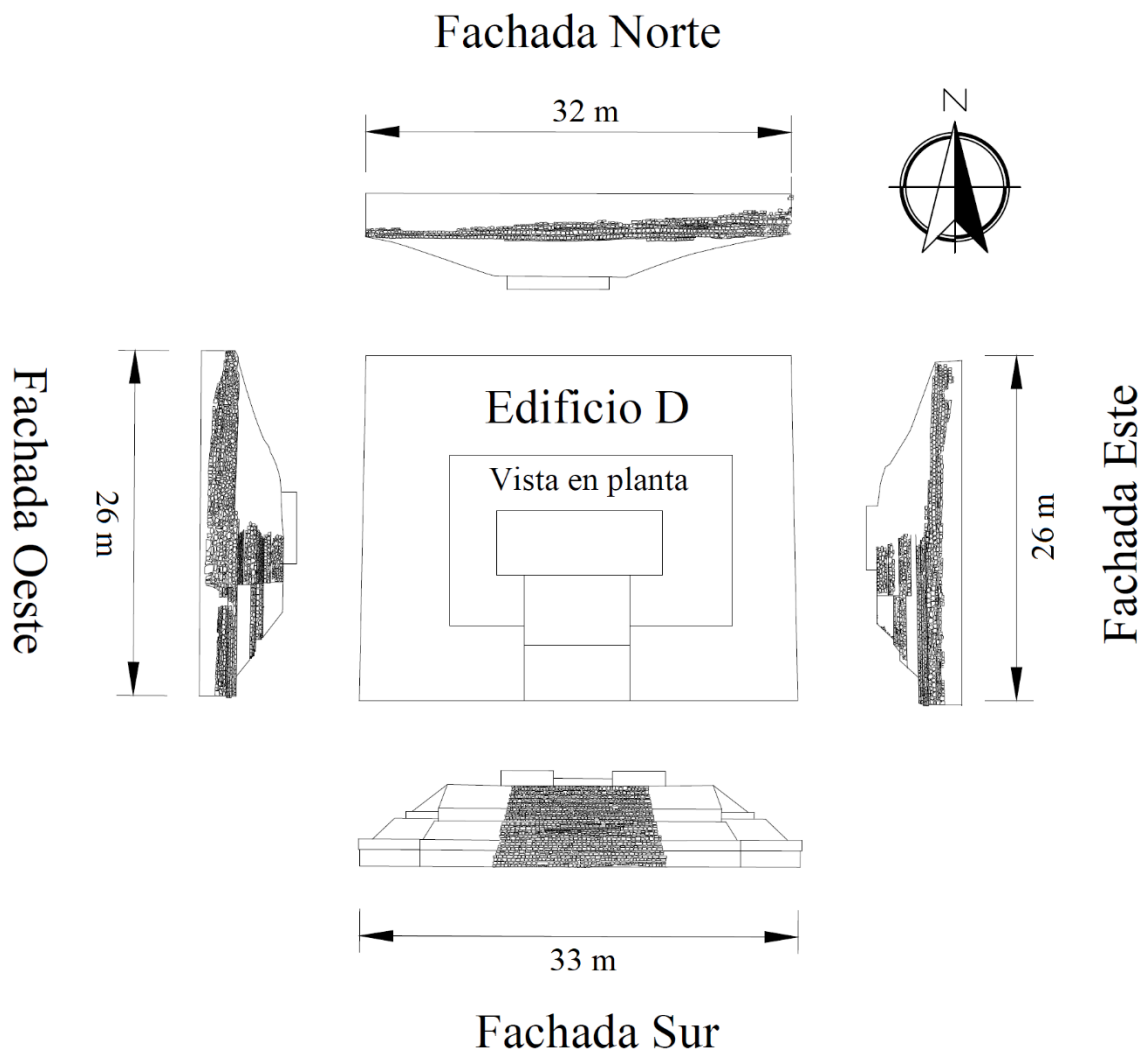


Figura 12. Esquema de las fachadas que conforman el edificio D, las cuales fueron mapeadas para el registro litológico y de intensidad de daños.

#### 4.1. Registro litológico y de intensidad de daños del edificio D

Para la documentación del registro litológico, se hizo el reconocimiento de rocas de las cuatro fachadas que conforman el edificio D (Fachadas Norte, Sur, Este y Oeste) (Figura 12), las rocas se identificaron de acuerdo a su composición y tamaño de grano; se pudieron identificar dos tipos de rocas como material principal de construcción, como lo son areniscas y conglomerados, que a su vez fueron clasificadas por tamaño de grano, es decir de grano grueso, grano medio y grano fino, por lo que por ser el principal material de construcción fueron muestreadas y descritas de la siguiente manera:

##### *Descripción macroscópica de areniscas*

*Arenisca grano fino:* Roca color café con tonalidades rojizas, con tamaño de granos correspondiente a arenas muy finas, mal clasificada sostenida por una matriz de composición calcárea. Presenta vetilleo de calcita y algunos granos visibles de cuarzo, feldespatos, líticos blancos y grises y probablemente algunos clastos de caliza y rocas volcánicas de mayor tamaño de aproximadamente 5 mm (Figura 13a).

*Arenisca grano medio:* Roca de color café con tonalidades grisáceas, con tamaño de granos correspondiente a arenas medias (granos menores a 0.5 mm), bien clasificada sostenida por una matriz de composición calcárea. Presenta gran cantidad de granos de cuarzo, feldespatos, óxidos, así como líticos de color negro y gris, además presentan gran cantidad de vetilleo de calcita (Figura 13b).

*Arenisca grano grueso:* Roca color café con tonalidades grisáceas, con tamaño de granos mayores a 1 mm correspondientes a arenas gruesas, mal clasificada sostenida por una matriz de composición calcárea con estructura laminar y vetillas de calcita. Presenta gran cantidad de granos de cuarzo, feldespatos, óxidos, así como líticos de color blanco y negro (Figura 13c).

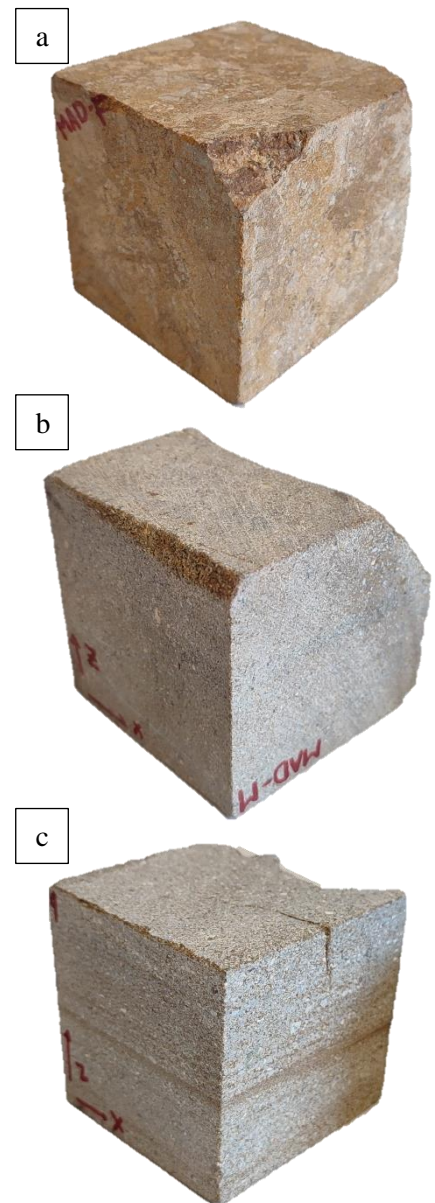


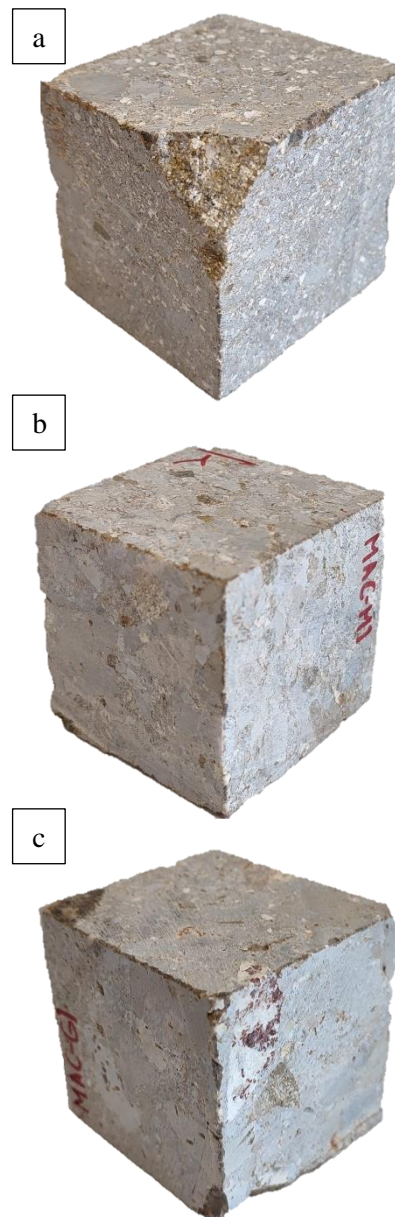
Figura 13. Muestras macroscópicas de las areniscas de a) grano fino, b) grano medio y c) grano grueso.

### ***Descripción macroscópica de conglomerados***

*Conglomerado grano fino:* Ortoconglomerado polimíctico de color gris a blanco, con tamaños de granos de aproximadamente 2 mm correspondientes a gránulos, mal clasificados, soportados por una matriz calcárea. Los gránulos son sub-redondeados y se constituyen por cuarzos, feldspatos, líticos de color negro y además clastos de calizas de tamaños de hasta 1 cm (Figura 14a).

*Conglomerado grano medio:* Ortoconglomerado polimíctico de color gris a blanco, con tamaños de granos correspondientes a guijarros, mal clasificados, soportados por una matriz calcárea. Los guijarros son sub-redondeados a redondeados con baja esfericidad y los conforman granos de cuarzos, feldspatos, carbonatos, líticos de color negro, así como también clastos más grandes de 1-2 cm, correspondientes a fragmentos de calizas, areniscas y gneises (Figura 14b).

*Conglomerado grano grueso:* Ortoconglomerado polimíctico de color gris a blanco, con tamaños de granos correspondientes a guijarros, mal clasificados, soportados por una matriz calcárea. Los guijarros son sub-angulosos y sub-redondeados con baja esfericidad y los conforman granos de cuarzos, feldspatos, carbonatos, líticos de color negro y amarillos, así como también clastos más grandes que van desde 1 cm hasta los 3 cm o más, correspondientes a fragmentos de calizas, areniscas y gneises (Figura 14c).



*Figura 14. Muestras macroscópicas de conglomerados de a) grano fino, b) grano medio y c) grano grueso.*

Además, durante el registro litológico se pudieron identificar también en cantidades mínimas algunas rocas calizas, filitas, esquistos, gneises y algunas rocas volcánicas.

Mientras que, para la determinación de daños, como ya se dijo anteriormente se tomó como base el glosario del “*International Council on Monuments and Sites-International Scientific Committee*

for Stone (ICOMOS-ISCS, 2008), el glosario divide los tipos de daños en cinco categorías como los son grietas y deformaciones, desprendimientos, características inducidas por pérdidas de material, decoloración y depósito de material y colonización biológica (Tabla 2) , en el presente trabajo se pudieron identificar algunos de los daños que corresponden a algunos de las categorías mencionadas y se enlistan y se describen según el aspecto visto en campo de la siguiente manera (Figura 15):

### ***Tipos de daños encontrados***

- Fracturas y grietas. Fisuras individuales resultante de tensiones mayores a la resistencia del material, provocando la separación de una parte de otra (Figura 15a).
- Delaminación. Proceso de desprendimiento en capas, generalmente provocado en rocas laminadas como las sedimentarias o metamórficas (Figura 15b).
- Desintegración granular (*sanding*). Ocurre en rocas granulares sedimentarias (Figura 15c).
- Fragmentación (*chipping*). Rotura de una roca en porciones dimensionales variables que son irregulares en forma, espesor y volumen, generalmente ocurren en zonas de alta compresión (Figura 15d).
- Alveolización: Formación de cavidades en la superficie de la roca, las cuales pueden estar interconectadas y tener formas y tamaños variables (Figura 15e).
- Picaduras (*Pitting*). Cavidades puntiagudas milimétricas de forma cilíndrica o cónica, que no están interconectados, pueden ser inducidos químicamente o de forma biogénica, especialmente en rocas carbonatadas (Figura 15f).
- Costras negras. Acumulación de materiales en la superficie de la roca, puede provenir de depósitos exógenos en combinación con materiales derivados de la roca. Frecuentemente de color oscuro (negro), son generadas por suciedad o principalmente por partículas en la atmosfera que al estar en contacto con agua se adhieren en forma de yeso por la disolución de sulfato de calcio (Figuras 15 e y f).
- Costras blancas. Red de pequeñas líneas interconectados de escala milimétrica a centimétrica de carbonatos, resultado de la disolución de materiales calcáreos expuestos que están expuestos a la escorrentía de agua (Figura 15g).
- Incrustación mineral (calcita). Capa exterior mineral compacta y dura que se adhiere a la roca, generalmente se encuentran debajo de las áreas donde se filtra o se ha filtrado el agua.



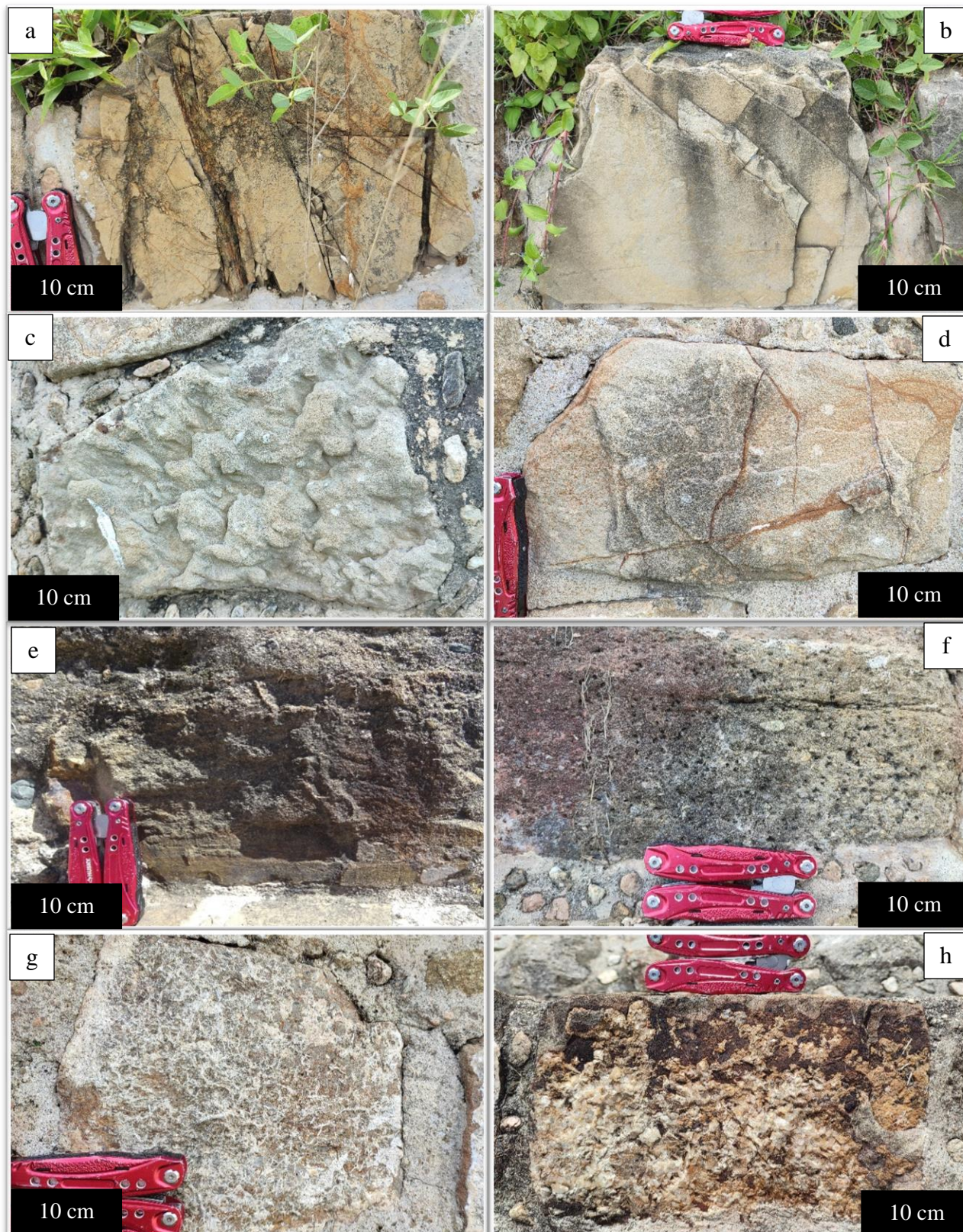


Figura 15. Fotografías donde se pueden observar algunos de los daños que fueron identificados en las diferentes fachadas del edificio D. a) Fracturas, b) delaminación, c) sanding, d) chipping, e) alveolización y costra negra f) pitting y costras negras, g) costras blancas y h) incrustación mineral de calcita y patina de hierro.



(Figura 15h)

- Patina rica en hierro. Capa generalmente resultante del envejecimiento natural o artificial de la roca, de color negro o marrón enriquecida en minerales de hierro o arcillas, por lo regular se desarrolla en ambientes exteriores y de manera bastante uniforme sobre la superficie de la roca (Figura 15h).

Tabla 2. Clasificación de patrones de deterioro (tomado y traducido de ICOMOS-ISCS, 2008).

GRIETAS Y DEFORMACIONES	DESPRENDIMIENTO	DAÑOS INDUCIDOS POR PERDIDA DE MATERIAL	DECOLORACIÓN Y DEPÓSITO DE MATERIAL	COLONIZACIÓN BIOLÓGICA
GRIETA	AMPOLLAS (BLISTERING)	ALVEOLIZACIÓN	COSTRA	COLONIZACIÓN BIOLÓGICA
Fractura	DELAMINACIÓN	EROSIÓN	Costra blanca	ALGAS
Fractura en estrella	ESTALLADO	Perdida de componentes o matriz	Costra negra	LIQUEN
Microfisura	Exfoliación	DAÑOS MECANICOS	DEPOSITO	MOHO
Craquelado	DESINTEGRACIÓN	Daños por impacto	DECOLORACIÓN EFLORESCENCIA	PLANTAS
Clivaje	Desmoronamiento (crumbling)	Corte	INCRUSTACIÓN PELICULA	MUSGO
DEFORMACIÓN	Desintegración granular (sanding)	Rasguño		
		Abrasión		
	FRAGMENTACIÓN	MICROKARST		
	En estillas (splitting)	PARTES PERDIDAS	ASPECTO BRILLANTE	
	Estillado (chipping)	PERFORACIÓN	GRAFITI	
	PELADO	PICADURAS (PITTING)	PATINA	
	DESCAMACIÓN		Rica en hierro	
			Rica en oxalato	
			ENSUCIAMIENTO	

Lo anteriormente escrito acerca de las rocas y daños encontrados en el inmueble estudiado, se expondrá en los siguientes apartados, en donde se podrá observar la litología en cada fachada y los patrones de daños de igual manera en los mapeos de deterioro de cada una de las cuatro fachadas del edificio D.

#### 4.1.1. Fachada Sur

El mapeo litológico y de daños de la Fachada Sur (Figura 16) se realizó en diferentes secciones, dividiendo la fachada completa en 5 partes, en la escalinata de la fachada sur (Figuras 17 y 18) y las paredes 1, 2, 3 y 4 que se podrán observar en el apartado de los anexos (ver figuras en anexo

2), esto con la finalidad de obtener un mayor detalle y visualización de cada uno de los elementos. Para la fachada sur y las que se describirán más adelante se les trazo una línea negra un poco más gruesa a diferencia de las demás que indica la separación de la parte original del inmueble (zona inferior) de la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).



*Figura 16. Fachada Sur del edificio D, en la zona arqueológica de Monte Albán.*

Para la parte original de la fachada sur, en las paredes 1, 2 y 3 (Figuras 63, 65 y 67 en anexo 2), se pudo observar que los bloques de rocas son más grandes a diferencia de los que se han utilizado como material de restauración, además pueden mostrar un patrón de acomodo en hileras, ya que las rocas se muestran labradas en formas de cuadro y alargadas lo que permite un mejor arreglo geométrico en las paredes; por otro lado en la pared 4 (Figura 69) se puede observar que las rocas tienen un tamaño más pequeño al igual que las utilizadas en restauración, más sin embargo siguen teniendo el mismo arreglo en hileras y su forma es cuadrangular. Aunado a esto, en estas zonas las rocas que se encontraron fueron en su mayoría bloques grandes de areniscas de grano grueso y grano medio y se encontraron algunos bloques de conglomerados y areniscas finas en menor cantidad, la mayoría de las rocas mantienen una orientación horizontal con respecto al acomodo de sus granos, a excepción de una cantidad pequeña de bloques con orientación vertical.

Por otra parte, en las zonas que corresponden a la parte restaurada de las paredes 1,2,3 y 4, como ya se mencionó en el párrafo anterior, las rocas son más pequeñas y de formas irregulares, incluso llegando a tener formas redondeadas (ver figuras anexo 2), lo que implica que el arreglo geométrico sobre todo en los tableros de las paredes sea más heterogéneo y en cuanto a las orientaciones de las rocas de igual manera en su mayoría se presentan de manera horizontal de igual manera para la parte superior de las estructuras que representan las molduras de los tableros (escapularios). Además, en esta zona de restauración, la litología es más variada, ya que se encontraron areniscas,

conglomerados, calizas, limolitas e incluso una roca metamórfica (Figura 67 pared 3), pero siempre predominando la cantidad de areniscas de grano grueso y grano medio.

De la misma manera, en la figura 17, se puede observar el mapeo litológico de la escalinata que conforma esta fachada, en ella las rocas tanto de la parte original como la parte restaurada son pequeñas, en su mayoría rocas areniscas de grano grueso y medio y se presentan una gran cantidad de conglomerados de grano medio, cuya orientación sigue siendo horizontal para la mayoría de las rocas, a excepción de la parte superior de la escalinata donde hay una cantidad significativa de rocas orientadas verticalmente.

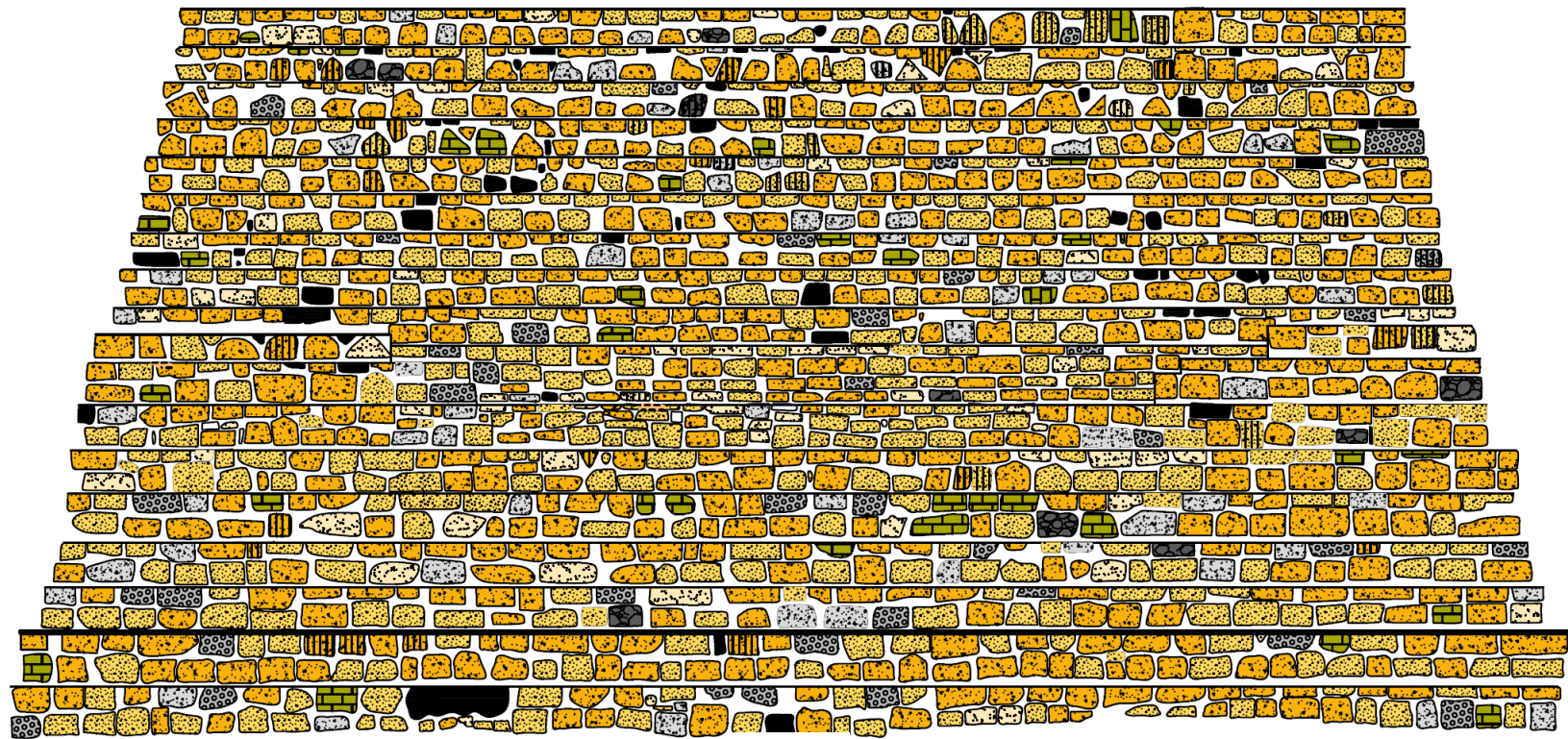
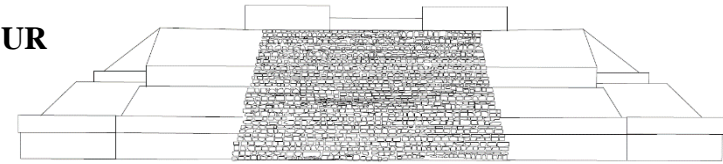
En cuanto al registro de daños, principalmente se pudo identificar como deterioro la delaminación, ya que se pudo localizar distribuida homogéneamente en casi toda la fachada, siendo un daño particular de las areniscas, que son las rocas que presentan laminación y pueden desprender sus capas más fácilmente, se pudo observar principalmente en areniscas de grano fino.

En segunda instancia se encuentran las costras negras como un deterioro significativo, identificado en todas las litologías mencionadas, este se encuentra principalmente en las partes superiores de las estructuras, sobre todo en la escalinata sur donde se encontró una gran cantidad de rocas orientadas verticalmente (Figura 18) además en dicha estructura se puede observar un patrón de distribución de estas costras, mostrándose en agrupaciones en los escalones superiores de la escalinata incluso se puede observar que forman un patrón de escurrimiento sobre esta misma; así mismo, tanto en la escalinata como en las paredes 1, 2, 3 y 4 (ver mapeo de daños en anexo 2) se puede encontrar este daño en las partes inferiores del edificio que probablemente se deban a capas de suciedad en las rocas.

Seguido de esto, uno de los daños encontrados en gran cantidad, es la incrustación mineral la cual se pudo encontrar en toda la fachada de forma aleatoria sin seguir ningún patrón, principalmente dada en areniscas en las cuales se pudieron observar capas gruesas de calcita (generadas por cristalización diagenética).

Además, se localizaron de igual manera de forma aleatoria y en menor cantidad, la alveolización sobre todo en la escalinata y la pared 2 (Figura 66) sobre areniscas, también daños mecánicos como el *chipping*, desintegración granular tanto en areniscas como en conglomerados y calizas y también fracturas como se puede observar en la pared 3 donde se observaron en la separación de la parte

## ESCALINATA FACHADA SUR



13 m



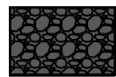
Arenisca grano grueso



Arenisca grano medio



Arenisca grano fino



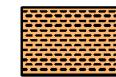
Conglomerado grano grueso



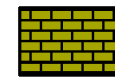
Conglomerado grano medio



Conglomerado grano fino



Limolita



Caliza



No identificado

Figura 17. Registro litológico de la escalinata, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).



## ESCALINATA FACHADA SUR

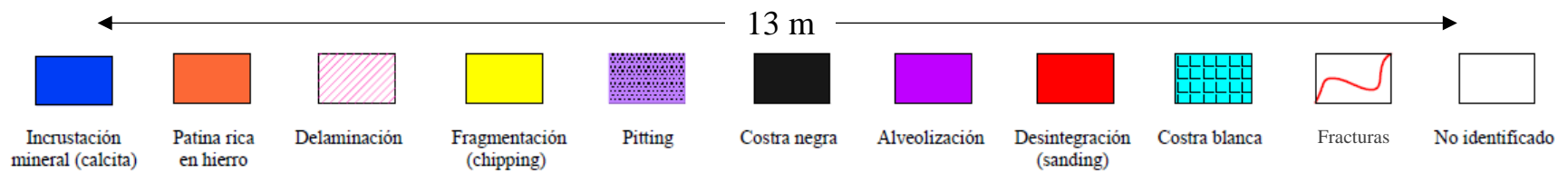
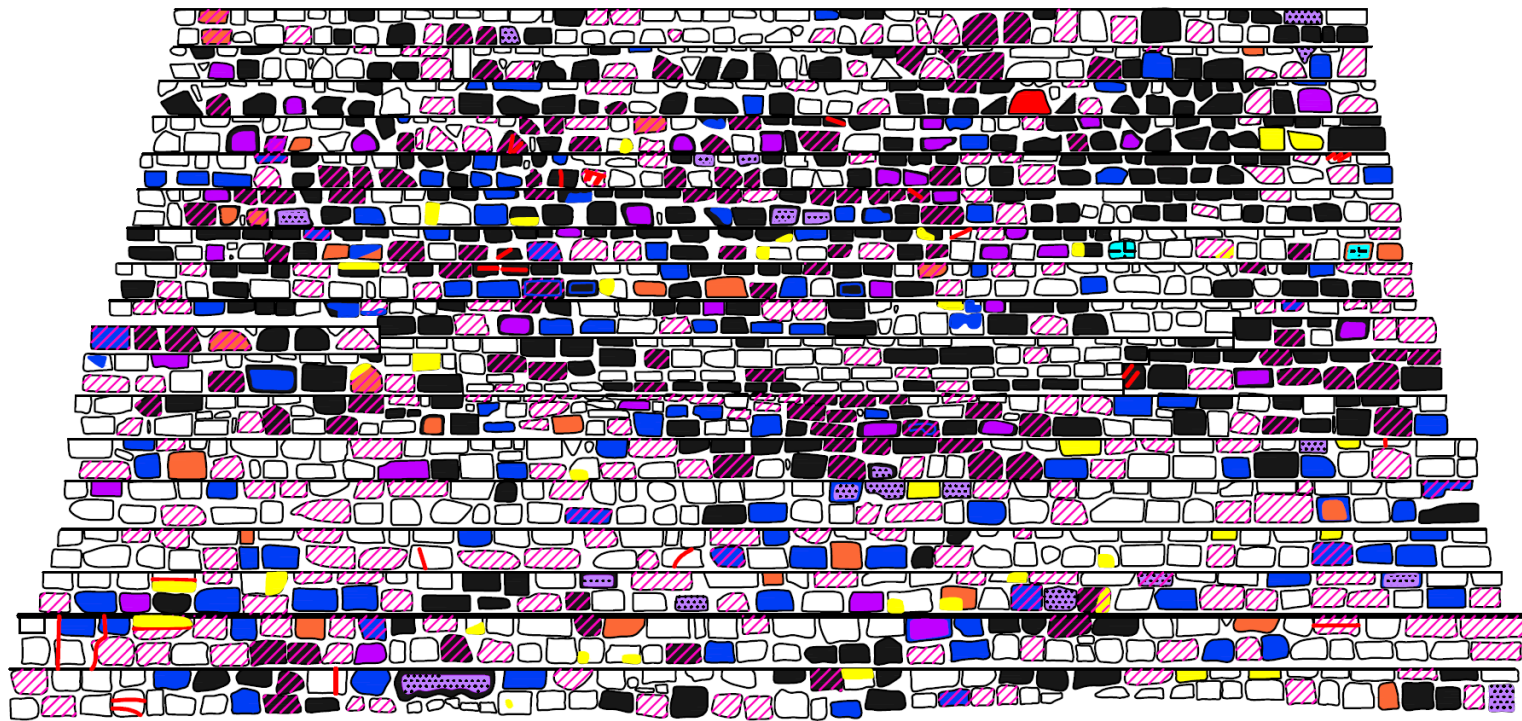
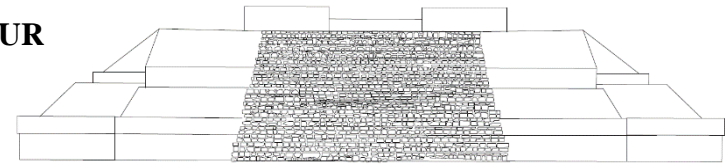


Figura 18. Registro de intensidad de daños de la escalinata, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).

original y la parte restaurada. Al igual que los daños como oxidación, costras blancas y el *pitting* que se encontró en solo en unas cuantas rocas, tanto areniscas de grano grueso, como en conglomerados.

#### 4.1.2. Fachada este

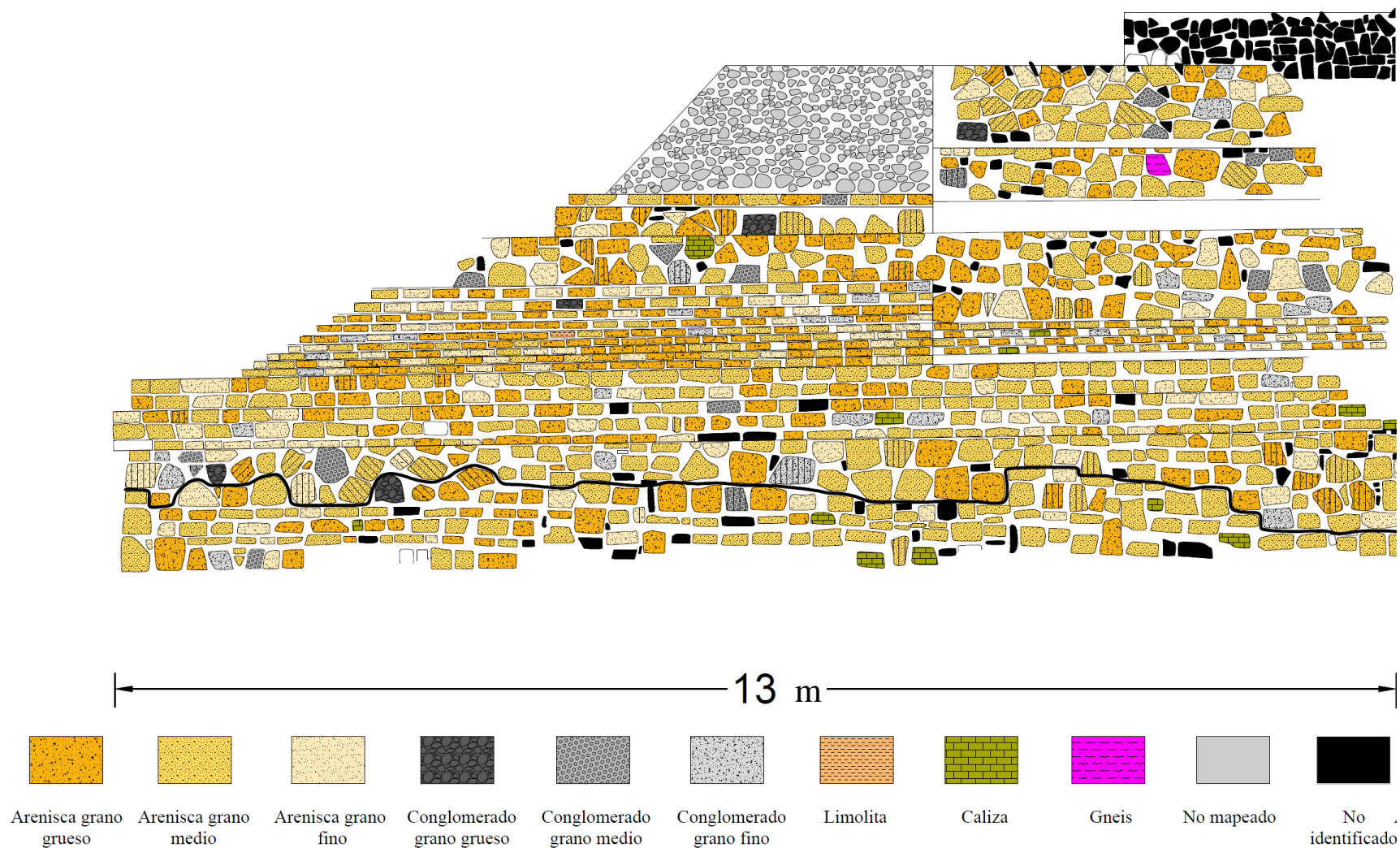


*Figura 19. Fachada Este del edificio D, en la zona arqueológica de Monte Albán.*

La fachada este (Figura 19), al igual que la anterior se dividió en dos secciones (lado sur y lado norte) para una mayor apreciación, de manera general las areniscas representan la mayor parte de las rocas presentes; en la figura 20 mediante la línea de separación (línea negra) se puede diferenciar la zona original de la zona restaurada, en la cual para la parte original que es solo un área reducida, se puede apreciar de la misma manera para la fachada sur, que las rocas se muestran con formas cuadrangulares y rectangulares por lo que siguen teniendo el mismo patrón que la anterior en el cual su acomodo forma una especie de hileras a lo largo de la estructura, las rocas más pequeñas se encuentran dispuestas en 3 y 2 hileras entre bloques más grandes de aproximadamente 30 cm<sup>3</sup> los cuales se disponen en su mayoría de forma horizontal delimitando esta zona original, a excepción de tres areniscas y un conglomerado de grano medio que se encuentran colocados de forma vertical. En la figura 21, se puede observar solo una hilera de rocas de aproximadamente 2 metros de largo que corresponde a la zona original, de igual manera formada por bloques grandes; en esta zona se encontraron mayormente a diferencia del resto de las fachadas, rocas calizas en la base de la estructura, dispuestas de forma horizontal en bloques grandes.

El resto de la estructura constituye a la zona restaurada que forma gran parte del inmueble; en la figura 20 se puede observar que por debajo y por encima de las molduras que forman parte del tablero, las rocas tienen un acomodo heterogéneo con formas irregulares y algo redondeadas, →

## FACHADA ESTE (LADO SUR)



*Figura 20. Registro litológico del lado sur de la fachada Este en el Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).*



# FACHADA ESTE (LADO NORTE)

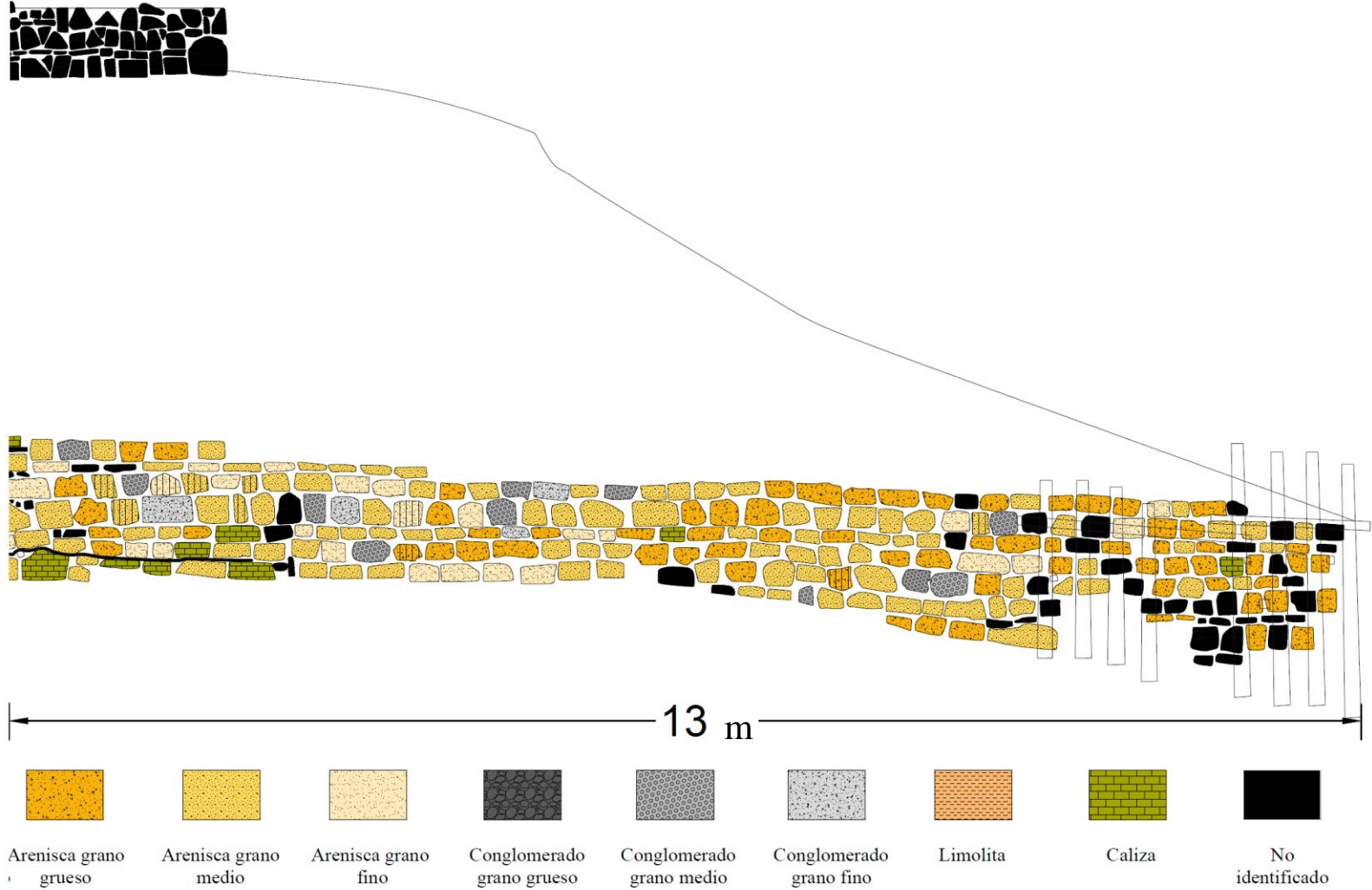
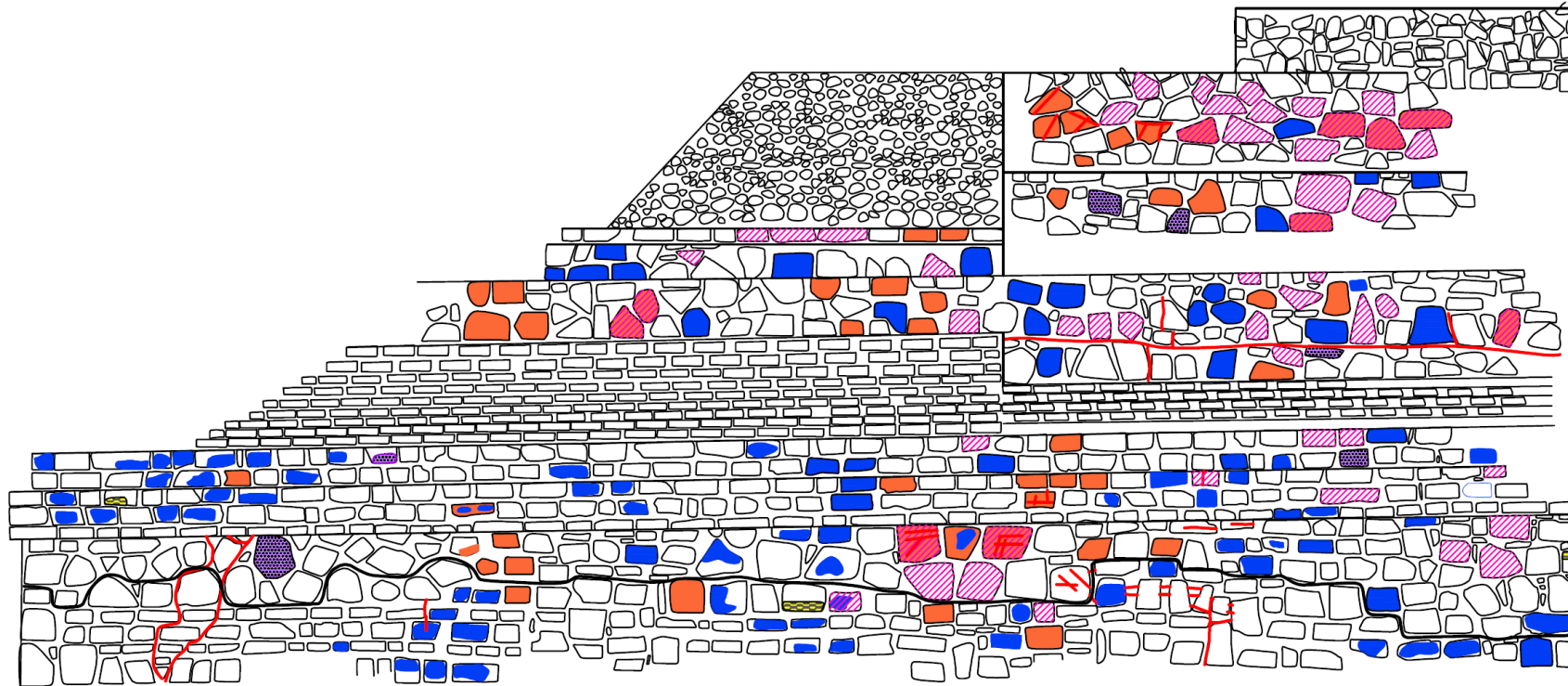




Figura 21. Registro litológico del lado norte de la fachada Este del Edificio D La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).

## FACHADA ESTE (LADO SUR)

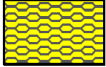


13 m

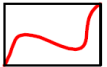
  
Incrustación  
mineral (calcita)

  
Patina rica  
en hierro

  
Delaminación

  
Fragmentación  
(chipping)

  
Pitting

  
Fracturas


  
No identificados

Figura 22. Registro de intensidad de daños del lado sur, correspondiente a la fachada este del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).

## FACHADA ESTE (LADO NORTE)

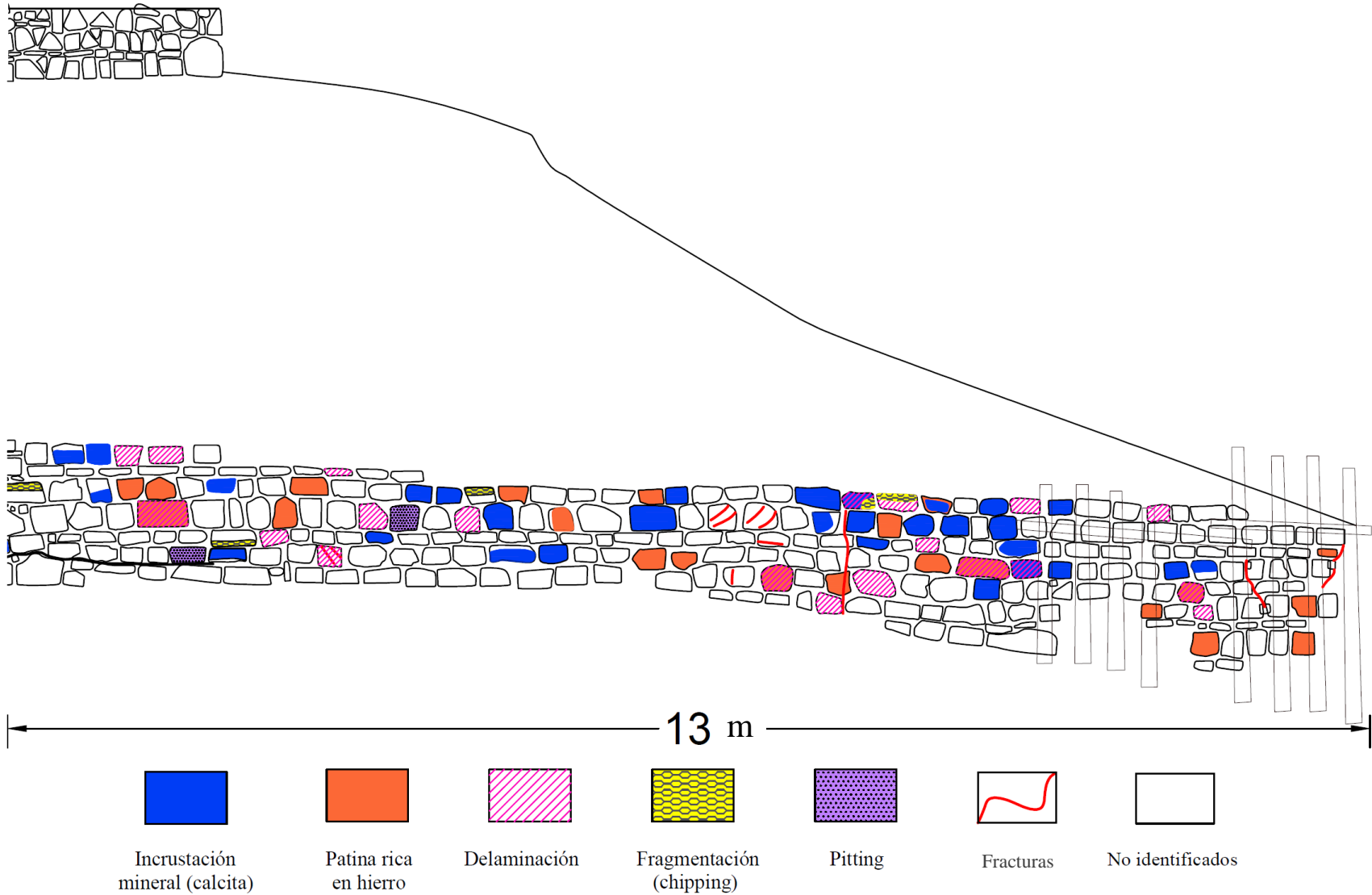


Figura 23. Registro de intensidad de daños del lado norte, correspondiente a la Fachada Este del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).

además, las rocas de esta se presentan en bloques grandes y se encontraron gran cantidad de areniscas orientadas verticalmente. Las molduras y los taludes escalonados sobre estas se conforman por rocas muy pequeñas de aproximadamente de 10 cm de largo y todas se encuentran colocadas horizontalmente. Por otro lado, en la figura 21, en la zona restaurada se puede observar que las rocas están un poco más ordenadas, siguiendo el patrón en hileras en bloques grandes y la mayoría colocadas horizontalmente.

Mientras tanto, en el registro de daños de manera general la fachada norte fue la que se encontró con menor cantidad de deterioros e incluso algunos de ellos no fueron identificados en esta estructura (Figuras 23 y 24). Se identificó como daño predominante la incrustación mineral de calcita localizado de forma aleatoria en areniscas y conglomerados de grano fino. Seguido de esto, en cantidad, se encuentra la delaminación dada solamente en areniscas.

Además de igual manera de forma aleatoria se identificaron rocas areniscas y un conglomerado de grano medio con oxidación (patina rica en hierro) y en menor cantidad se encontró *pitting* en dos conglomerados y tres areniscas, también se identificó *chipping* de igual manera seis rocas correspondientes a areniscas y calizas.

Siguiendo con los daños se encontraron algunas fracturas que atraviesan los tableros del edificio y se puede observar que las fracturas se forman a través del cambio de bloques pequeños a bloques grandes; en esta fachada se pudo observar que la orientación de las rocas no representa un factor importante ante el intemperismo ya que estas rocas con orientación vertical no se encontró gran cantidad de daños incluso algunas de ellas se presentan como rocas sanas.

#### 4.1.3. Fachada norte

En la Fachada Norte (Figura 24), se puede observar que solo queda levantada cierta parte de la base de dicha fachada, por lo que al igual que las anteriores la zona original es solo una pequeña área del total de la estructura.

De manera general, la estructura que queda levantada en su mayoría conformada por rocas del tipo areniscas, seguido en cantidad por conglomerados de grano medio y fino y el resto en menor cantidad por la litología ya mencionada anteriormente (apartado 4.1), tiene un arreglo geométrico ordenado, es decir, tanto en la zona original como la ya restaurada se sigue un patrón en forma

hileras de lajas de roca con orientación horizontal alternadas con hileras de roca labrada en forma de cuadro (Figuras 25 y 26)



*Figura 24. Fachada Norte del edificio D, en la zona arqueológica de Monte Albán.*

Además, en esta fachada la roca caliza predominó dentro de la zona superior que conforma la parte restaurada y no se localizó ni una en la parte original, así mismo, cabe mencionar que solo en esta fachada dentro de la parte original se encontró un esquisto (Figura 26), una roca metamórfica que no se descubrió en ninguna de las paredes del resto del edificio.

En la zona original durante el mapeo litológico se encontraron alrededor de seis bloques de roca orientados de manera vertical, mientras que en la zona restaurada se encontraron aproximadamente el triple de los anteriores, sin embargo, hay que tomar en cuenta que la zona original es un área más grande con mayor probabilidad de encontrar rocas con esta orientación.

Por último, los daños que se identificaron predominantemente en la fachada norte en ambas zonas (original y restaurada) (Figuras 27 y 28), también corresponden a la incrustación mineral de calcita en areniscas y algunos conglomerados de grano medio y fino, así como también la delaminación presentada en areniscas.

La costra blanca se pudo identificar en areniscas, conglomerados de grano medio y calizas, principalmente acumulada en la zona central de la estructura y de manera contraria algunas rocas de areniscas y el único esquisto en los laterales de la estructura se encontraron con grandes fracturas abiertas, a excepción de una gran grieta que se encuentra atravesando la zona original de la restaurada encontrada casi a la mitad de la fachada (Figura 28).



## FACHADA NORTE (LADO ESTE)

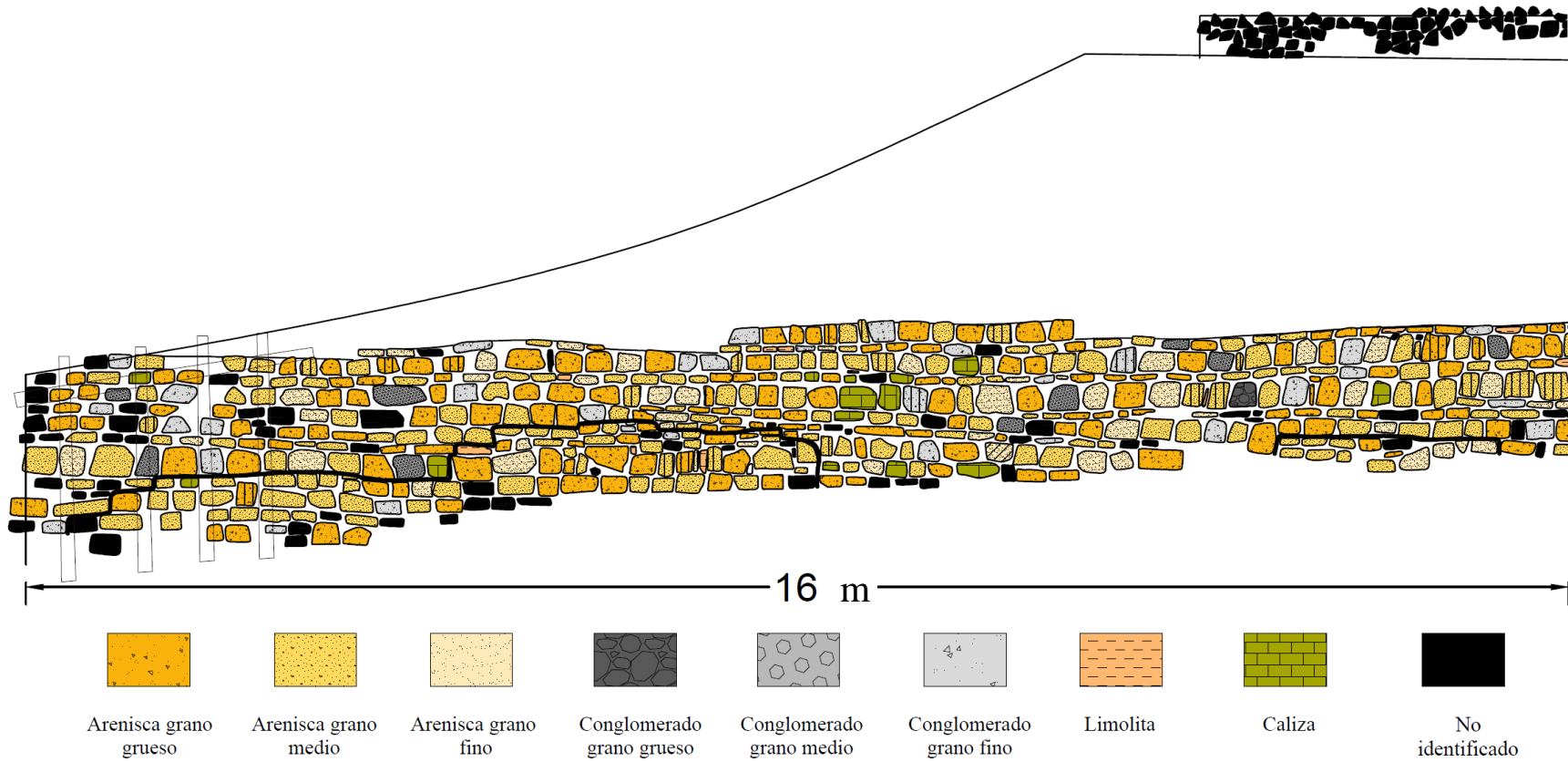


Figura 25. Registro litológico del lado oeste de la fachada Norte del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).

## FACHADA NORTE (LADO OESTE)

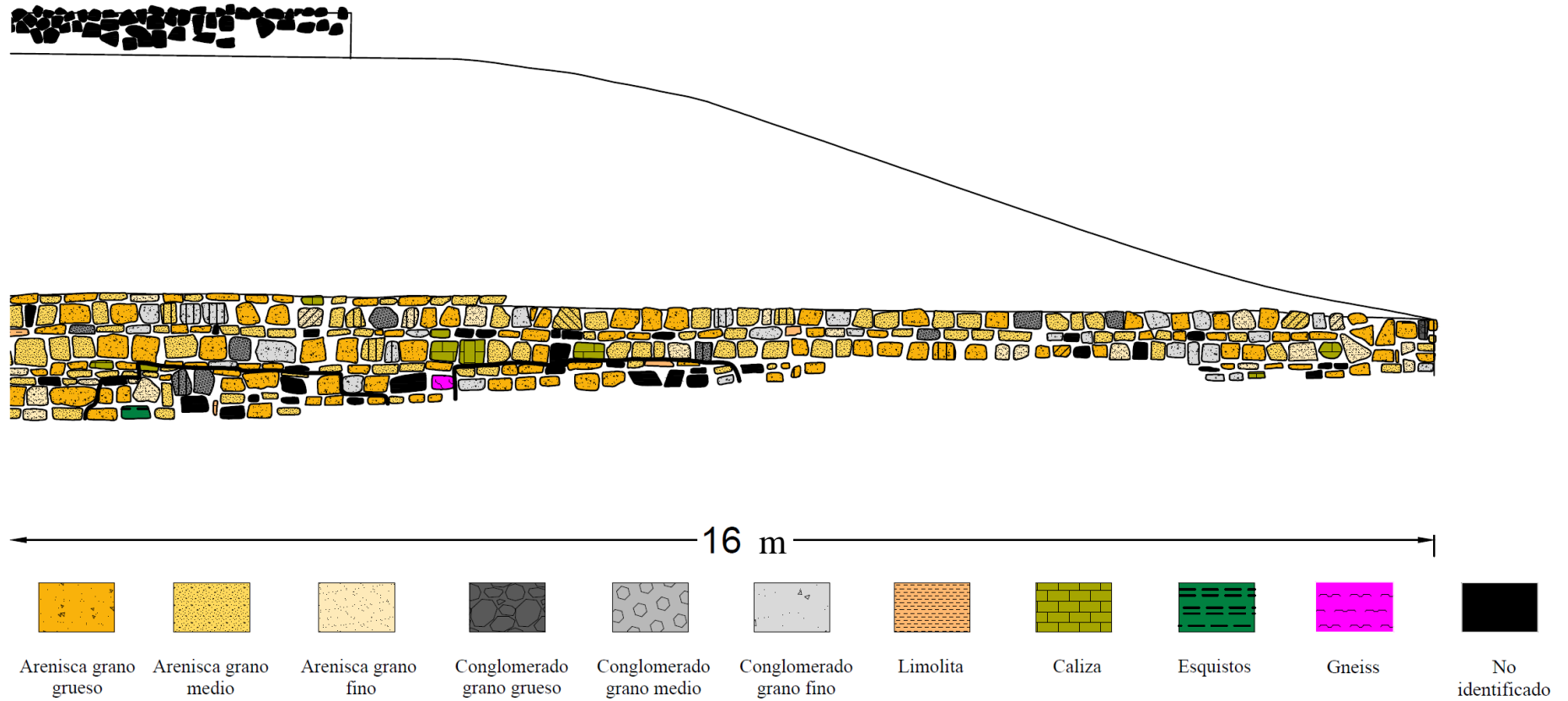


Figura 26. Registro litológico del lado oeste de la fachada Norte del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).

## FACHADA NORTE (LADO OESTE)

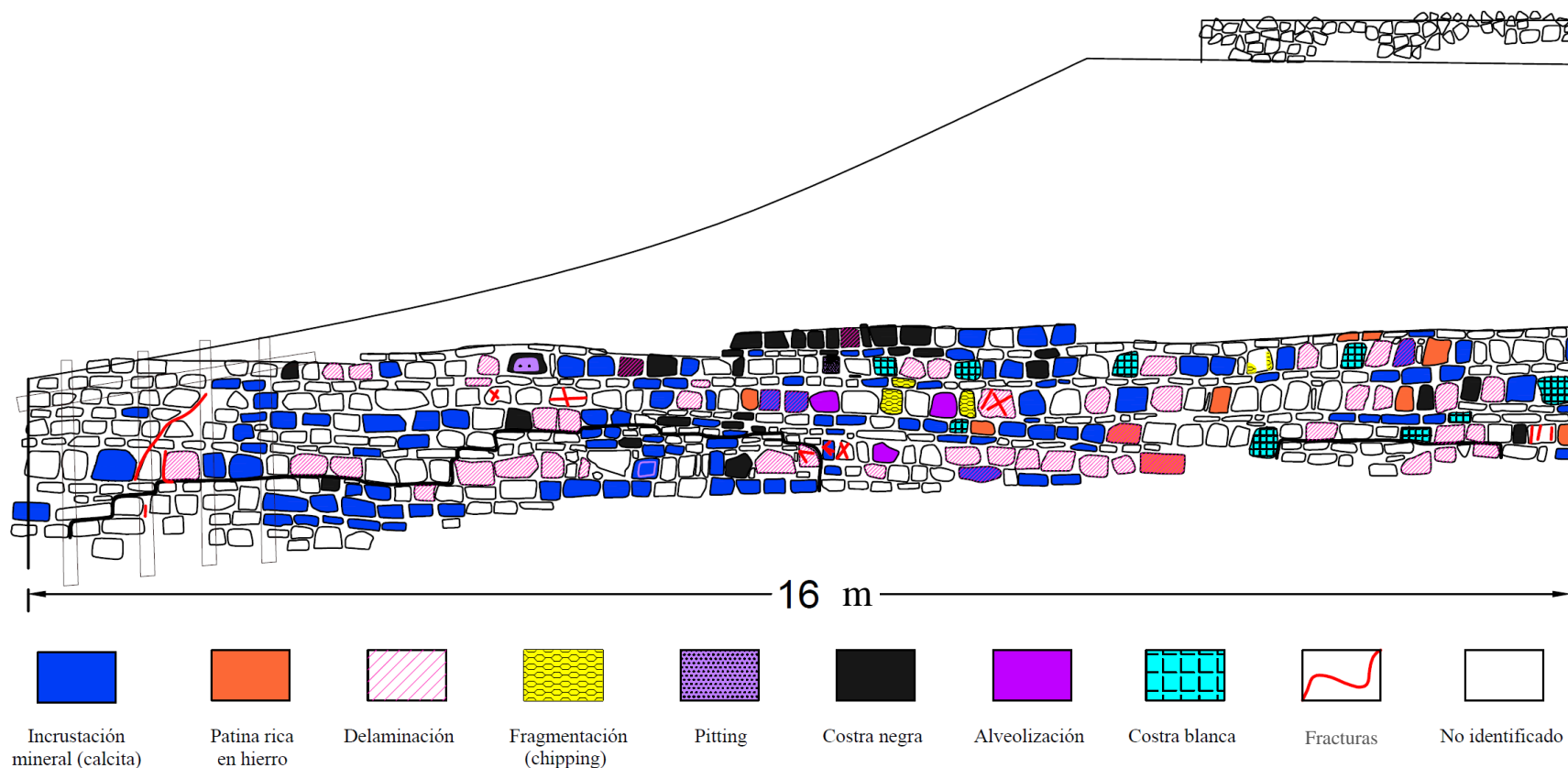


Figura 27. Registro de intensidad de daños del lado este, correspondiente a la Fachada Norte del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).



## FACHADA NORTE (LADO OESTE)

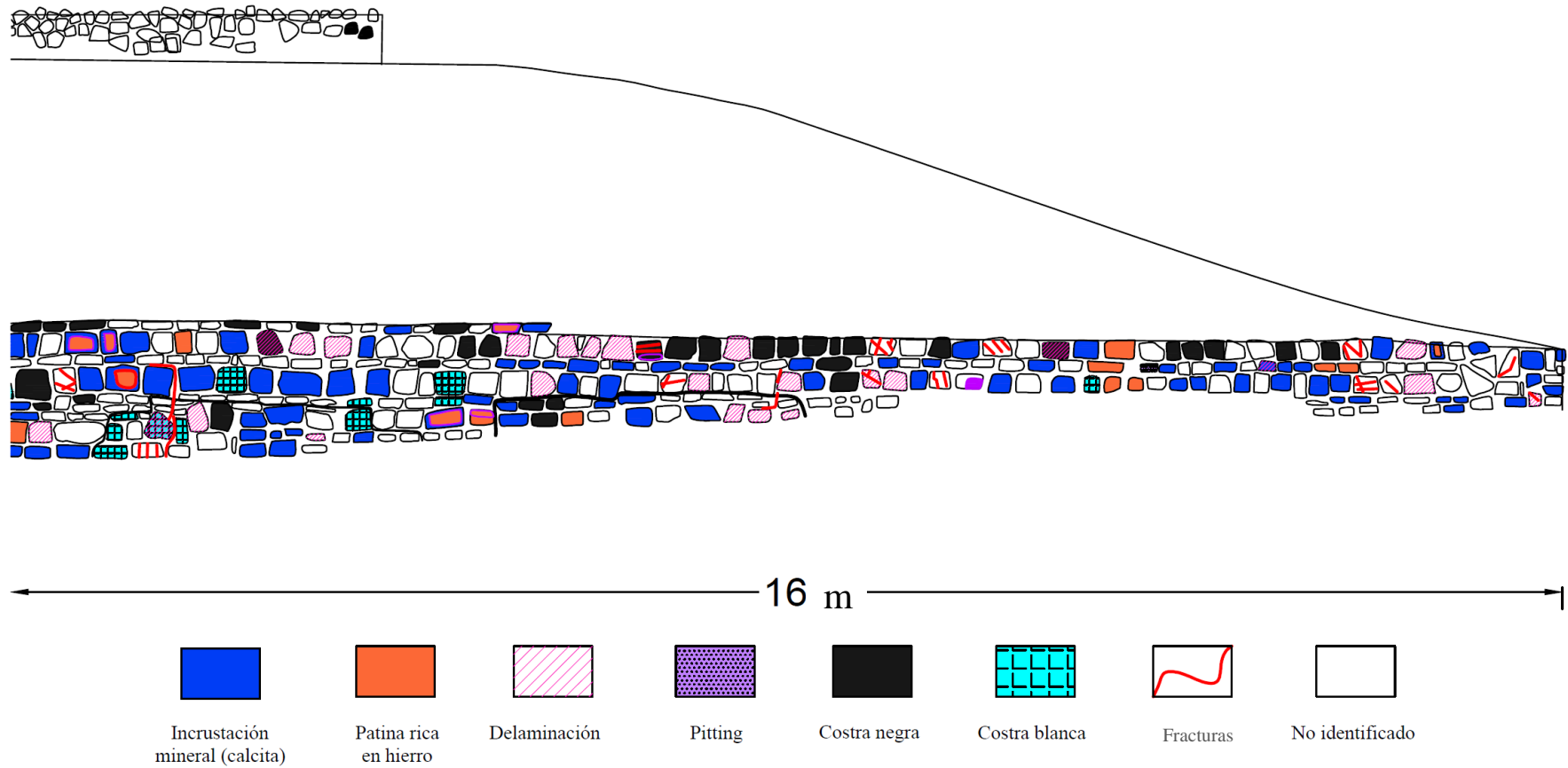


Figura 28. Registro de intensidad de daños del lado oeste, correspondiente a la Fachada Norte del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).

Y de manera minoritaria el *chipping*, la alveolización y la oxidación se presentó en algunas areniscas de forma aleatoria, además, el *pitting* se presenta en una arenisca y un conglomerado fino. En esta pared no se presentó la desintegración (*sanding*), pero las costras negras si se pudieron identificar en algunas rocas en menor cantidad, de la misma manera que en la fachada sur en un conjunto de agrupaciones distribuidas en toda la fachada aleatoriamente.

#### 4.1.4. Fachada oeste



Figura 29. Fachada Oeste del edificio D, en la zona arqueológica de Monte Albán.

Finalmente, la fachada oeste (Figura 29) se caracteriza por tener un área más grande determinada como zona original de la construcción, en la cual el acomodo de las rocas es de una hilada de rocas con orientación vertical hacia la base alternadas con hiladas de roca con orientación horizontal e hiladas de roca labrada en forma de cuadro hacia la cima; además, se encontraron grandes bloques de areniscas y conglomerados de grano medio desde  $30 \text{ cm}^3$  (Figuras 30 y 31 zona original) y hasta  $70 \text{ cm}^3$  (Figura 31) en la base y límites del área delimitada como zona original.

Del mismo modo y de manera general, la presencia de areniscas de las diferentes granulometrías, predominan con respecto al resto de las rocas identificadas y en esta fachada se encontró una gran cantidad de conglomerados de grano medio en bloques grandes.

Para el resto del edificio que corresponde al área que ha sido restaurada, se localizaron un gran número de rocas con orientación vertical en el lado norte de la fachada (Figura 30) y en las partes superiores del lado sur (Figura 31) y así mismo, las rocas de esta fachada de formas irregulares, →

## FACHADA OESTE (LADO NORTE)

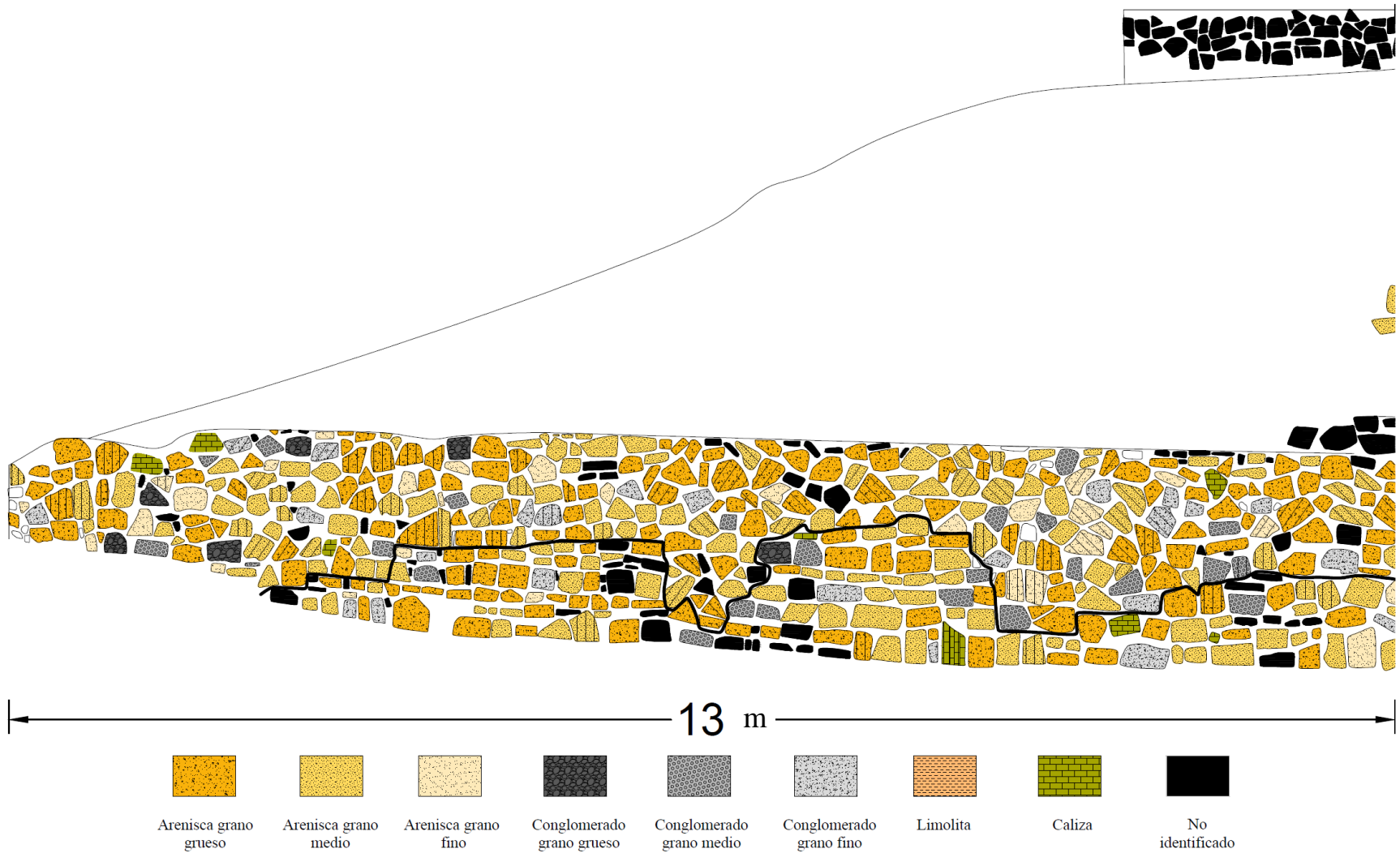


Figura 30. Registro litológico del lado sur de la fachada oeste del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).



## FACHADA OESTE (LADO SUR)

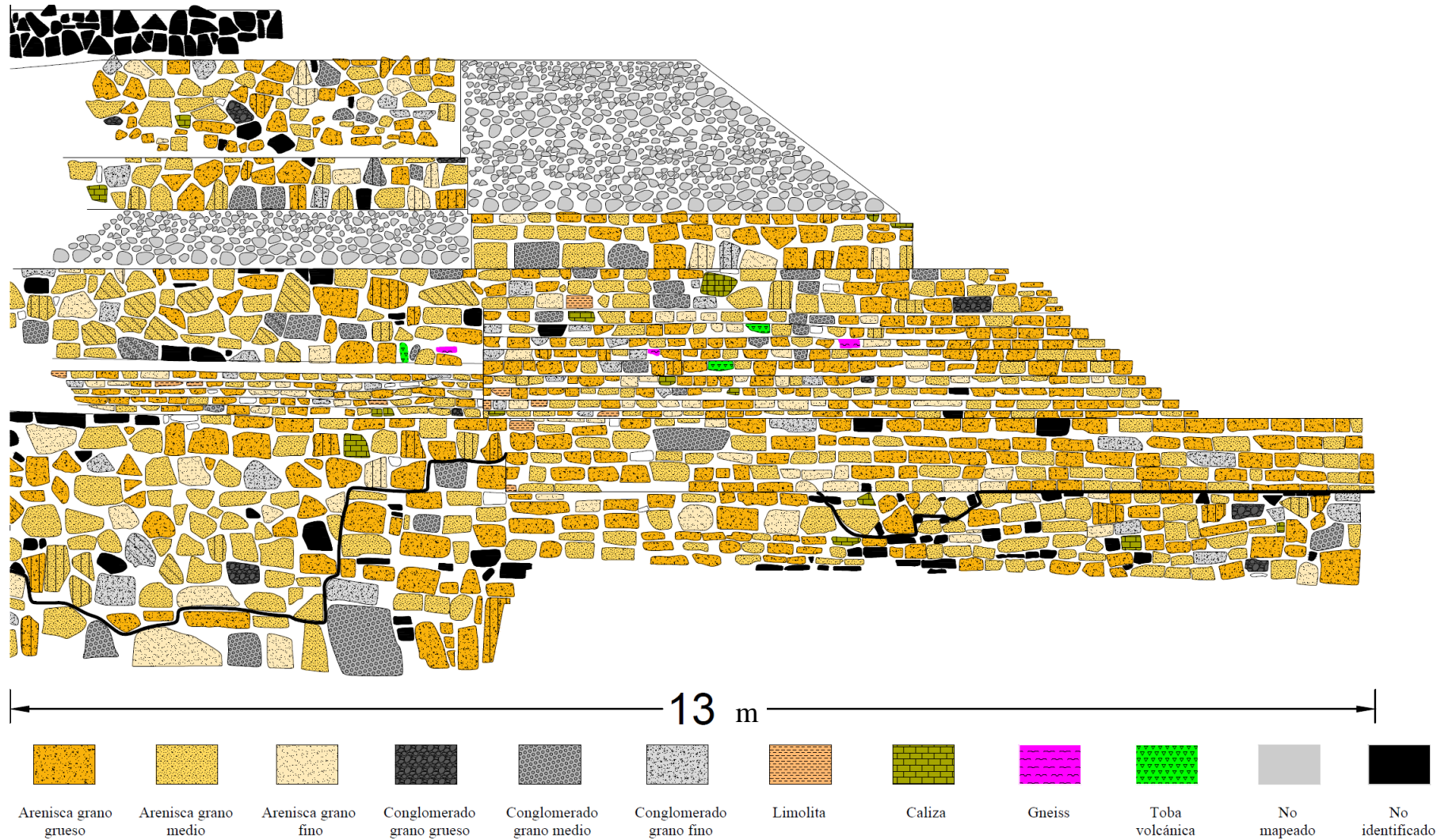


Figura 31. Registro litológico del lado sur de la fachada oeste del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).

### FACHADA OESTE (LADO NORTE)

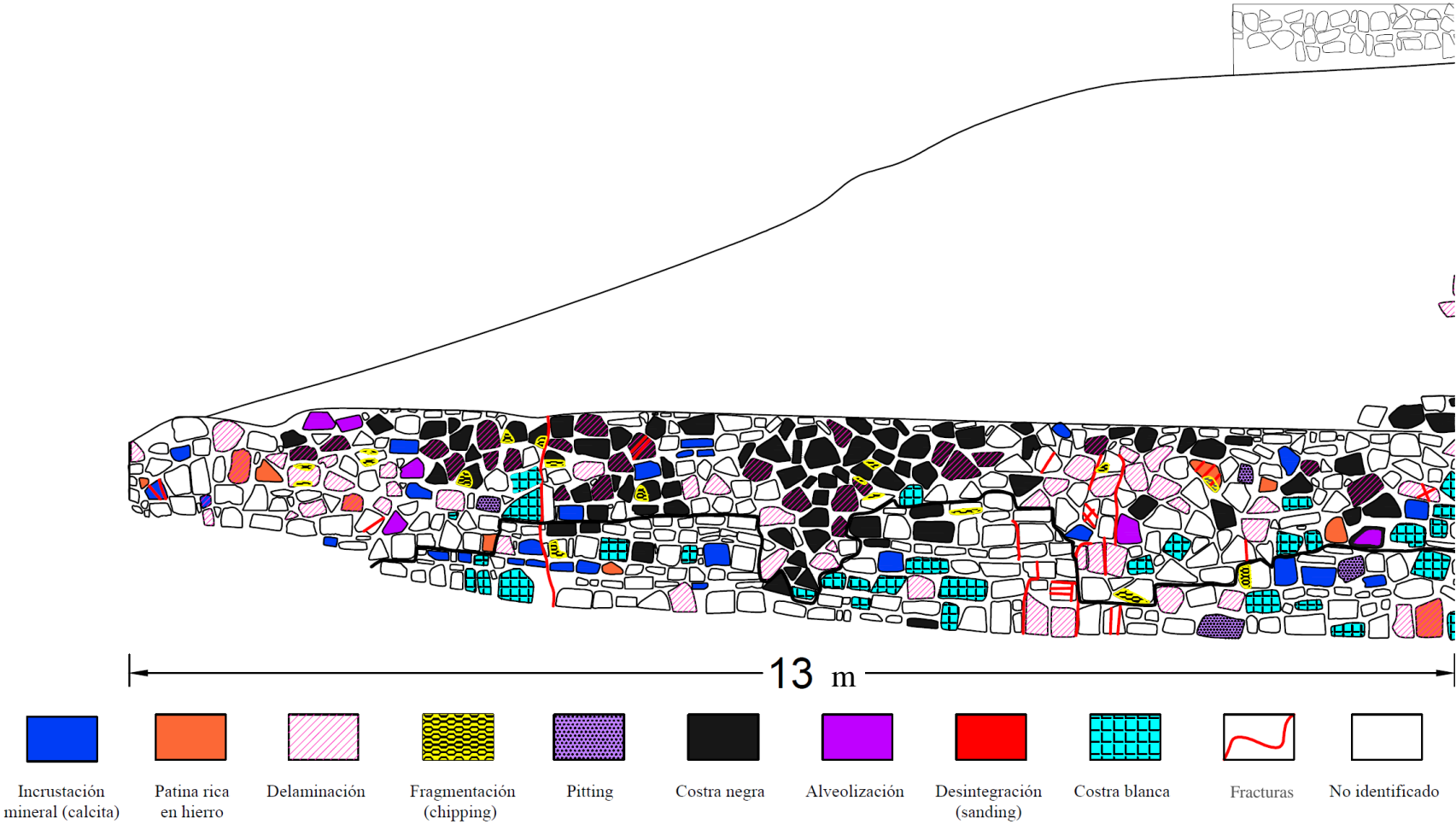


Figura 32. Registro de intensidad de daños del lado norte, correspondiente a la fachada oeste del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).

## FACHADA OESTE (LADO NORTE)

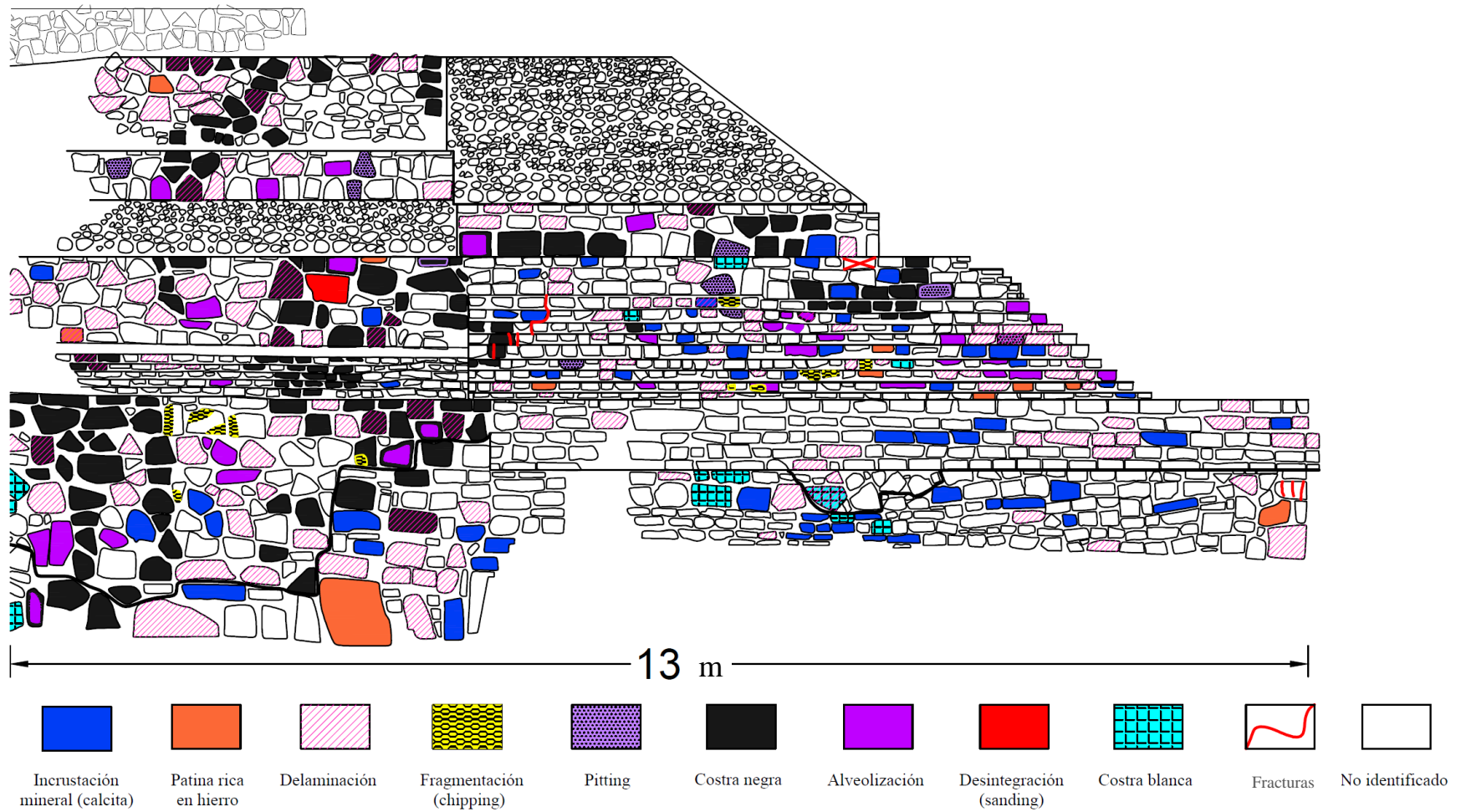


Figura 33. Registro de intensidad de daños del lado norte, correspondiente a la fachada oeste del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).

están dispuestas de manera heterogénea sin un patrón distinguido y por otra parte en esta zona a diferencia de las fachadas anteriores la mayoría de las rocas son bloques grandes de aproximadamente 30 cm<sup>3</sup>.

Posteriormente, pasando al registro de daños, la fachada oeste fue en la que se registró el mayor número de daños (Figuras 32 y 33), al igual que en la fachada sur se encontraron todos los daños que se mencionan en el apartado 4.1.

En la figura 32, se puede observar que dentro de la zona original el principal daño encontrado es la costra blanca en areniscas y conglomerados, es decir se localizó de manera general en la parte bajas del edificio ya que, de la misma manera, aunque en menor cantidad también se localizaron algunas rocas con este daño en el extremo inferior del lado norte de la fachada y algunas partes intermedias correspondiente a la zona restaurada (Figura 33).

Del mismo modo, la delaminación se presenta en gran cantidad distribuida en forma aleatoria en toda la fachada en rocas areniscas y la costra negra nuevamente vuelve a predominar, apareciendo en agrupaciones en toda la fachada, las cuales se pueden observar que adoptan una forma de escurrimientos al igual que en la fachada sur.

Además, se identificaron una gran cantidad de rocas con alveolización, sobre todo en areniscas, pero también en una caliza y conglomerado de grano fino. Y por último también se encontraron grandes fracturas en el lado norte, tales que atraviesan el tablero de la fachada entre la zona original y la zona de restauración.

Para terminar, con respecto a las rocas que se señalan en cada uno de los mapeos litológicos, algunas de las que no se hablaron en las descripciones fueron las rocas volcánicas y metamórficas (toba volcánica y gneis) que se lograron encontrar en todas las fachadas del edificio D de manera minoritaria (al menos una por fachada), es importante recalcar que solo se encontraron en las zonas que ya han sido restauradas, es decir son completamente consideradas como material añadido en las restauraciones pasadas.

## **4.2. Petrografía**

Las rocas sedimentarias cubren alrededor del 80% de la corteza terrestre. Están compuestas principalmente de fragmentos derivados de otras rocas preexistentes de cualquier tipo, consisten fundamentalmente de 3 componentes los cuales pueden estar mezclados en todas proporciones: (1)

componentes terrígenos<sup>4</sup>, (2) componentes aloquímicos<sup>5</sup> y (3) componentes ortoquímicos<sup>6</sup> (Folk, 1969), productos de la solidificación a partir de precipitación química y derivados de las mismas rocas.

Con la finalidad de interpretar la composición mineralógica y establecer algunas características de los materiales principales que forman parte del edificio D, se realizó un análisis petrográfico a cada una de las rocas muestreadas tanto de areniscas (grano grueso, medio y fino) así como conglomerados (grano grueso, medio y fino) y se describen de la siguiente manera.

### ***Descripción microscópica de areniscas***

Entre los componentes clásticos de las areniscas se encuentra el cuarzo cuyo mineral es el más abundante de estas rocas debido a su gran durabilidad, dureza y resistencia. Se suele clasificar como monocristalino para granos de un solo cristal o policristalinos para granos compuestos de dos o más cristales. Los feldespatos también son constituyentes de las areniscas, aunque más inestables dentro de este grupo de rocas, por lo que causan diversos tipos de alteración en ellas y su variedad depende del ambiente tectónico y del clima en que se forman. Además, también dentro de sus componentes se encuentran los fragmentos líticos, minerales accesorios y micas que conforman un componente menor de estas rocas (Barboza-Gudiño, 2012).

*Arenisca de grano fino (MAD-AF):* (Figura 34) se caracteriza por ser mal clasificada y presentar granos sub angulosos que corresponden a un 50% del total de la roca, embebidos en una matriz calcárea con oxidación como alteración (50%); el tamaño de grano que predomina va desde 0.5 mm en su mayoría hasta algunos mayores a 1 mm. Se determinó el cuarzo y feldespato plagioclasa como componente dominante, en especial el cuarzo policristalino de más de 3 cristales en gran cantidad altamente fracturado, además se identificó cuarzo monocristalino de extinción recta y ondulada, así como también distintos fragmentos de roca (Líticos sedimentarios, volcánicos y metamórficos) y también se identificaron feldespatos alcalinos, pero en menor cantidad y raramente algunos piroxenos muy alterados (argilización).

---

4 **Componentes terrígenos:** cristales sueltos, fragmentos de cristales o fragmentos de rocas procedentes de rocas preexistentes por procesos de alteración y disgregación.

5 **Componentes aloquímicos:** Materiales de origen químico o bio-químico formados en la propia cuenca de sedimentación pero que se incorporan al sedimento como clastos.

6 **Componentes ortoquímicos:** Materiales formados por precipitación química o bio-química directa en la propia zona de sedimentación, durante o inmediatamente después del depósito.



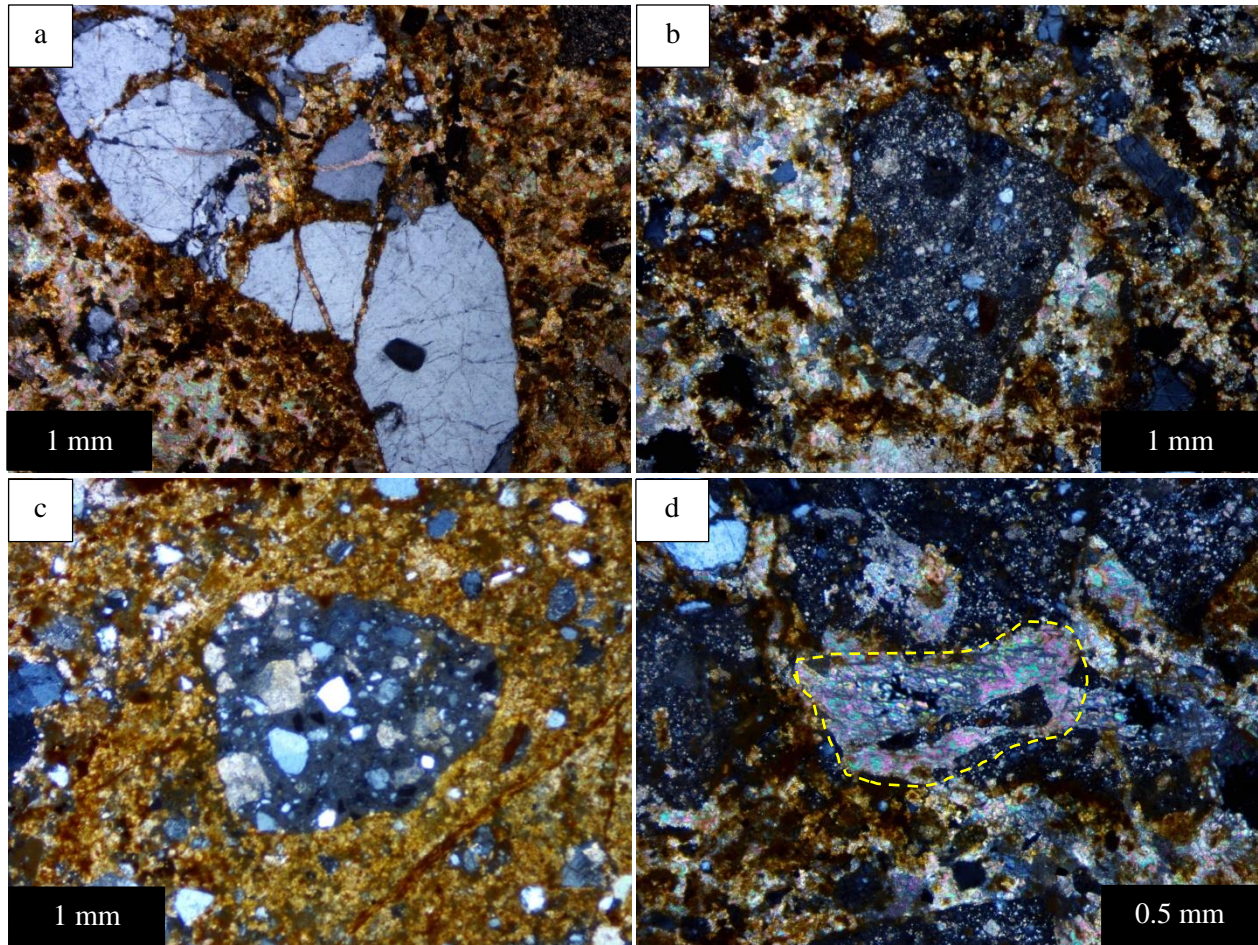


Figura 34. Microfotografía correspondiente a la arenisca de grano fino en donde se puede apreciar la matriz calcárea de color pardo y algunos de sus componentes que corresponden a: a) Qz policristalino de más de 3 cristales muy fracturado, b) Lítico volcánico probablemente correspondiente a una toba volcánica, c) Lítico volcánico Lathwork y c) piroxeno alterado con argilización donde se observa el crucero en 90°.

*Arenisca de grano medio (MAD-AM):* (Figura 35) roca grano soportado con una matriz calcárea de color café a pardo por oxidación que corresponde a aproximadamente el 45% del total de la roca y el resto pertenece a sus componentes donde el tamaño de grano varía de menos de 1 mm hasta 1.5 mm. Sus granos presentan formas angulosas lo que quiere decir que han sido muy poco transportados. Su composición mineral corresponde predominantemente a cuarzos monocristalinos de extinción recta y ondulada y cuarzos policristalinos, además de algunos feldespatos plagioclasa, así como también fragmentos de roca, como líticos metamórficos en su mayoría muy alterados (argilización), líticos sedimentarios pelíticos y líticos volcánicos; por último, se identificaron en menor cantidad feldespatos alcalinos y micas de biotita.



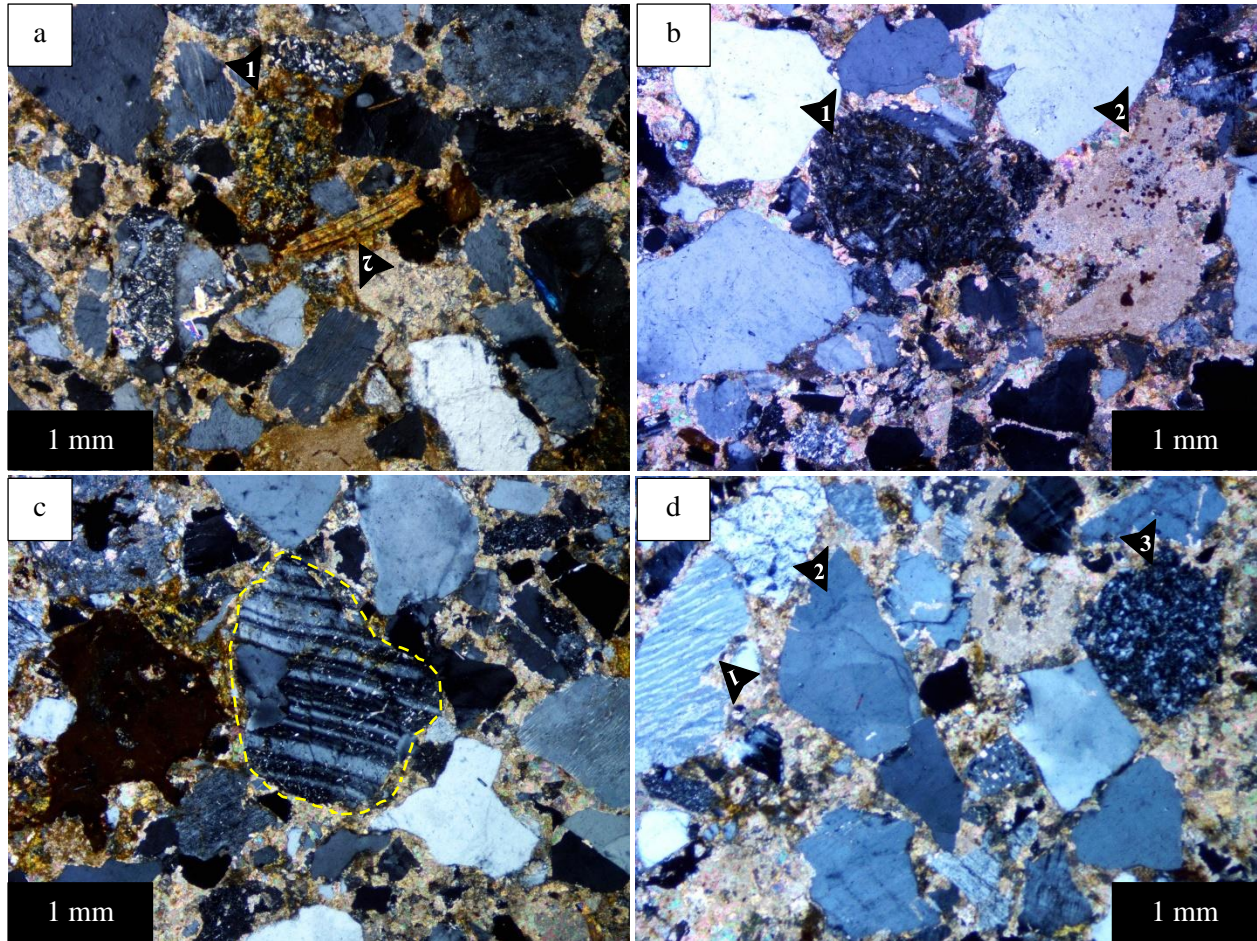


Figura 35. Microfotografía correspondiente a la arenisca de grano medio en donde se puede apreciar la matriz calcárea de color pardo y algunos de sus componentes que corresponden a: a) Lítico metafelsítico de grado 4 (1), biotita (2) y se puede apreciar alrededor un conjunto de cuarzos monocristalinos, b) lítico volcánico microlítico (1) y lítico sedimentario carbonatado (2), c) plagioclasa y d) Qz monocristalino con textura mirmequítica (1), Qz policristalino (2) y lítico volcánico felsítico (3).

*Arenisca de grano grueso (MAD-AG):* (Figura 36) arenisca mal clasificada con textura grano soportada, donde sus granos representan aproximadamente el 90% del total de la roca y su matriz de color café tan solo un 10%. Se caracteriza por tener gran cantidad de componentes que llegan a medir hasta 3 mm, de los cuales predominan en su mayoría los cuarzos policristalinos de más de tres cristales, además de cuarzos monocristalinos de extinción recta y ondulada, donde algunos de ellos presentan textura mirmequítica; por otra parte se encontró menor variedad de líticos en esta roca, más sin embargo se identificaron gran cantidad de líticos metamórficos y líticos sedimentarios y por ultimo de manera minoritaria se identificaron plagioclasas y feldespatos alcalinos.



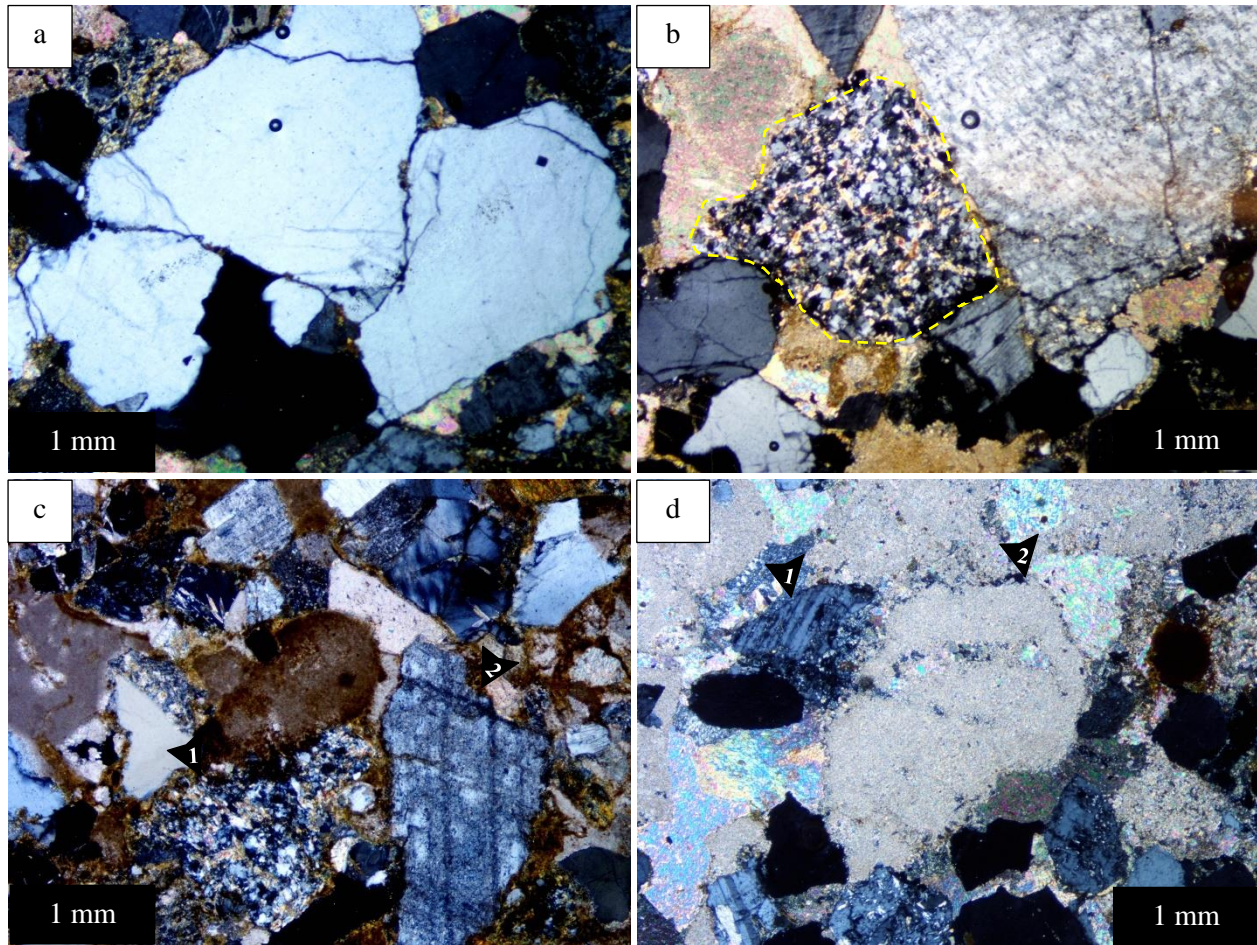


Figura 36. Microfotografía correspondiente a la arenisca de grano grueso en donde se puede apreciar la matriz calcárea de color café, donde algunos de sus componentes corresponden a: a) Qz policristalino, b) lítico metafelsítico de grado 2, c) lítico metafelsítico de grado 2 (1), feldespato (2) y cuarzos alrededor, d) plagioclasa y lítico sedimentario carbonatado (2).

### ***Descripción microscópica de conglomerados***

El principal criterio para definir un conglomerado es el tamaño de los clastos y los tipos de roca, así como sus parámetros descriptivos que se refieren a la fábrica, tamaño y clasificación de los guijarros, variedad litológica, y cantidad de matriz. La composición de la matriz puede ser variable (carbonato, siliciclásticos, matriz y/o cemento). Los ortoconglomerados se caracterizan por ser grano soportados o por clastos embebidos en una matriz arenosa y para las rocas en que los clastos se encuentran embebido en una matriz fina o lodosa se les denomina paraconglomerados (Flügel, 2004).

*Conglomerado de grano fino (MAD-CF):* (Figura 37) ortoconglomerado polimíctico constituido en un 80% por material tamaño granulo (aproximadamente 2 mm en promedio) y el resto



corresponde a una matriz calcárea de color café grisáceo; los gránulos son mal clasificados, subredondeados a redondeados, de baja esfericidad. Presenta una composición de clastos formada por gran cantidad de fragmentos líticos que corresponden a fragmentos carbonatados con presencia de fauna como lo son foraminíferos bentónicos, fragmentos de algas bivalvos y fragmentos de braquiópodos, también componente aloquímicos y además también se encontraron líticos metamórficos y líticos volcánicos; también contienen gran cantidad de cuarzos mono y policristalinos y por último, estos conglomerados se distinguen por contener mega cristales de flujo como plagioclasas, las cuales indican un origen pegmatítico.

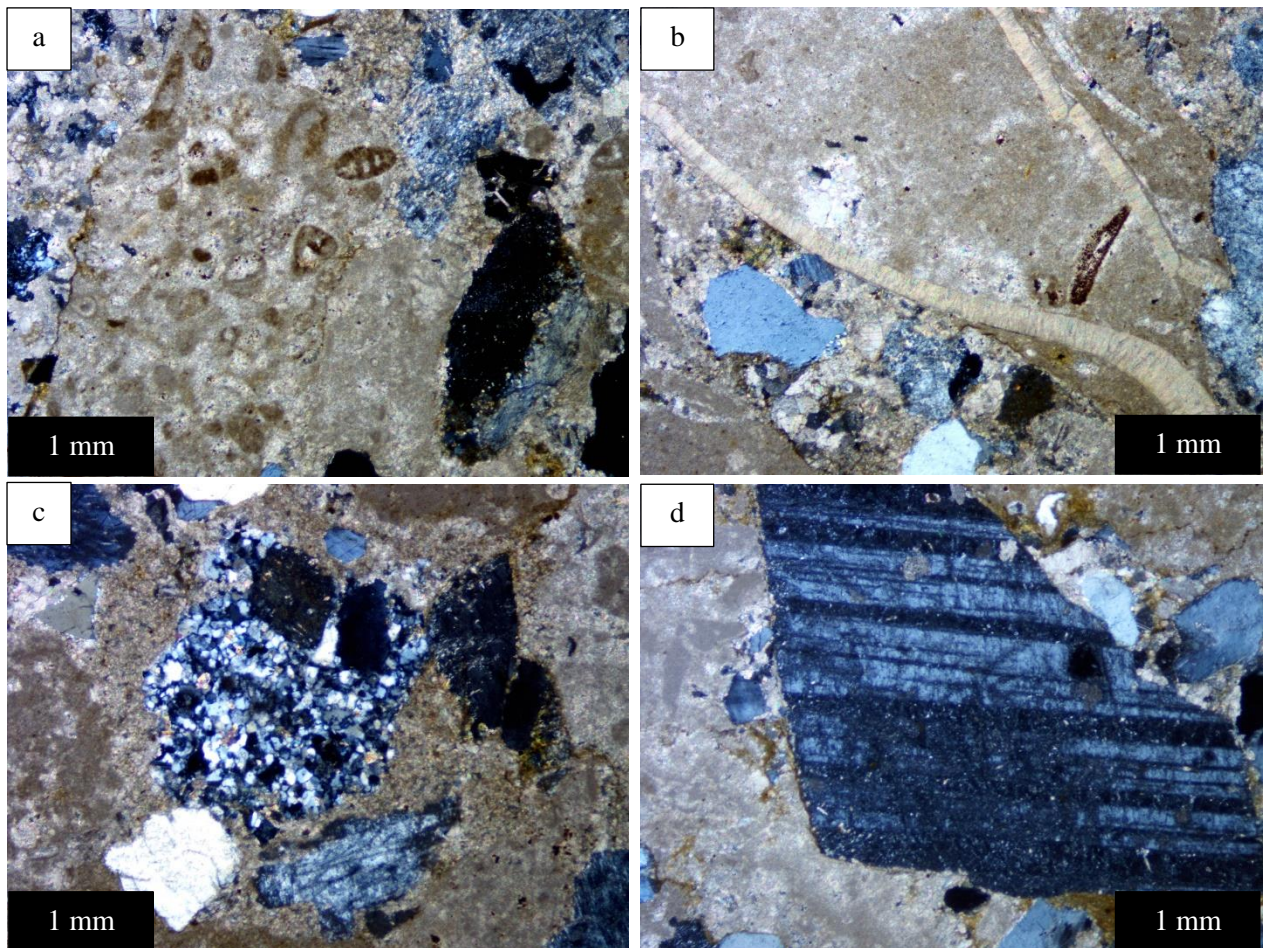


Figura 37. Microfotografía correspondiente al conglomerado de grano fino en donde se puede apreciar la matriz calcárea de color café grisáceo donde sus componentes corresponden a: a) pelets y foraminíferos, b) fragmento de braquiópodo, c) Lítico metafelsítico de grado 1 y d) Mega cristal de plagioclasa.

*Conglomerado de grano medio (MAD-CM):* (Figura 38) se compone principalmente en 90% de diverso material tamaño guijo donde sus granos llegan a medir hasta 4 mm, por lo que corresponde a un ortoconglomerado polimíctico mal clasificado. Entre sus clastos principales se encontró en



particular gran cantidad de cuarzo policristalino, además de cuarzo monocristalino; sus fragmentos líticos corresponden a líticos calcáreos los cuales presentan componentes aloquímicos como pelets y algunos fósiles como foraminíferos y se encontraron también grandes líticos volcánicos y metamórficos, además de minerales accesorios como micas de moscovita y granates.

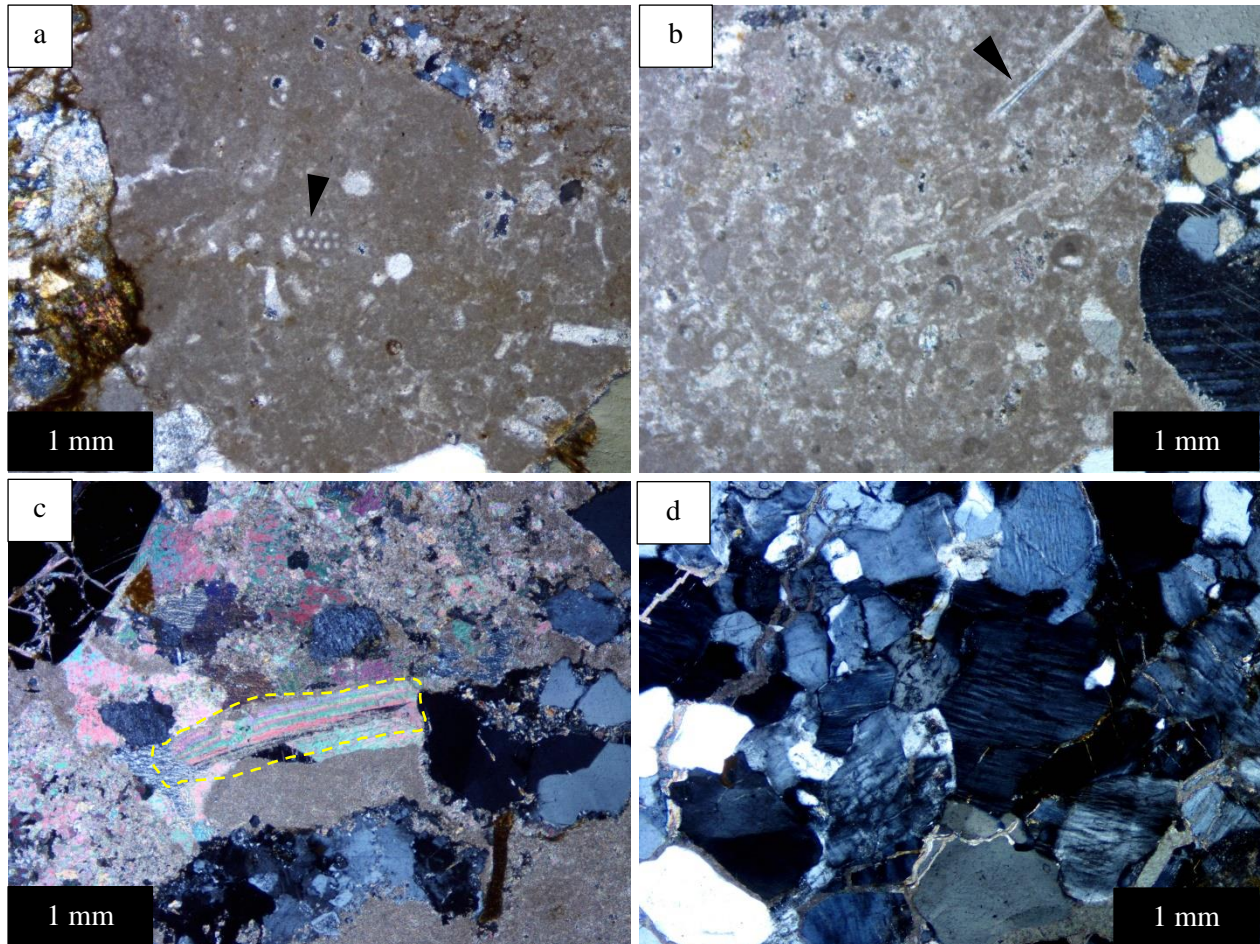


Figura 38. Microfotografías correspondientes al conglomerado de grano medio en donde se puede observar: a) Lítico calcáreo donde se puede apreciar la presencia de pelets y un foraminífero biserial con relleno micrítico (flecha negra), b) lítico calcáreo con espículas (flecha negra), c) moscovita y d) lítico volcánico felsítico.

*Conglomerado de grano grueso (MAD-CG):* (Figura 39) roca grano soportada, donde la matriz calcárea es escasa y sus guijos mal clasificados corresponden a más del 95% del total de la roca, los cuales se caracterizan por ser fragmentos de roca de gran tamaño desde 4 mm hasta más de 1 cm en su mayoría y corresponden principalmente a líticos carbonatados con fósiles, además de líticos volcánicos y líticos metamórficos; también se identificaron gran cantidad de cuarzo policristalino y se encontraron grandes granates altamente fracturados característicos de esta roca.



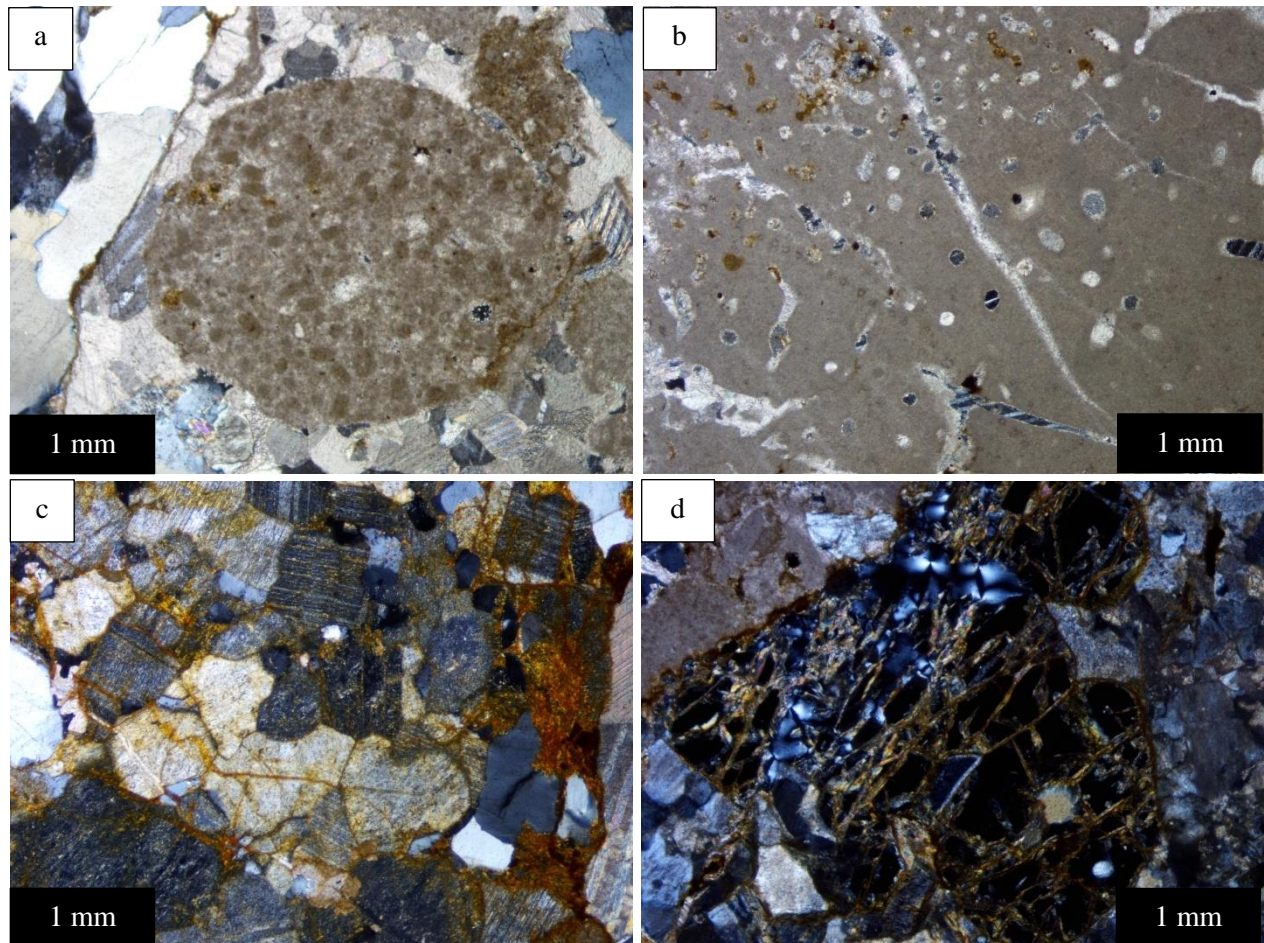


Figura 39. Microfotografías correspondientes al conglomerado de grano grueso con matriz calcárea en donde se puede observar: a) Lítico calcáreo con pelets, b) fragmento de alga, c) fragmento de roca donde se puede observar la presencia de cuarzos monocristalinos y feldespatos plagioclasa con oxidación y d) fragmento de granate con gran cantidad de fracturas rellenas de oxidación.

#### 4.3. Mediciones *in situ*: humedad-temperatura

Con la finalidad de monitorear las condiciones de humedad-temperatura que adquiere una roca frente a las condiciones ambientales del lugar en el que se encuentra, se realizaron una serie de mediciones en diferentes tipos de rocas de cada una de las fachadas del edificio D.

Las mediciones se realizaron en dos etapas, la primera en época de secas y la segunda en época de lluvias, en tres horarios diferentes durante el día (9, 12 y 15 hrs) tanto en areniscas, conglomerados y calizas como se puede observar en la figura 40; esto con la finalidad de observar el cambio de humedad y temperatura que las rocas alcanzan de acuerdo con la orientación de la fachada a la cual corresponden.

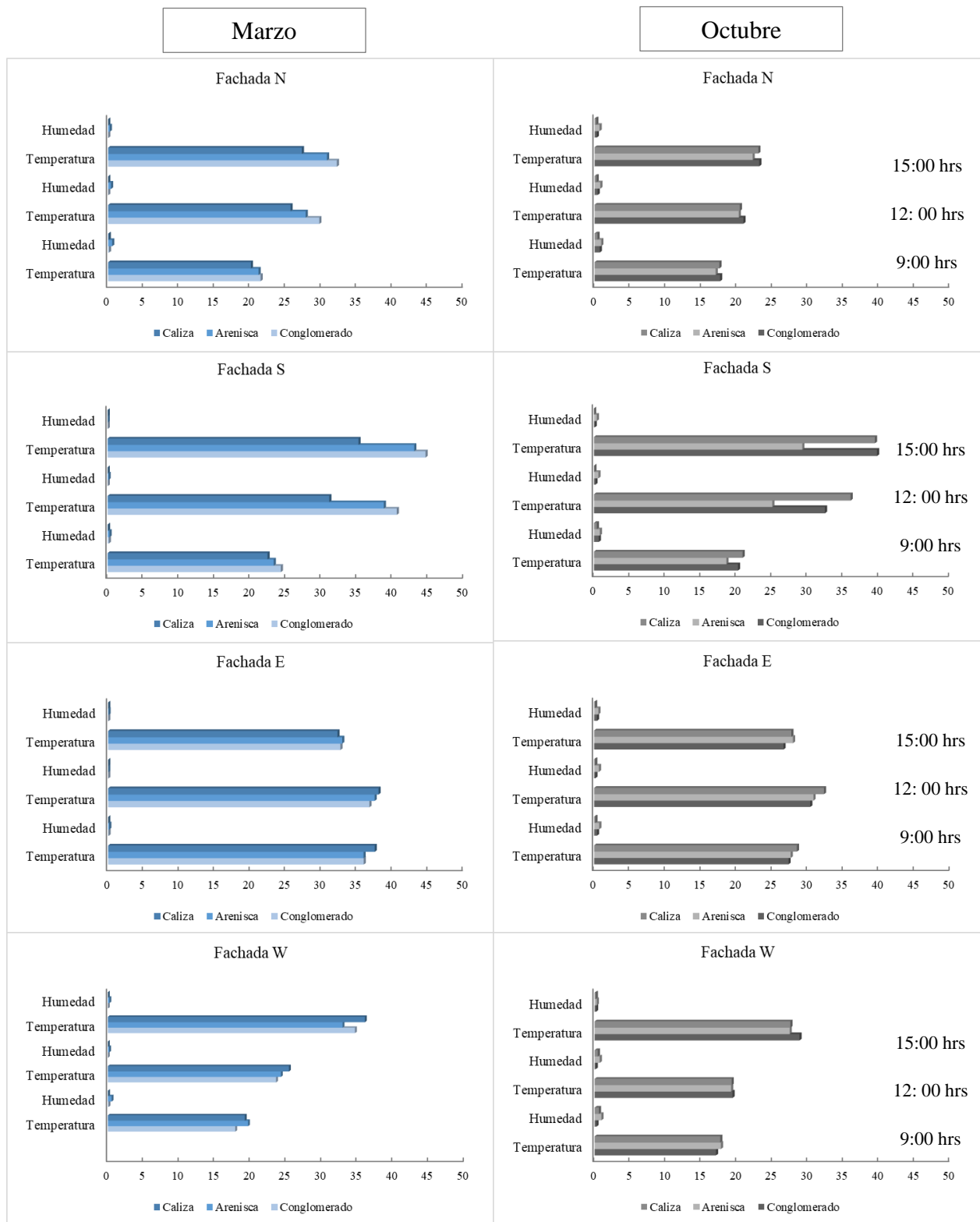


Figura 40. Gráficos correspondientes a los valores obtenidos de humedad-temperatura en cada una de las fachadas, divididas en dos de las etapas en las cuales fueron medidos.

Se registraron valores muy bajos de absorción sobre todo durante la primera toma de datos durante el mes de marzo. Sin embargo, el valor más significativo de humedad se pudo obtener durante el mes de octubre en la fachada Norte correspondiente a las areniscas y de igual manera en la fachada Oeste.

Además, los máximos de temperatura se obtuvieron principalmente en la fachada sur donde se registraron hasta 45° C en conglomerados y seguido de estos, los valores sobresalientes de temperatura se registraron en la fachada este y oeste.

#### 4.4. Pruebas petrofísicas

##### 4.4.1. Densidad y porosidad

Mediante la prueba de pesaje hidrostático (sección 3.1.1.) fue posible obtener datos de porosidad, densidad (densidad de matriz y densidad aparente) y absorción al vacío. En este apartado fueron analizadas 8 muestras de roca del tipo areniscas y 7 muestras de conglomerados, en sus tres distintas granulometrías que fueron recolectadas en campo (grano fino, medio y grueso) (Tabla 3).

Tabla 3. Datos obtenidos de la prueba de porosidad-densidad mediante el método de Arquímedes

Tipo de roca	Muestra	Porosidad (%)	Densidad de Matriz (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (Bulk)(g/cm <sup>3</sup> )	Absorción al vacío (%)
<b>Arenisca grano fino</b>	MAD-F	8.594	2.661	2.432	3.534
<b>Arenisca grano medio</b>	MAD-M	1.705	2.667	2.621	0.650
<b>Arenisca grano grueso</b>	MAD-G1	3.131	2.705	2.620	1.195
	MAD-G2	3.004	2.696	2.615	1.149
	MAD-G3	3.182	2.710	2.624	1.213
	MAD-G4	2.894	2.686	2.608	1.109
	MAD-G5	2.655	2.677	2.606	1.019
	MAD-G6	3.324	2.689	2.600	1.278
<b>Conglomerado grano fino</b>	MAC-F1	1.918	2.679	2.628	0.730
	MAC-F2	1.344	2.671	2.635	0.510
<b>Conglomerado grano medio</b>	MAC-M1	1.931	2.685	2.633	0.733
	MAC-M2	1.662	2.683	2.639	0.630
	MAC-M3	2.102	2.687	2.630	0.799
<b>Conglomerado grano grueso</b>	MAC-G1	1.238	2.691	2.658	0.466
	MAC-G2	1.189	2.685	2.653	0.448

Entre los valores de porosidad para areniscas de grano grueso se obtuvieron valores en promedio de 3% del total de su peso y para areniscas de grano medio tan solo el 1.7%, por lo que según la clasificación de von Moos y Quervain (1948) son rocas poco porosas a ligeramente porosas, sin embargo, aunque con un valor no muy alto, la arenisca de grano fino destaca de entre ellas ya que se clasifica como una roca significativamente porosa. En cuanto a los conglomerados los valores de porosidad oscilan entre 1.2% a 1.8% en sus 3 granulometrías por lo que de igual manera corresponden a rocas poco porosas.

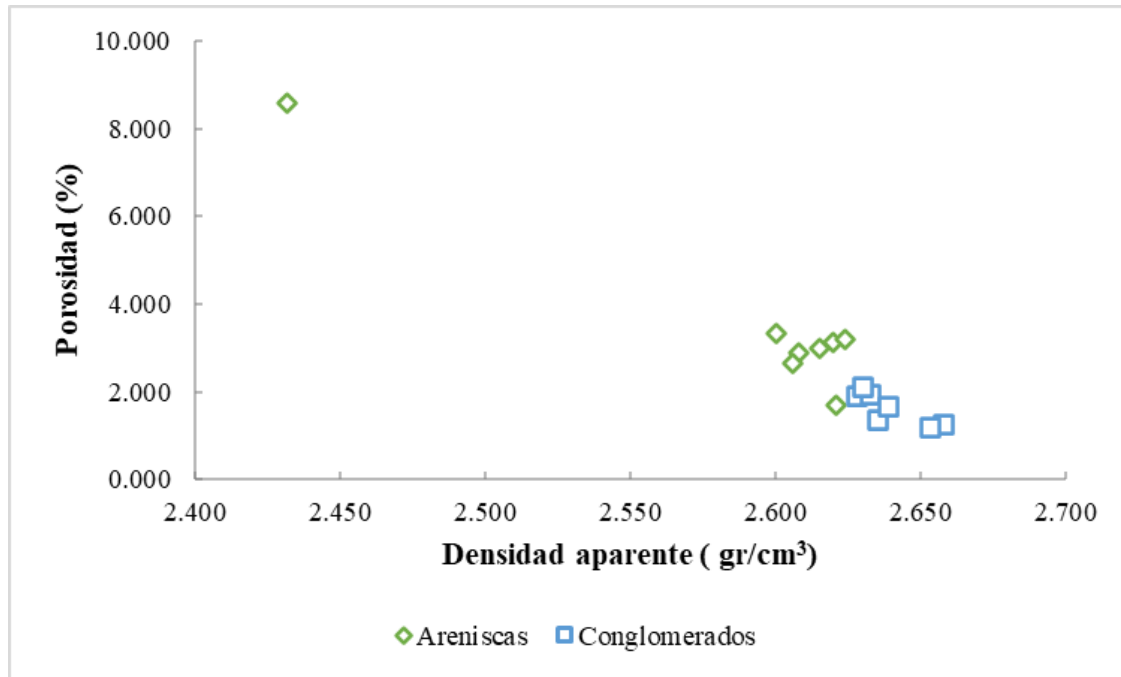


Figura 41. Grafica de porosidad vs densidad aparente correspondiente a muestras de areniscas y conglomerados.

Además, en la figura 37 se puede observar la correlación que existe entre la porosidad y la densidad obtenida para cada una de las rocas, las cuales muestran valores de 2.6 g/cm<sup>3</sup> en promedio tanto para areniscas como conglomerados, a excepción de la arenisca de grano fino que mostro una menor densidad debido a su valor en porosidad.

#### 4.4.2. Absorción de agua por capilaridad

Con la finalidad de comprobar las propiedades de absorción de las rocas de acuerdo con su orientación, 6 ejemplares fueron sometidos a la prueba de absorción por capilaridad, los cuales corresponde a 3 areniscas en sus tres granulometrías (grano fino, medio y grueso) y además 3 conglomerados de igual manera en sus tres granulometrías (grano fino, medio y grueso) (Tabla 4).

Las muestras de roca fueron medidas en dos de sus superficies, es decir la superficie horizontal (XY) y la superficie vertical (XZ), por lo que mediante los valores arrojados se puede observar en primer lugar que la absorción de agua medida en cada uno de los ejemplares no rebasa más del 1%, siendo la muestra de conglomerado medio la que obtuvo una mayor absorción en su superficie XY, sin embargo, durante esta prueba, se pudo percibir que en la arenisca de grano fino y el conglomerado de grano medio, no influyo de manera directa la orientación de la roca durante el proceso de absorción (Figura 38).

Tabla 4. Valores obtenidos de la prueba de absorción por capilaridad

Tipo de roca	Muestra	Peso total (g)	Absorción (%)	
			Superficie XY	Superficie XZ
Arenisca grano fino	MAD-F	749.82	0.415	0.305
Arenisca grano medio	MAD-M	771.94	0.373	0.624
Arenisca grano grueso	MAD-G2	817.45	0.368	0.557
Conglomerado grano fino	MAC-F1	660.14	0.000	0.545
Conglomerado grano medio	MAC-M1	666.98	1.006	0.000
Conglomerado grano grueso	MAC-G2	678.4	0.203	0.262

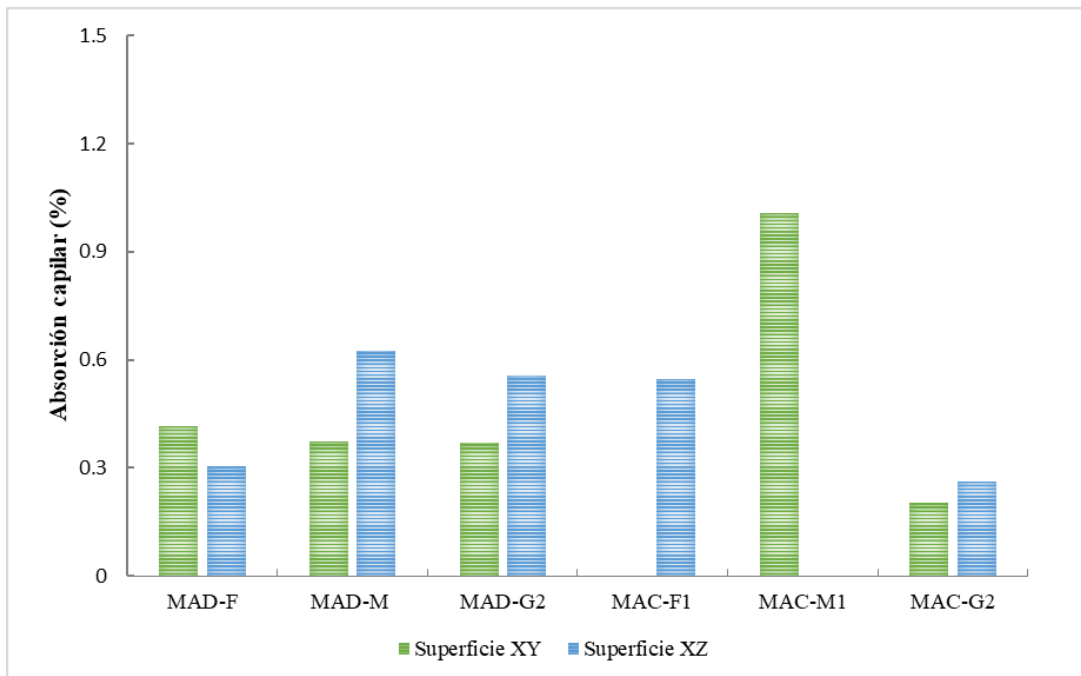


Figura 42. Valores de la prueba de absorción capilar en areniscas y conglomerados.



#### 4.4.3. Resistencia a la compresión uniaxial

La prueba de compresión uniaxial se realizó en condiciones secas para cada uno de los ejemplares de arenas de grano fino (MAD-F), medio (MAD-M) y grueso (MAD-G2), así como también para conglomerados de grano fino (MAC-F1), medio (MAC-M2) y grueso (MAC-G2).

Los valores para cada una de ellas de las muestras fueron muy desiguales, siendo la arena de grano medio la de resistencia más alta (91.2 Mpa) y el conglomerado de grano medio el de la resistencia más baja (27.08 Mpa).

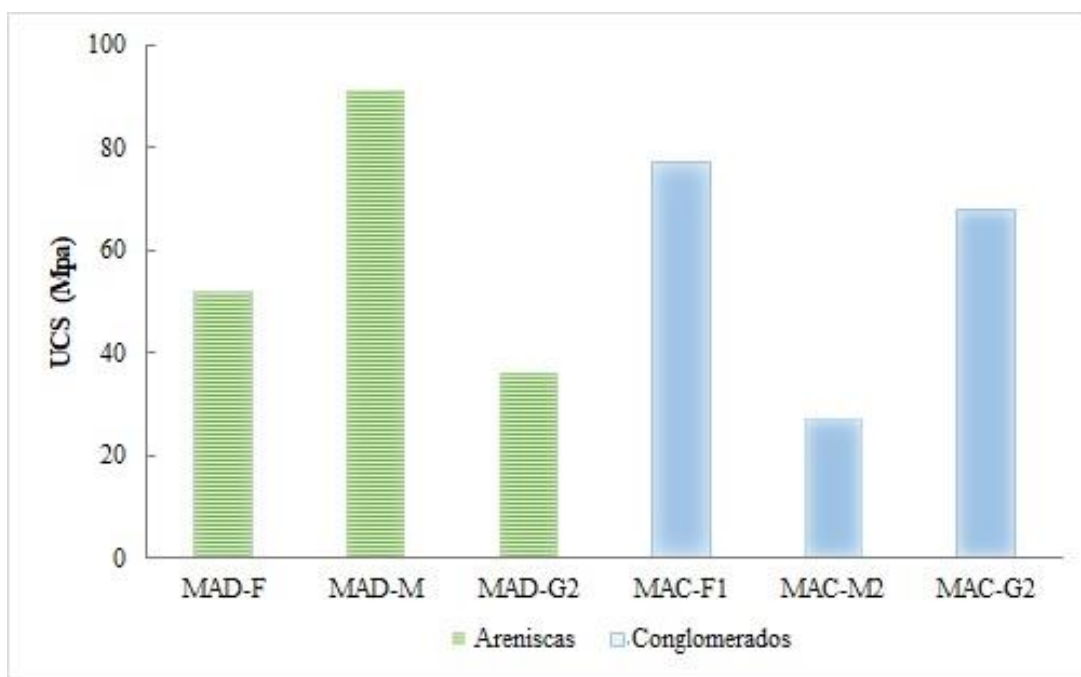


Figura 43. Valores obtenidos de la prueba de UCS en Mpa.

## 5. EVALUACIÓN GEOQUÍMICA Y FÍSICA DE LOS MORTEROS DE LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE MONTE ALBÁN

Con el fin de conocer la composición y diferenciación del cambio de material entre los morteros considerados como material original de construcción y los morteros de ahora utilizados como material de restauración, en el presente capítulo se darán a conocer los resultados obtenidos durante los análisis químicos y cuantitativos de cada una de las muestras recolectadas de morteros.

Se recolectaron un total de 15 muestras de mortero, las cuales 10 corresponden a material original que sin conocer su composición fueron tomadas del edificio VG de diferentes zonas (Figura 44) y además las 5 muestras restantes corresponden a las muestras de mortero que actualmente el equipo de trabajo de Monte Albán elabora para las restauraciones, para los cuales se conoce algunos de los agregados que se utilizaron para su conformación.



*Figura 44. Recolección de muestras de morteros originales tomadas de la fachada sur en el edificio VG: a) Pozo 4 en alfarda sur, b) pisos encontrados en el pozo 4, c) juntas correspondientes al segundo cuerpo de la fachada sur, d) firme correspondiente al segundo cuerpo de la fachada sur y e) zona de excavación en la fachada sur donde se pudo obtener un núcleo de tierra.*

En tabla 5 se enlistan las claves de los morteros que fueron muestreados y los análisis que se realizaron a cada uno de ellos y asimismo se describen las zonas de donde fue posible recolectarlos (morteros originales) y los agregados de los que se tiene conocimiento que son utilizados para conformar el mortero de restauración.

Tabla 5. Clave de muestra de morteros históricos y de restauración, donde define su toma de muestra y los análisis que se le realizaron a cada uno

	Muestra de mortero	Descripción de la toma de muestra	Análisis realizados				
			DRX	LFRX	ICP-MS	Granulometría y componentes	FTIR
Mortero histórico	SP4P3	Piso 3 Fachada Sur, Alfarda Sur, Pozo 4	x		x	x	x
	SP4P2	Piso 2 Fachada Sur, Alfarda Sur, Pozo 4	x	x	x	x	x
	SP4J	Juntas Fachada Sur, Alfarda Sur, Pozo 4	x	x	x	x	x
	SP4BP2	Bajo Piso 2 Fachada Sur, Alfarda Sur, Pozo 4	x	x	x	x	x
	SRPL	Relleno de plataforma Fachada Sur, Alfarda Sur	x		x	x	x
	SP4P2-S	Piso 2-superficie Fachada Sur, Alfarda Sur, Pozo 4	x		x	x	x
	SP4BP3	Bajo piso 3 Fachada Sur, Alfarda Sur, Pozo 4	x		x	x	x
	J3	Juntas Fachada Sur, segundo cuerpo fachada sur	x	x	x	x	x
	NT4	Núcleo de tierra Fachada Sur, segundo cuerpo fachada sur	x		x	x	x
	F1	Firme Fachada Sur, segundo cuerpo fachada sur	x		x	x	x
Mortero de restauración	AC1	Juntas. Cal hidratada con arena colada.	x	x	x	x	x
	ACS3	Capa de sacrificio. Cal, hormigón (arena colada) y arena.	x	x	x	x	x
	AJG	Juntas Cal hidratada con arena gruesa	x	x	x	x	x
	CAG4	Capa de sacrificio Cal hidratada, arena y granzón.	x	x	x	x	x

### 5.1. Resultados de la caracterización geoquímica con Fluorescencia de rayos X (LFRX) (cuantitativo por elementos mayores)

Con el fin de caracterizar químicamente los morteros se analizaron por una parte 8 de las muestras anteriormente mencionadas mediante el análisis cuantitativo de elementos mayores, que corresponden a 4 de los morteros históricos y 4 muestras de morteros actuales (Tabla 6).

Los elementos mayores (>1%) que son Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K y P, se midieron en forma de óxidos, los cuales nos ayudaran a analizar y comparar la composición entre lo que son los morteros históricos y los recientemente utilizados durante las restauraciones.

Tabla 6. Resultados de LFRX, % en peso de los óxidos.

		Concentración de elementos mayores										
		%	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
<b>Mortero histórico</b>	<b>SP4P2</b>	39.778	0.567	8.062	2.723	0.081	0.874	43.954	0.793	1.991	0.55	
	<b>SP4J</b>	39.777	0.534	8.073	2.728	0.098	0.856	44.383	0.8	1.994	0.056	
	<b>SP4BP2</b>	35.413	0.424	7.676	2.277	0.071	0.664	49.875	0.862	1.654	0.551	
	<b>J3</b>	41.445	0.621	8.532	3.156	0.097	0.925	40.976	0.746	1.974	0.663	
<b>Mortero de restauración</b>	<b>AC1</b>	61.075	0.817	10.586	1.198	0.032	0.634	19.495	2.869	2.396	0.097	
	<b>ACS3</b>	59.299	0.718	10.786	1.833	0.058	0.775	20.519	2.291	2.372	0.347	
	<b>AJG</b>	61.685	0.711	10.491	1.172	0.032	0.635	19.291	2.897	2.273	0.032	
	<b>CAG4</b>	59.977	0.842	10.552	1.444	0.043	0.788	20.133	2.827	2.33	0.14	

Para representar los valores obtenidos en el análisis LFRX se utilizaron diagramas binarios tipo Harker (1909) en los cuales se grafican los elementos mayores en el eje “y” vs el CaO en el eje “x”, el cual fue tomado como parámetro de referencia ya que se considera que es un agregado fundamental de los morteros siendo la roca caliza la principal fuente de obtención de cal usada como matriz cementante de estos.

En la figura 45 se puede observar que, en todos los diagramas expuestos se obtuvo una correspondencia para el conjunto de morteros históricos, es decir se pudo formar un campo específico para el conjunto de estos morteros en cada elemento contra el que se graficó el CaO que se definirá en este trabajo como MMA (Mortero de Monte Albán). Se observa un enriquecimiento en CaO para los morteros históricos (SP4P2, SP4J, SP4BP2 y J3) y por el contrario empobrecimiento en CaO para los morteros actuales (AC1, ACS3, AJG y CAG4).

Por otro lado, se muestra que para los morteros actuales se presenta un enriquecimiento en SiO<sub>2</sub> por arriba del 60 % y además de la misma manera se pueden observar valores altos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O por lo que podemos deducir que estos elementos son provenientes de arenas volcánicas probablemente de composición riolítica o dacítica que contienen minerales como el sanidino, albita o micas que representan dichas composiciones. El enriquecimiento en TiO<sub>2</sub> proviene de directamente de minerales como la ilmenita que se asocian a la magnetita o rutilo. Por otra parte, estos morteros presentan valores bajos en MgO, FeO<sub>t</sub> y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Los morteros históricos mostraron anomalías totalmente contrarias a los morteros actuales, comenzando con el  $\text{SiO}_2$  que presenta menores cantidades que los anteriores de aproximadamente el 38% en promedio para todas las muestras, además de la misma manera en forma contraria se presentan valores bajos en  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ , resaltando la muestra SP4BP2 la cual presenta valores muy bajos de  $\text{K}_2\text{O}$ ; estos morteros muestran tendencias más altas en  $\text{MgO}$  lo que puede significar la presencia de materiales máficos o que hay un enriquecimiento debido a la roca caliza que se utilizó, es decir la presencia de carbonatos de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ) a excepción SP4BP2 que muestra anomalías similares que los morteros actuales es decir de valores muy bajos

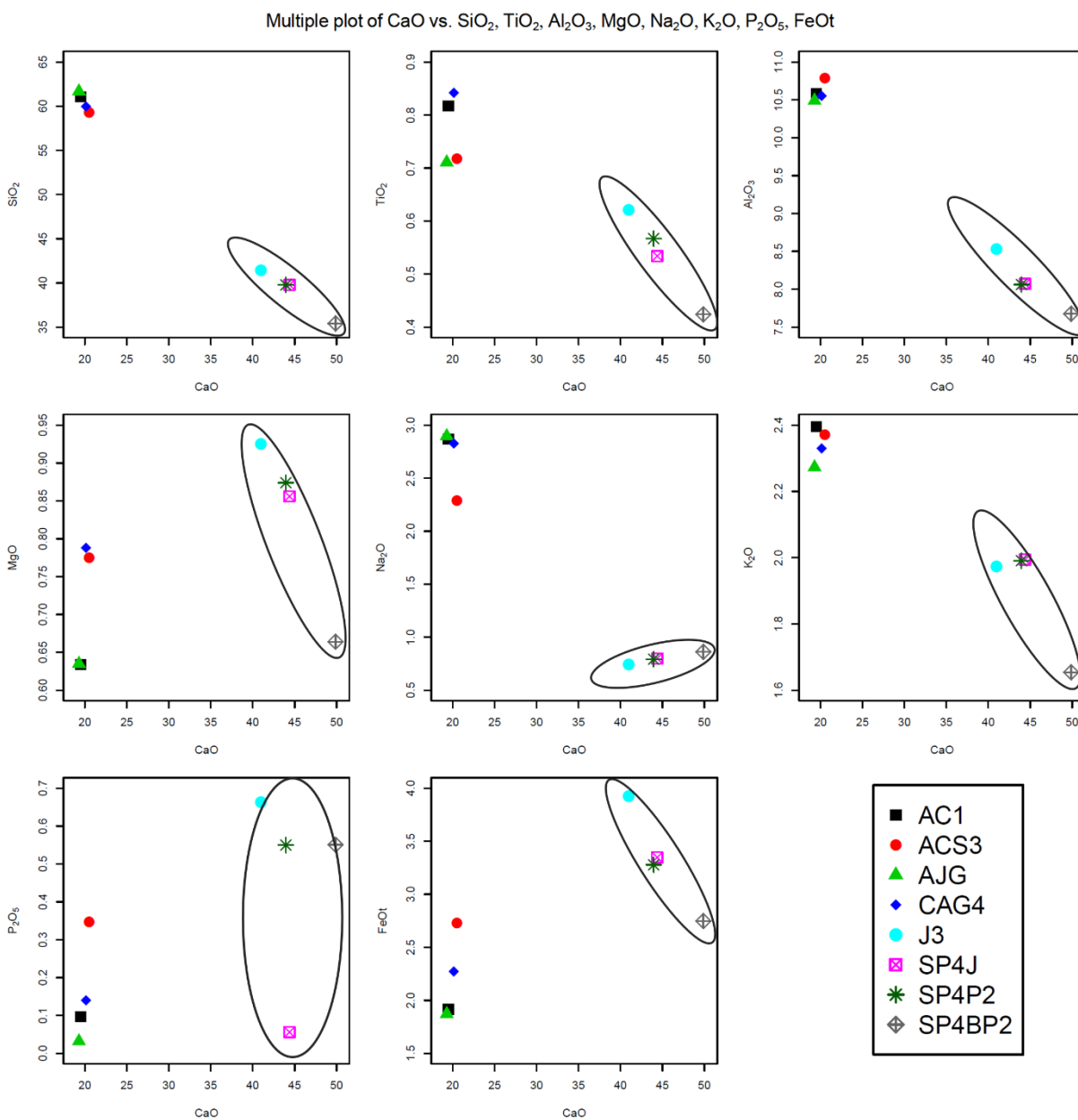


Figura 45. Gráfica de geoquímica de elementos mayores vs CaO.



en MgO; por último, en cuanto al FeO<sub>t</sub> y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> se observaron valores más elevados a los morteros actuales a excepción de la muestra SP4J que muestra un empobrecimiento en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

## 5.2. Resultados del análisis geoquímico ICP-MS

La concentración de elementos mayores y traza ayuda a entender las fases cristalinas de las rocas relacionadas con el ambiente de formación, sin embargo, debido a que los morteros se conforman de una diversa mezcla de componentes, no hay un estándar contra el cual se puedan comparar las muestras recolectadas, por lo que en el presente trabajo fue necesario tomar como referencia la composición de MMA (Mortero de Monte Albán), cuyos valores fueron obtenidos del promedio de 10 ejemplares recolectados correspondientes a los morteros históricos clasificando este valor como el mortero original. En el siguiente diagrama (Figura 46) se pueden observar las huellas geoquímicas que se obtuvieron al normalizar las muestras correspondientes (Tabla 7) contra el valor promedio de MMA.

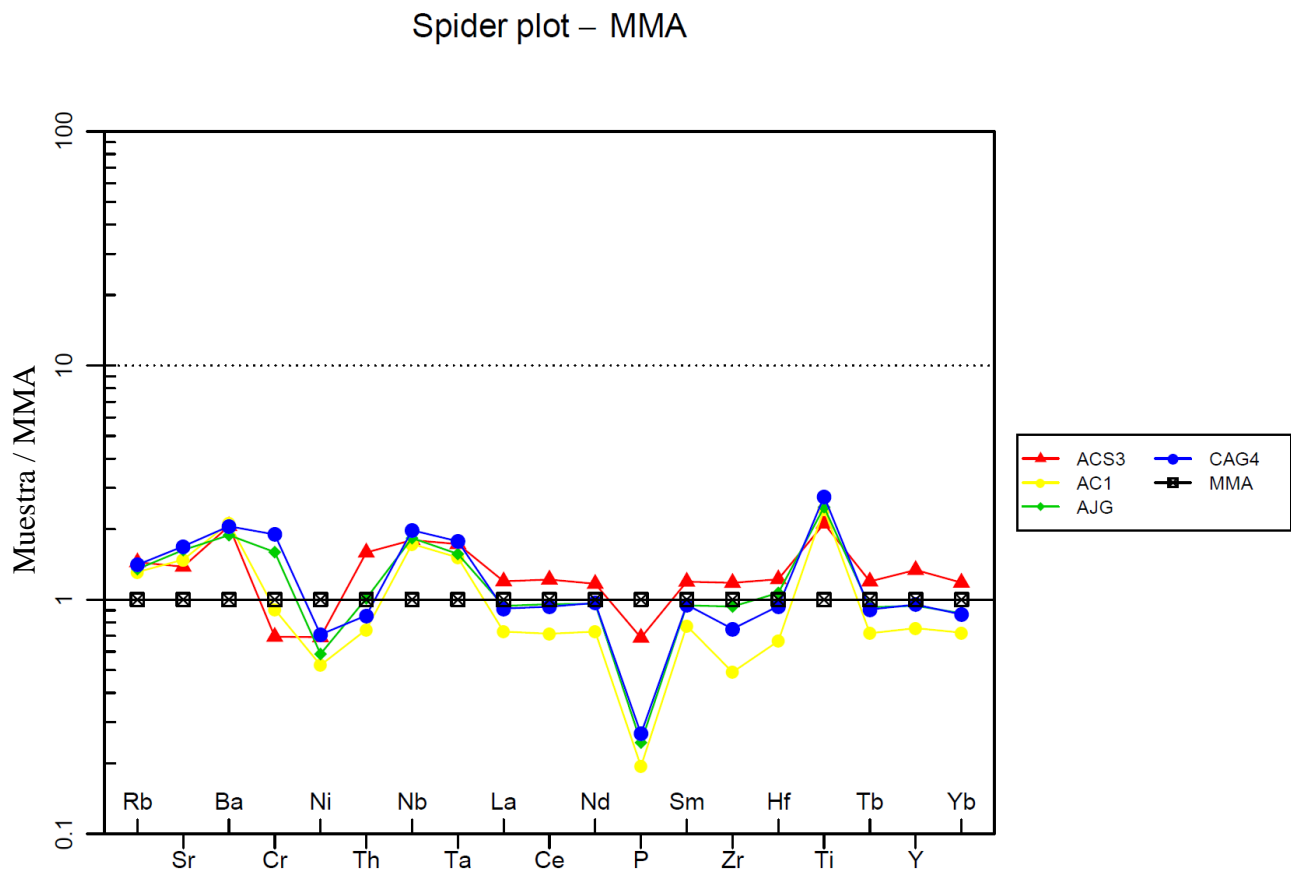


Figura 46. Diagrama de multielementos normalizados a MMA en muestras de morteros actuales

En la figura 46 se puede observar que los morteros de restauración muestran ligeras anomalías positivas en los elementos incompatibles, dentro de los cuales el Sr puede significar mayor presencia de feldespatos. En el ejemplar AC1, se observa una correspondencia a MMA en el Cr y para el resto de los ejemplares se observan ligeras anomalías positivas y negativas y para el Ni se observa una significativa anomalía negativa en todas las muestras. También, para el resto de los elementos (compatibles) se exponen ligeras anomalías positivas y negativas, en especial para el P que muestra una gran anomalía negativa y para el Ti una gran anomalía positiva. Además, hay una excepción en La, Ce, Nd, Cm, Zr, Hf, Tb, Yb y Y, donde los ejemplares AJC y GAC4 muestran una correspondencia similar ante MMA.

Tabla 7. Resultados del análisis ICP-MS, concentración mg/kg (ppm).

<b>Concentración mg/kg (ppm).</b>											
	<b>Muestra</b>	<b>P</b>	<b>Ti</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Y</b>	<b>Zr</b>	<b>Nb</b>	<b>Ba</b>
<b>Mortero histórico</b>	<b>SP4P3</b>	1237.86	1174.45	41.30	12.82	24.72	194.44	3.51	6.87	2.35	305.3
	<b>SP4P2</b>	838.58	628.91	25.36	13.65	13.69	264.21	2.06	2.65	0.72	281.2
	<b>SP4J</b>	1273.54	1291.87	104.01	14.30	28.46	189.62	6.62	12.76	2.28	402.8
	<b>SP4BP2</b>	1409.85	1433.87	58.09	13.89	25.52	246.66	7.80	14.04	2.10	462.0
	<b>SRPL</b>	1497.33	1567.22	83.11	15.11	34.49	227.16	7.40	11.63	2.37	448.7
	<b>SP4P2-S</b>	737.24	527.51	16.77	12.15	12.69	212.29	0.66	1.09	0.64	175.1
	<b>SP4BP3</b>	1673.33	1490.50	98.65	17.06	29.84	223.29	10.54	18.25	2.61	408.5
	<b>J3</b>	1407.38	1580.96	115.30	16.23	31.83	198.94	12.37	17.18	3.19	428.0
	<b>NT4</b>	1451.71	1391.11	78.07	15.61	30.24	232.96	6.93	16.12	2.38	445.9
	<b>F1</b>	1517.79	1503.81	65.19	14.60	30.26	205.14	12.16	17.15	2.57	349.0
<b>Mortero de restauración</b>	<b>ACS3</b>	897.36	2660.68	47.63	10.05	37.81	303.53	9.38	13.89	3.81	764.0
	<b>AC1</b>	253.19	3074.76	62.33	7.63	34.34	325.20	5.29	5.77	3.67	786.9
	<b>AJG</b>	319.58	3127.38	109.49	8.52	35.37	357.38	6.59	11.00	3.88	698.8
	<b>CAG4</b>	348.73	3475.59	130.23	10.32	36.88	370.67	6.67	8.83	4.19	762.2
	<b>MMA</b>	<b>1304.46</b>	<b>1259.02</b>	<b>68.58</b>	<b>14.54</b>	<b>26.17</b>	<b>219.47</b>	<b>7.00</b>	<b>11.77</b>	<b>2.12</b>	<b>370.6</b>
	<b>Muestra</b>	<b>La</b>	<b>Ce</b>	<b>Nd</b>	<b>Sm</b>	<b>Tb</b>	<b>Yb</b>	<b>Hf</b>	<b>Ta</b>	<b>Th</b>	
<b>Mortero histórico</b>	<b>SP4P3</b>	5.23	10.29	5.90	1.06	0.16	0.48	0.31	0.22	0.04	
	<b>SP4P2</b>	3.08	5.53	3.14	0.58	0.09	0.26	0.11	0.09	0.14	
	<b>SP4J</b>	10.50	20.55	10.97	2.03	0.29	0.91	0.47	0.20	0.62	
	<b>SP4BP2</b>	10.26	20.70	11.32	2.09	0.31	0.94	0.49	0.18	0.72	
	<b>SRPL</b>	12.03	23.10	12.53	2.35	0.35	1.07	0.41	0.19	0.58	
	<b>SP4P2-S</b>	2.33	4.05	2.48	0.40	0.05	0.15	0.07	0.09	0.01	
	<b>SP4BP3</b>	12.19	24.74	12.86	2.48	0.38	1.22	0.65	0.19	0.97	
	<b>J3</b>	12.99	26.20	13.91	2.66	0.38	1.26	0.58	0.23	1.36	
	<b>NT4</b>	11.30	22.22	11.82	2.12	0.32	0.98	0.56	0.17	0.67	
	<b>F1</b>	13.35	25.85	13.14	2.50	0.37	1.22	0.54	0.19	0.88	
<b>Mortero de restauración</b>	<b>ACS3</b>	11.17	22.34	11.46	2.18	0.32	1.00	0.51	0.30	0.95	
	<b>AC1</b>	6.81	13.11	7.16	1.41	0.19	0.61	0.28	0.26	0.45	
	<b>AJG</b>	8.77	17.54	9.41	1.73	0.25	0.74	0.45	0.27	0.61	
	<b>CAG4</b>	8.54	17.10	9.49	1.74	0.24	0.73	0.39	0.31	0.51	
	<b>MMA</b>	<b>9.33</b>	<b>18.32</b>	<b>9.80</b>	<b>1.83</b>	<b>0.27</b>	<b>0.85</b>	<b>0.42</b>	<b>0.17</b>	<b>0.60</b>	

### 5.3. Resultados de difracción de rayos X (DRX)

Con la finalidad de obtener las fases cristalinas tanto de morteros históricos como de morteros de restauración, los 14 ejemplares recolectados fueron sometidos a difracción de rayos X, donde sus respectivos difractogramas se muestran en las figuras 47, 48 y 49 y 50.

Los resultados de los morteros históricos se muestran en las figuras 47, 48 y 49, en donde se pueden observar picos de gran intensidad predominantemente de calcita que se identifican mediante el color rojo, seguido de picos de menor intensidad de cuarzo. Además, también se muestran picos de muy poca intensidad de feldespatos potásicos como la microclina y ortoclasa ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) en todos los morteros históricos a excepción de los ejemplares SP4BP2 (Figura 48b) y SP4P2-S (Figura 48d) y también se muestra la presencia de feldespatos plagioclasa como la albita en todos los ejemplares, lo cual la poca presencia de ambos feldespatos puede significar los escasos de arenas y/o materiales volcánicos como agregado original de los morteros. Por último, también se encontraron minerales correspondientes a la alteración de feldespatos como la illita y la caolinita en todos los morteros a excepción de la muestra SP4BP2 (Figura 48b) y además de otros minerales, pero no localizados en todos los ejemplares como lo son la muscovita y hornblenda en SP4J (Figura 48a), osumilita en SPBP2 (Figura 48b) generalmente procedente de rocas ácidas y cloritoide en NT4 y F1 (Figura 49c y d) mineral el cual es encontrado generalmente en rocas metamórficas.

Mientras tanto, los difractogramas que se obtuvieron durante el análisis para los morteros de restauración (Figura 50), muestran un patrón totalmente distinto a los anteriores, ya que ahora los picos de intensidad predominante corresponden al cuarzo (representado con picos azules) mayores a los de la calcita observados en los morteros históricos. Por otra parte, también se muestran picos de gran intensidad de portlandita en los ejemplares AC1, AJG y GAG4, cuyo mineral es un hidróxido de calcio el cual, es llamado así debido a que es producto de la hidratación de cemento o cal industrial que se utilizó como agregado para la conformación de estos morteros. También, en todos los ejemplares se muestra gran intensidad correspondiente a feldespatos plagioclasa (albita) y feldespatos alcalinos (microclina), por lo que en consiguiente y de manera contraria a los morteros históricos nos pueden indicar la presencia de gran cantidad de arenas. Y el resto de los minerales que se encontraron con menor intensidad corresponden a calcita, biotita y crossita en todos los ejemplares, además de clinocloro en ACS3).

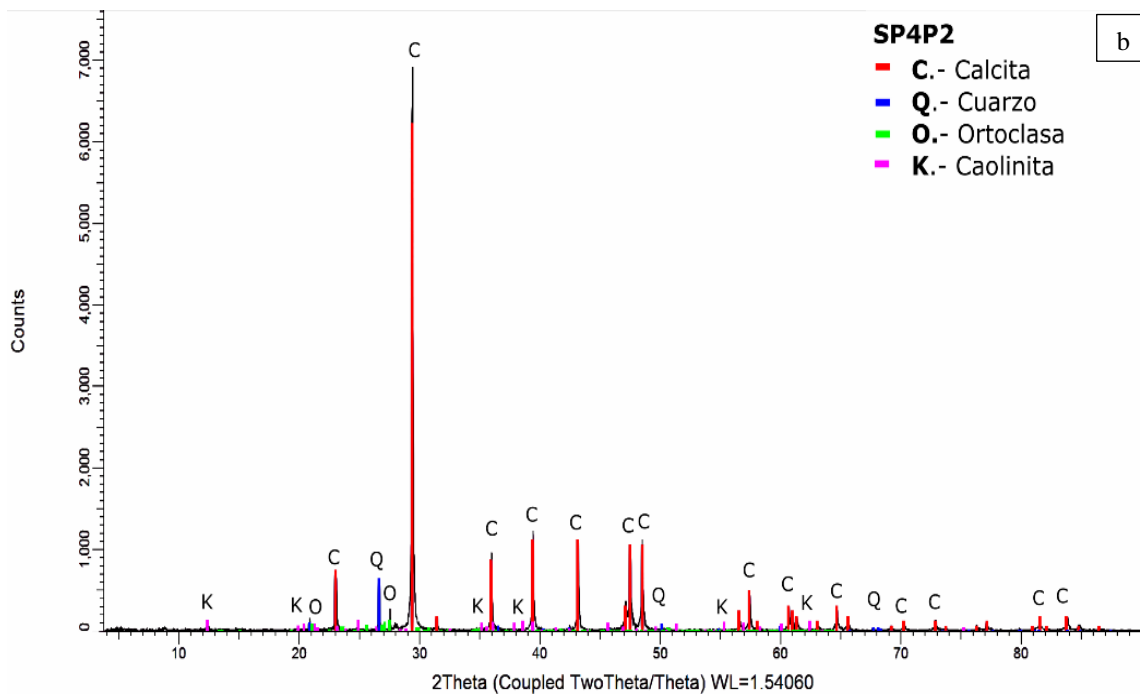
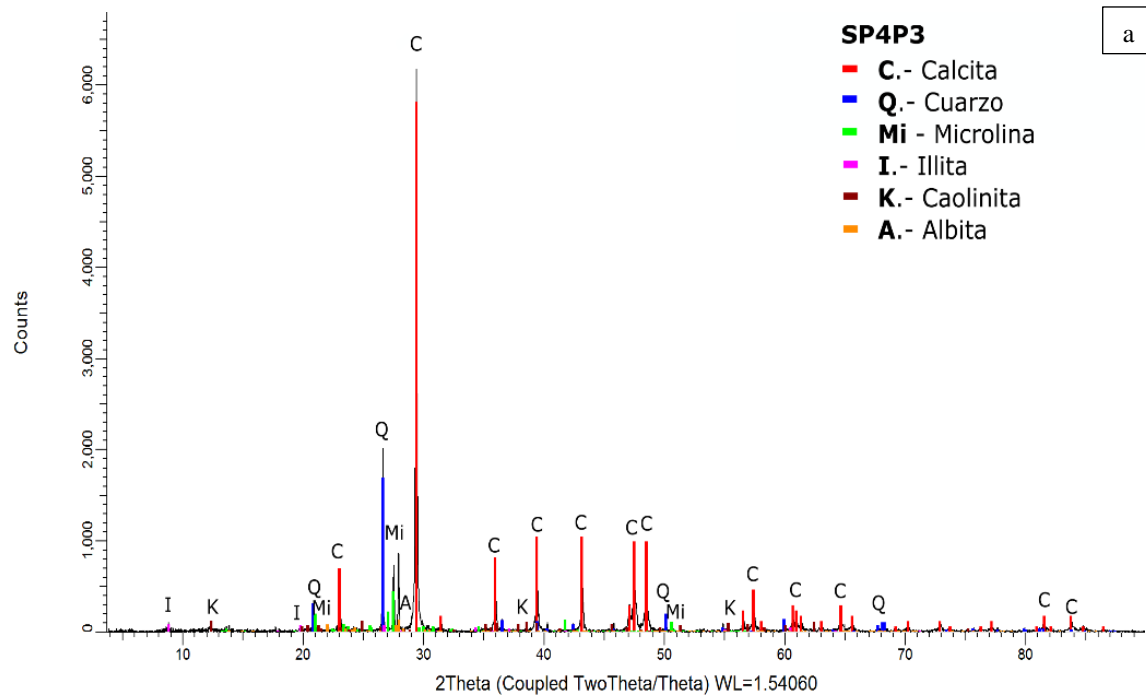


Figura 47. Difractogramas correspondientes a los morteros históricos: a) SP4P3 y b) SP4P2

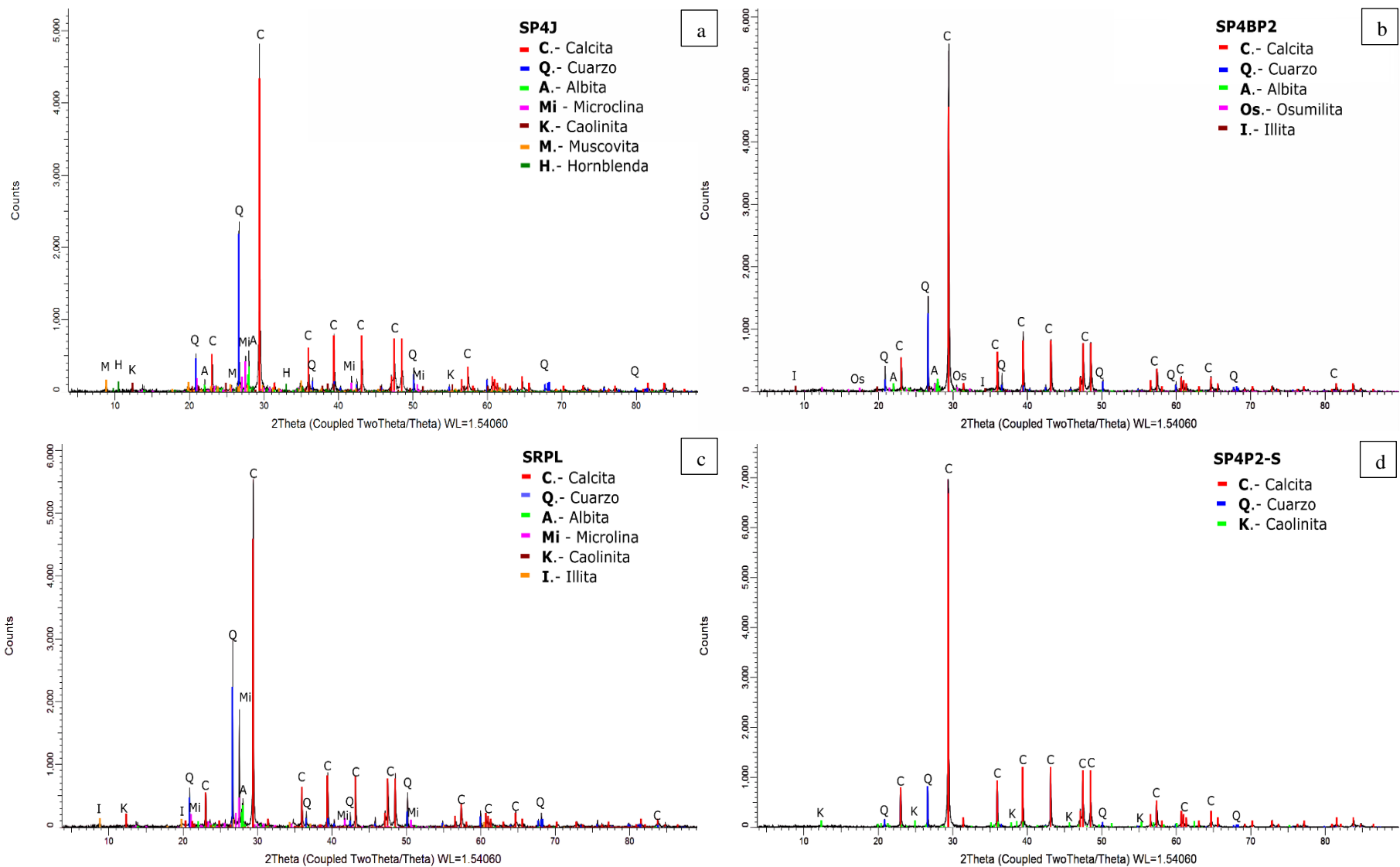


Figura 48. Difractogramas correspondientes a los morteros históricos: a) SP4J, b) SP4BP2, c) SRPL y d) SP4P2-S



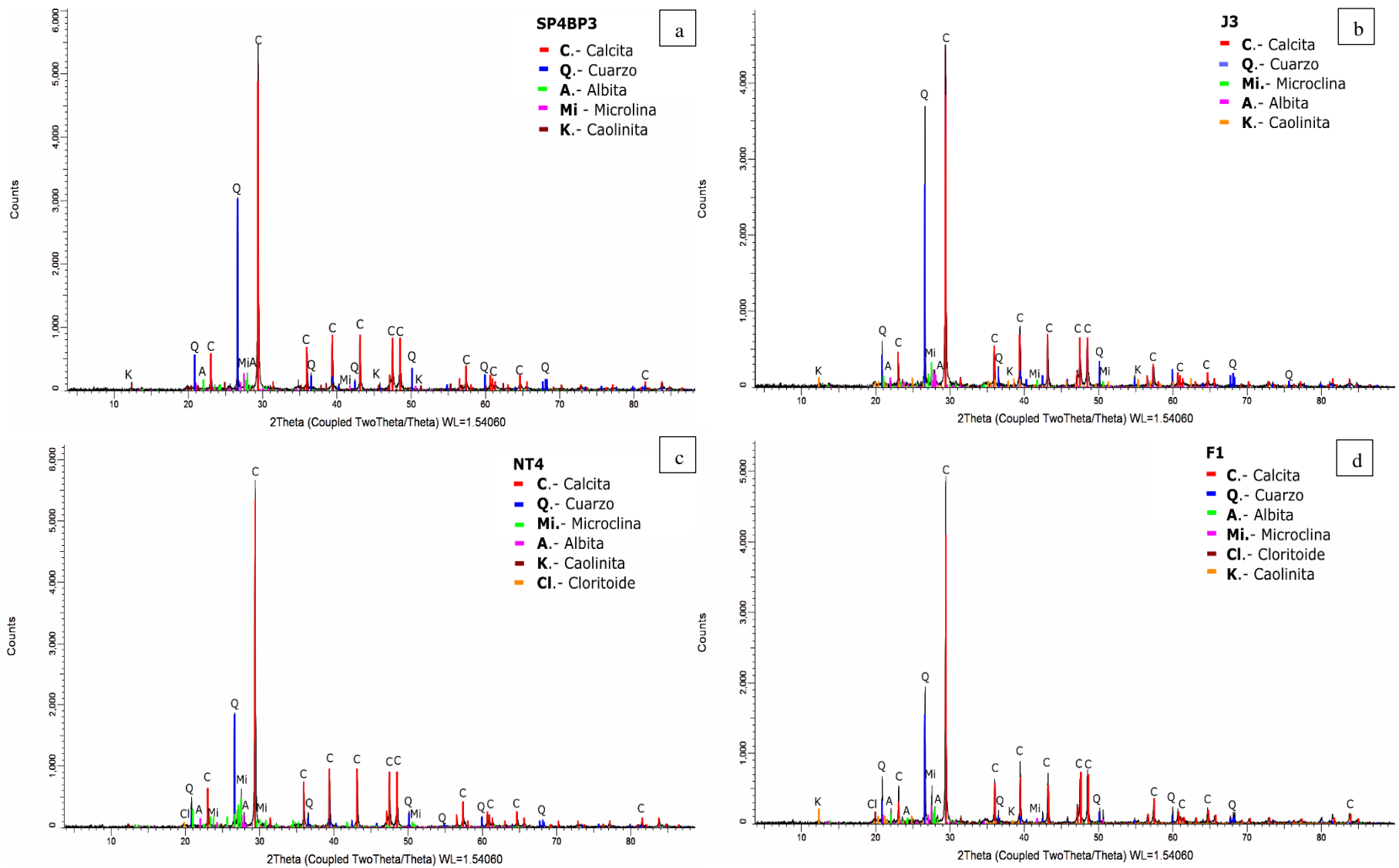


Figura 49. Difractogramas correspondientes a los morteros históricos: a) SP4BP3, b) J3, c) NT4 y d) F1.

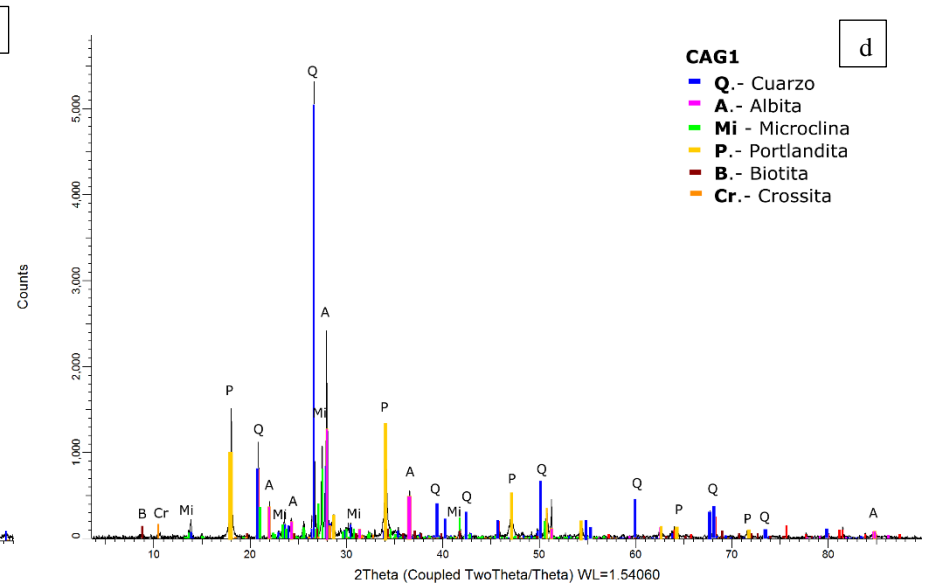
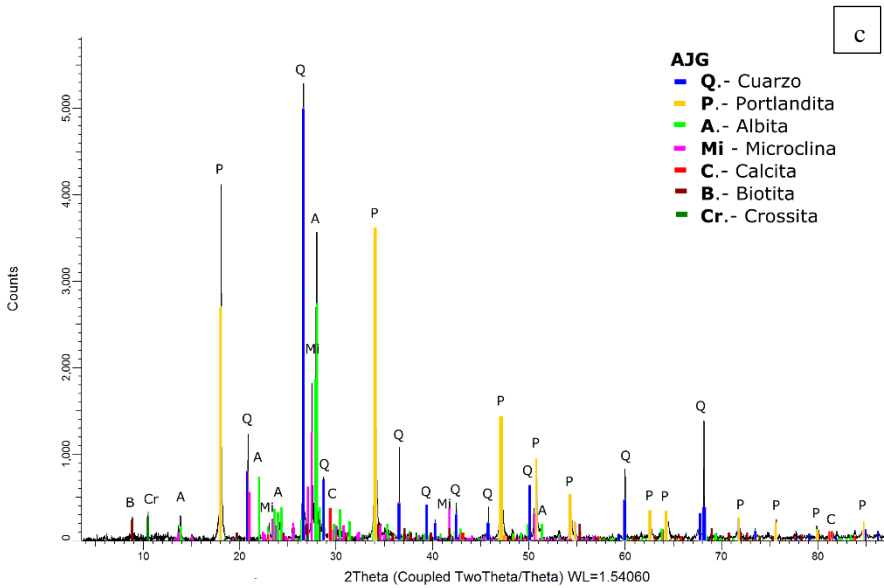
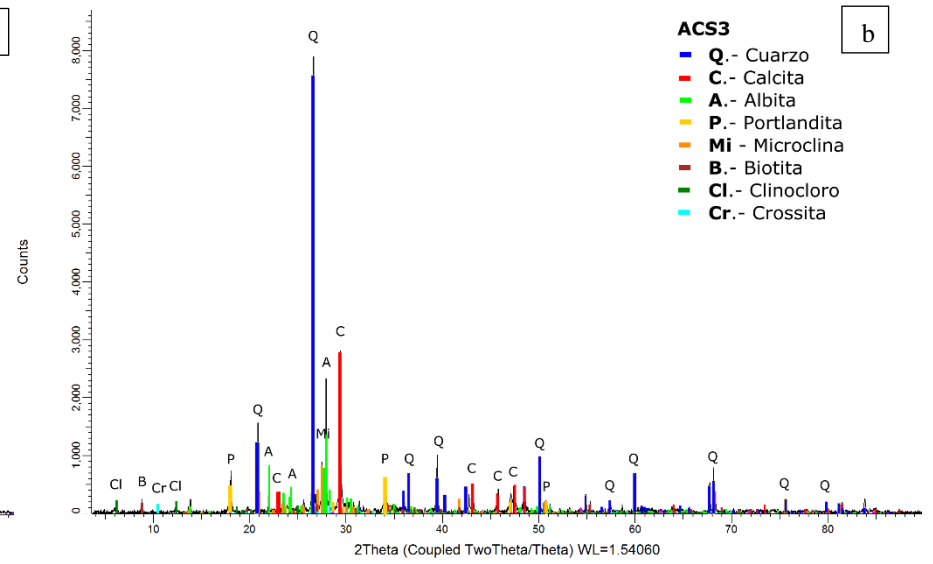
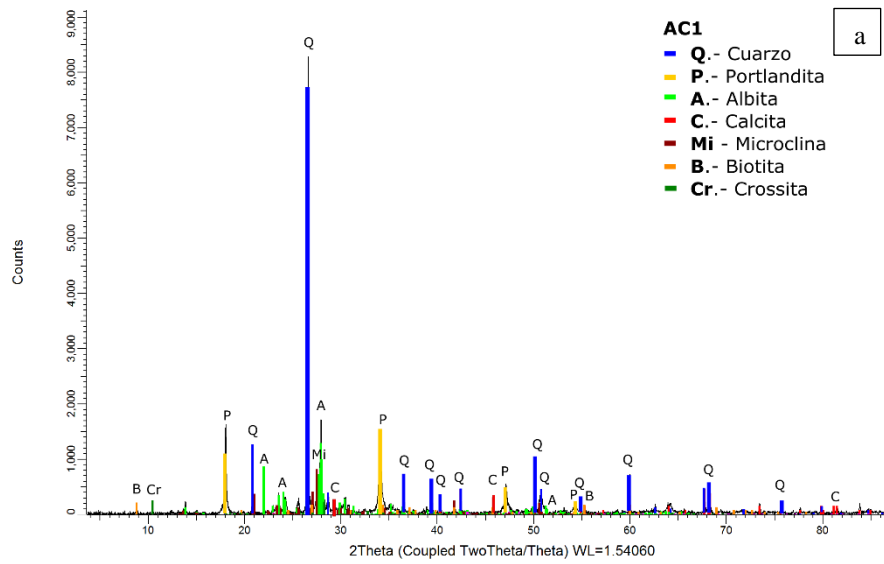


Figura 50. Difractogramas correspondientes a los morteros de restauración: AC1, ACS3, AJG Y CAG1

#### 5.4. Análisis granulométrico y conteo de componentes

Mediante el análisis granulométrico se ha podido obtener la distribución poblacional de tamaños de partículas que conforman muestras de sedimentos, suelos u otro material (Blott y Pye, 2012). y/o en este caso, para la importancia de este trabajo y para lo que se utilizó, fue para obtener la predominancia del tamaño de partículas de los morteros que se ha estado utilizando a lo largo de la historia y se analizaron todas las muestras correspondientes a morteros históricos y morteros de restauración (Tabla 5).

Como se mencionó en el apartado de la metodología (sección 1.7.3.4) el análisis estadístico se obtuvo mediante el programa GRADISTAD y para este trabajo solo se analizarán los parámetros clásicos correspondientes a la media ( $\bar{X}$ ), mediana ( $M_e$ ), moda ( $\sigma$ ) y desviación estándar ( $sk$ ) (Tabla 8) cuyos valores se muestran en unidades phi ( $\phi$ ) y se clasificaran de acuerdo con la escala propuesta por Blott y Pye (2012) la cual muestra una división con respecto al tamaño de partículas (Tabla 9).

Tabla 8. Descripción de los parámetros estadísticos (Folk y Ward, 1957; Chamley, 1989; tomada y modificada de García-Nava, 2020).

Parámetro	Descripción
Media ( $\bar{X}$ )	• Determina el diámetro promedio de partícula en cada muestra ( $\phi$ ).
Mediana ( $M_e$ )	• Es el tamaño de partícula que se encuentra exactamente en medio de la población ( $\phi$ ).
Moda ( $s$ )	• Es el valor que ocurre con mayor frecuencia. ( $\phi$ ).
Desviación estándar ( $\sigma$ )	• Representa el grado de dispersión de los valores en relación con la media y determina el grado de selección de las mezclas, mientras más alto es su valor, el grado de selección es menor ( $\phi$ ).

Tabla 9. Clasificación granulométrica propuesta por Blott y Pye (2012) (Tomada y modificada de García-Nava, 2020).

Tamaño en phi ( $\phi$ )	Tamaño métrico	Clasificación
-12	4.096	Megaclastos
-11	2.048	
-10	1.024	Cantos muy grandes Cantos grandes Cantos medianos Cantos pequeños Cantos muy pequeños
-9	512	
-8	256	
-7	128	
-6	64	
-5	32	Grava muy gruesa Grava gruesa Grava media Grava fina Grava muy fina
-4	16	
-3	8	
-2	4	
-1	2	
0	1	

1	500		Arena gruesa
2	250	micras	Arena media
3	125		Arena fina
4	65.5		Arena muy fina
5	31.25		Limo muy grueso
6	15.63		Limo grueso
7	7.813		Limo medio
8	3.906		Limo fino
9	1.953		Limo muy fino
10	976.6		Arcilla muy gruesa
11	488.3	nm	Arcilla gruesa
12	244.1		Arcilla media

En la tabla 10 se muestran los valores estadísticos, obtenidos mediante la prueba del análisis granulométrico, además en las figuras 51 y 52 podemos observar los histogramas correspondientes a la distribución de tamaño de grano, las cuales representan el porcentaje de cada fracción de partículas medidas desde el tamaño de  $-4 \phi$  a  $4 \phi$ .

Tabla 10. Parámetros estadísticos, obtenidos del análisis granulométrico.

Tipo de muestra	Muestra	Parámetros estadísticos				Distribución de tamaño de grano		
		$\bar{X} (\phi)$	Me ( $\phi$ )	S ( $\phi$ )	$\sigma (\phi)$	Grava (%)	Arena (%)	Lodo (%)
Mortero Histórico	SP4P3	-0.557	-0.657	-2.5	2.283	45.8	47.7	6.5
	SP4P2	-0.896	-2.758	-3.5	2.188	66.7	30.0	3.3
	SP4J	0.576	0.172	0.5	1.950	31.8	61.0	7.2
	SP4BP2	0.549	0.506	0.5	2.267	25.8	65.1	9.1
	SRPL	0.465	0.336	-0.5	2.079	24	68.6	7.4
	SP4P2-S	-0.344	-1.055	-0.5	2.156	50.7	44.2	5.1
	SP4BP3	0.654	0.160	1.5	2.059	36	55.4	8.6
	J3	0.640	0.630	0.5	2.132	22.4	69.6	8.0
	NT4	-0.055	-0.748	-3.5	2.250	47	46.9	6.1
	F1	0.133	-0.17	-0.5	2.397	34.1	57.4	8.5
Mortero de restauración	AC1	-0.286	-0.403	-0.5	1.474	32.3	66.6	1.1
	ACS3	-0.340	-0.747	-2.5	2.086	46.4	49.6	4.0
	AJC	-0.098	-0.328	-0.5	1.395	28.4	70.1	1.5
	CAG4	-1.070	-1.032	-3.5	1.935	50.5	48.5	1.1

Comenzando con los morteros históricos, en cuanto el diámetro promedio de las partículas de cada muestra ( $\bar{X}$ ) se pudo observar que los morteros correspondientes a los pisos (SP4P3, SP4P2 y SP4P2-S) además de la muestra correspondiente a un núcleo de tierra (NT4), muestran un valor de diámetro promedio entre el límite de grava muy fina a arena muy gruesa y para el resto de los morteros históricos (SP4J, SP4BP2, SRPL, SP4BP3, J3 y F1) el diámetro promedio se encuentra

entre la clasificación de arena muy gruesa a arena gruesa.

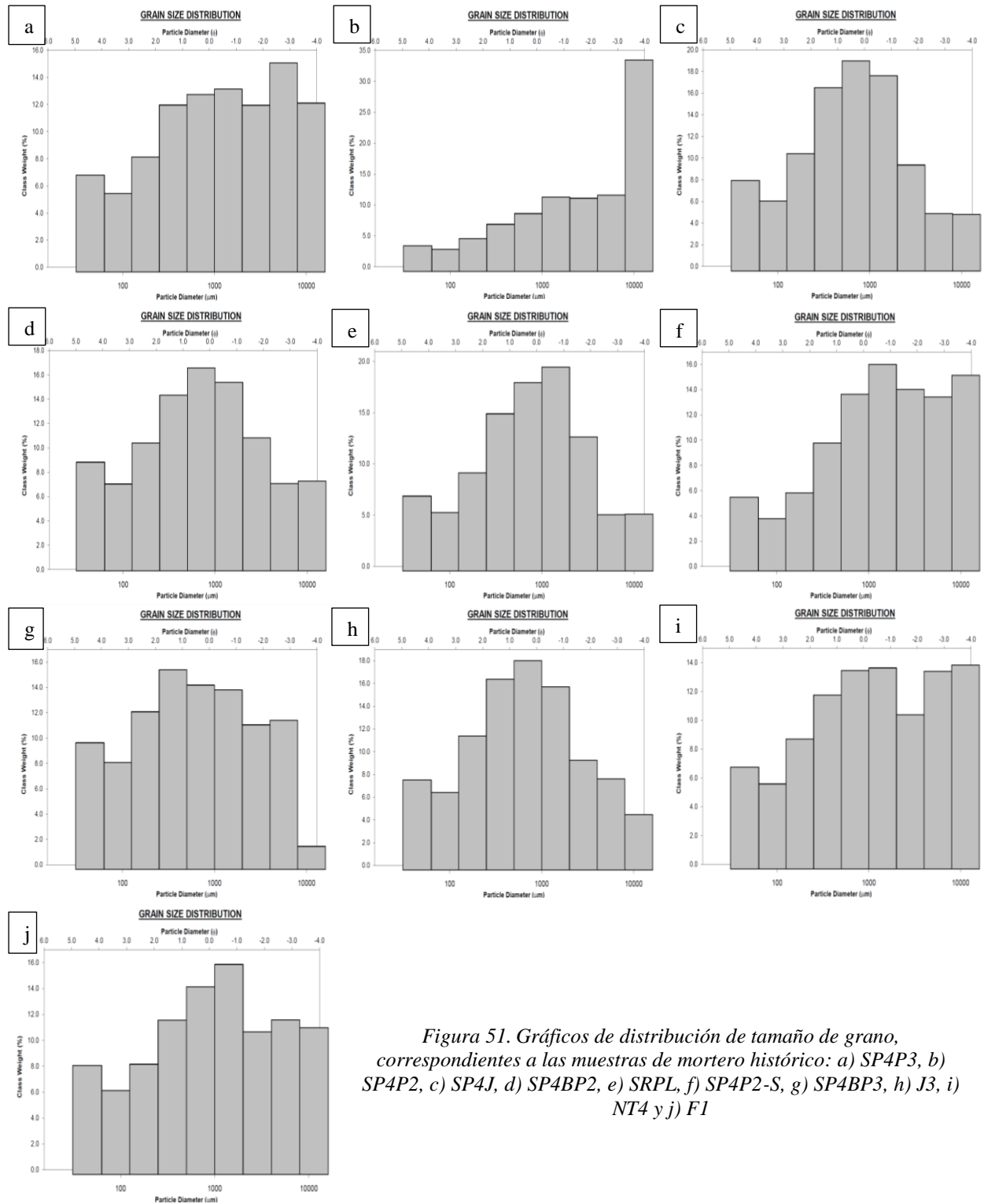


Figura 51. Gráficos de distribución de tamaño de grano, correspondientes a las muestras de mortero histórico: a) SP4P3, b) SP4P2, c) SP4J, d) SP4BP2, e) SRPL, f) SP4P2-S, g) SP4BP3, h) J3, i) NT4 y j) F1

Con respecto a la predominancia del tamaño de partícula (s) las cuales pueden ser revisadas en las figuras 51 y 52, los morteros históricos mostraron valores muy variables, las muestras donde predominó un tamaño de grava media a gruesa, fueron SP4P2 y NT4 (Figuras 51b y 51i), siguiendo la muestra SP4P3 (Figura 51a) donde el tamaño predominante es el de la grava fina a media, sin embargo, en el resto de los ejemplares las partículas dominantes van de los tamaños de  $-0.5$  a  $0.5\phi$  (Arena muy gruesa), a excepción del ejemplar SP4BP3 (Figura 51g) donde su partícula preponderante es hacia las arenas medias.

Mientras tanto en cuanto al análisis de los morteros de restauración, el tamaño promedio de partícula ( $\bar{X}$ ) pertenece a la clasificación de arena muy gruesa con una ligera predominancia hacia el material grueso y de igual manera el análisis modal (s) el cual podemos observar en la figura 52, nos muestra una predominancia de tamaño de partícula hacia el material grueso del tamaño de las gravas, siendo CAG4 y ACS3 (Figuras 52d y b) las muestras con partículas más grandes con tamaños de  $-2.5$  a  $-3.5 \phi$  (grava fina a grava gruesa) y en las dos restantes predominan las partículas del tamaño de grava muy fina.

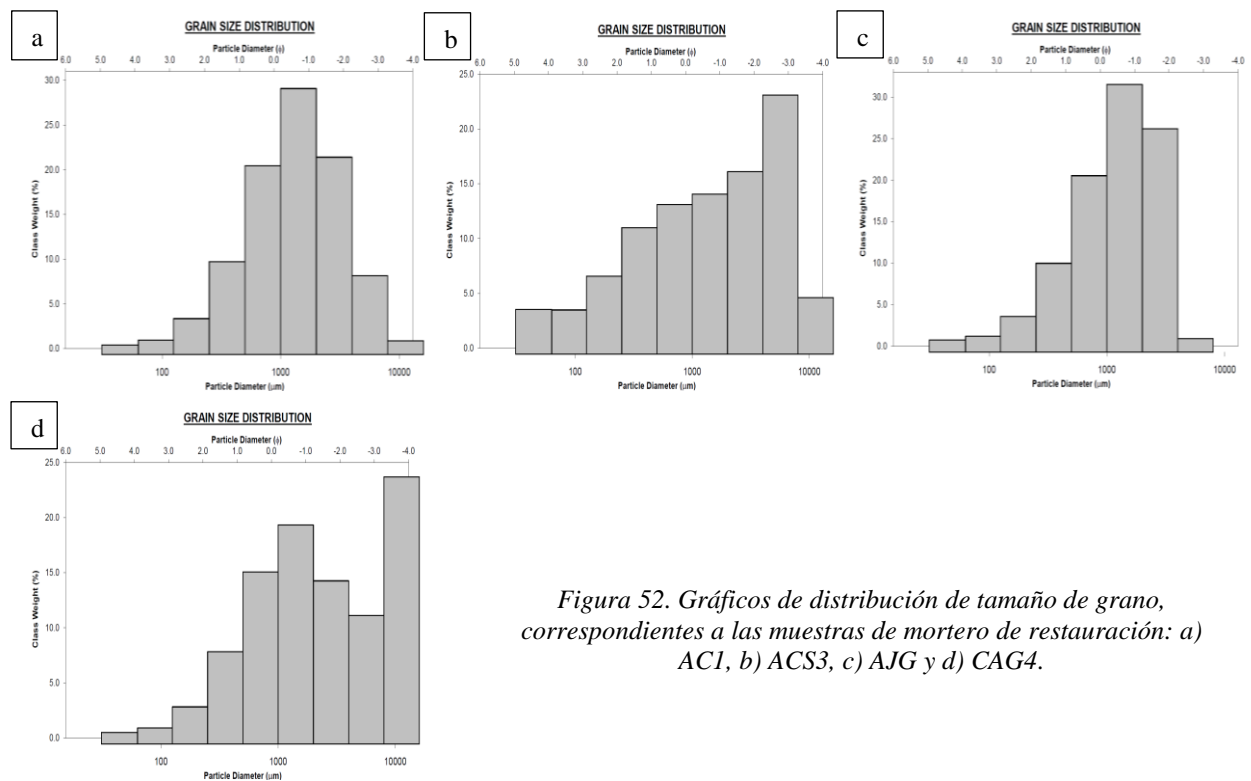


Figura 52. Gráficos de distribución de tamaño de grano, correspondientes a las muestras de mortero de restauración: a) AC1, b) ACS3, c) AJG y d) CAG4.



Por último, dentro de los parámetros estadísticos que se obtuvieron, fue el valor de la desviación estándar ( $\sigma$ ) el cual indica el grado de dispersión de los datos con respecto a la media, es decir entre más elevado sea este valor, mayor será el grado de dispersión. Por lo tanto, los morteros históricos con valores promedios de 2.2  $\phi$  se clasificaron como muestras muy mal clasificadas a excepción de SP4J que disminuyó su valor (1.95  $\phi$ ) y se clasifica como una muestra mal clasificada.

En cuanto a la desviación estándar que obtuvieron los morteros de restauración, los ejemplares se clasificaron como muestras mal clasificadas a excepción ACS3 que se consideró como muy mal clasificada.

En lo que respecta al análisis de conteo de componentes, para mayor entendimiento se promedió el porcentaje de cada rango de tamaño de partículas que se contó, además se identificaron gran variedad de componentes en los morteros, por lo que fueron agrupados en 5 clases (carbonatos, cristales, líticos ígneos, líticos sedimentarios y líticos metamórficos) y se describen en la tabla 11.

*Tabla 11. Clasificación de los componentes identificados en las muestras analizadas durante el conteo de componentes*

<b>Clasificación</b>	<b>Clave</b>	<b>Descripción</b>
<b>Carbonatos</b>	C	Fragmentos de color blanco con tonalidades a beige, de forma irregular en ocasiones totalmente redondeados poco porosos y algunos de ellos con incrustaciones de cristales (reaccionan a HCL).
<b>Cristales</b>	CI y CO	CI: Cristales en su mayoría translucidos (cuarzo), blancos con coloración rosa (feldespatos y micas). CO: Cristales oscuros, grises, negros y verdes (hornblenda, biotita, crossita y piroxenos)
<b>Líticos volcánicos</b>	LV	Roca ígnea extrusiva de grano fino y composición félsicas, de color rosa a rojo (riolita) Roca ígnea extrusiva de grano fino, color verde oliva (toba volcánica) Roca ígnea extrusiva de color gris oscuro y composición máfica, con textura vesicular (basalto)
<b>Líticos sedimentarios</b>	LS	Areniscas de color café con tonalidades amarillentas de grano fino y grano grueso Areniscas de color gris oscuro a café de grano fino Areniscas presentando un alto grado de alteración correspondiente a oxidación, su color tiene a ser café a rojizo.
<b>Líticos metamórficos</b>	LM	Fragmentos de roca metamórfica color oscuro con alteración de oxidación, donde se pueden apreciar las líneas de clivaje (esquistos y pizarras)

En las figuras 53, 54 y 55 se pueden observar los resultados del conteo de componentes. Las partículas principales que predominan de manera significativa en los morteros históricos corresponden a los carbonatos (C) que representan más del 42 % en promedio para todos los ejemplares, a excepción de una muestra en particular (SP4P2-S) en la que sobresale el porcentaje de carbonatos con más del 60 %. Además, se muestra un contenido elevado en cristales

correspondiente a cristales traslucidos y blancos (CI) con valores de más del 30% a excepción nuevamente de SP4P2-S y los fragmentos sedimentarios representan tan solo el 15 % del total de las muestras. Por lo que el resto de los componentes disminuyen de manera significativa y corresponden a cristales oscuros (CO) representando el 5.5%, líticos volcánicos (LV) que representan no más del 3% del total y líticos metamórficos (LM) con no más del 1% e incluso en el 50% de las muestras no fueron identificados (SP4P2, SP4J, SP4BP2, SP4P2-S, NT4 y J3).

De manera contraria, los morteros de restauración (Figura 56), mostraron una predominancia en los componentes correspondientes a cristales traslucidos en donde predomina el cuarzo (CI) el cual representa en 3 de los ejemplares (AC1, AJC y CAG4) más del 60 % del total de las muestras y en ACS3 el 46 %. Por lo que el porcentaje de carbonatos encontrados también en los morteros históricos disminuye drásticamente en un promedio para tres de las muestras ya mencionadas al 15%, siendo así, el mortero ACS3 destaca entre todos por representar el 45% de carbonatos en ese ejemplar.

Como consecuencia, el resto de las partículas encontradas en estos morteros, se presentan de manera minoritaria, debido a los grandes porcentajes de cristales de cuarzo presentes y entre ellos feldespatos; los cristales oscuros representan el 7.5% en promedio para todas las muestras, los líticos sedimentarios y metamórficos no presentan más del 3% del total de la muestra y en este caso los líticos volcánicos no se identificaron en ninguno de los ejemplares.

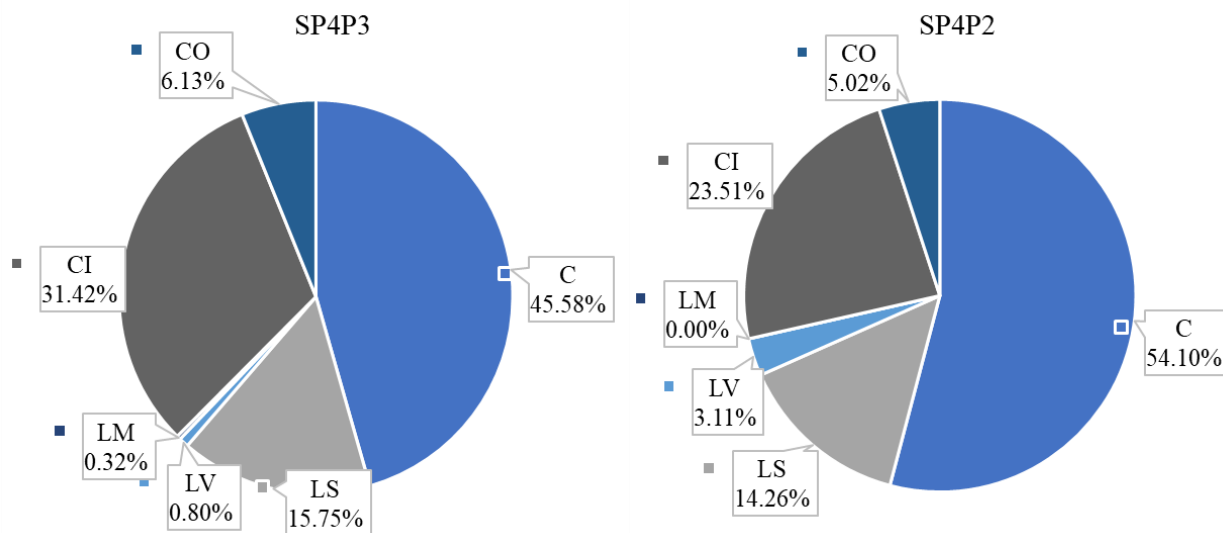


Figura 53 . Resultados del análisis de conteo de componentes correspondientes a los morteros históricos: SP4P3 Y SP4P2.

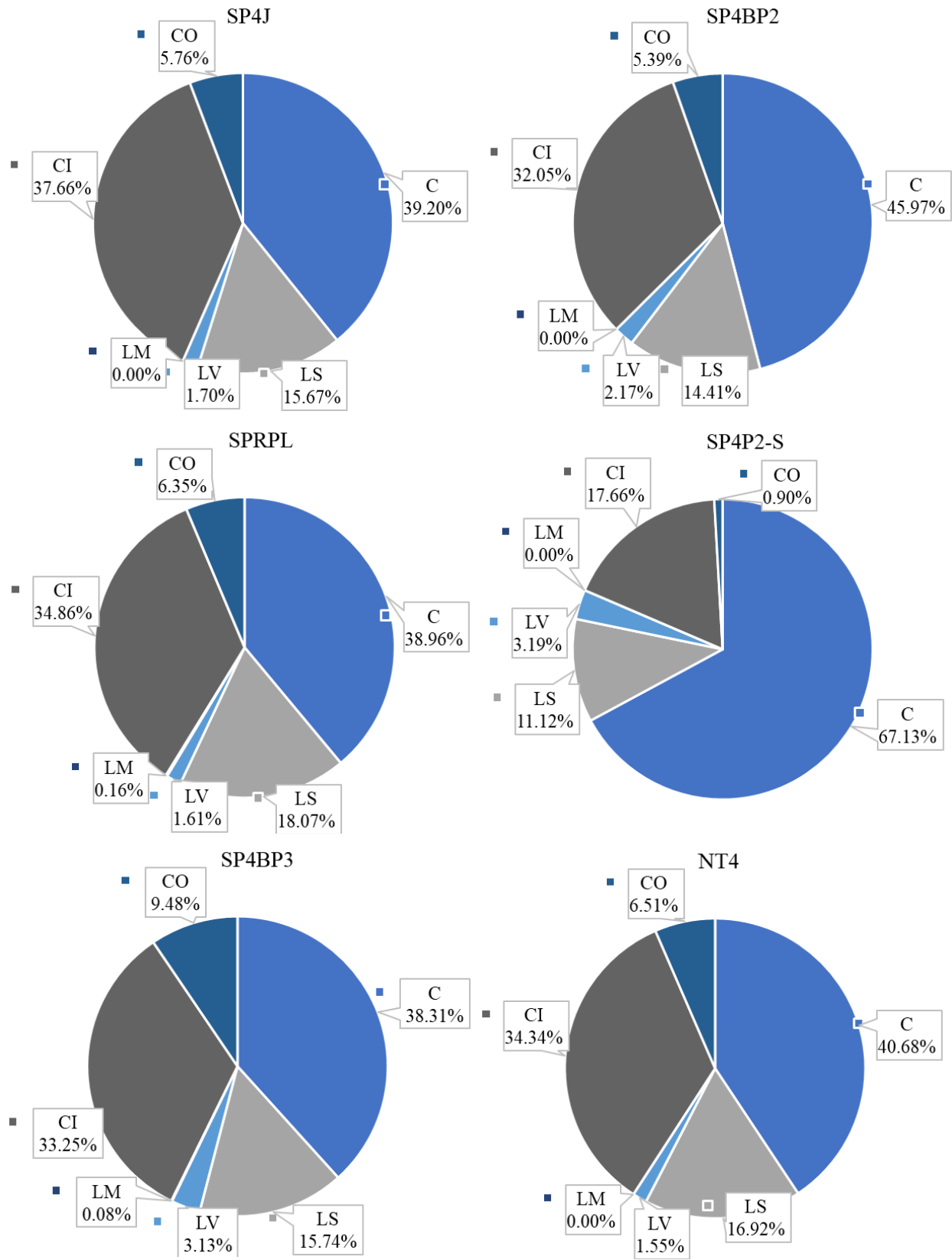


Figura 54. Resultados del análisis de conteo de componentes correspondientes a los morteros históricos: SP4J, SP4BP2, SRPL, SP4P2-S, SP4BP3 Y NT4.

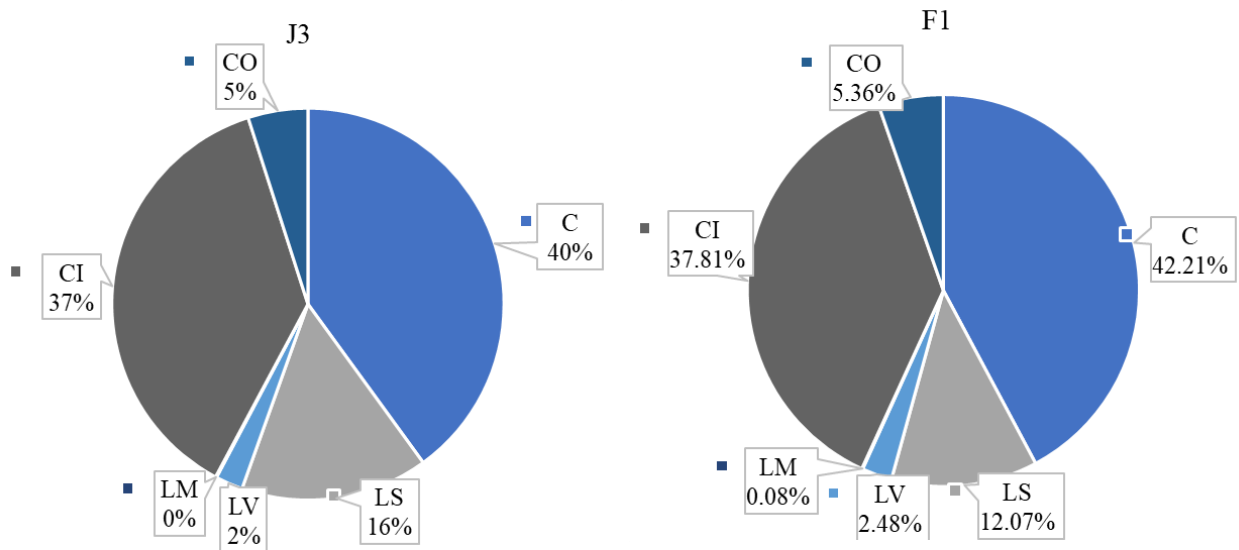


Figura 55. Resultados del análisis de conteo de componentes correspondientes a los morteros históricos: J3 Y F1.

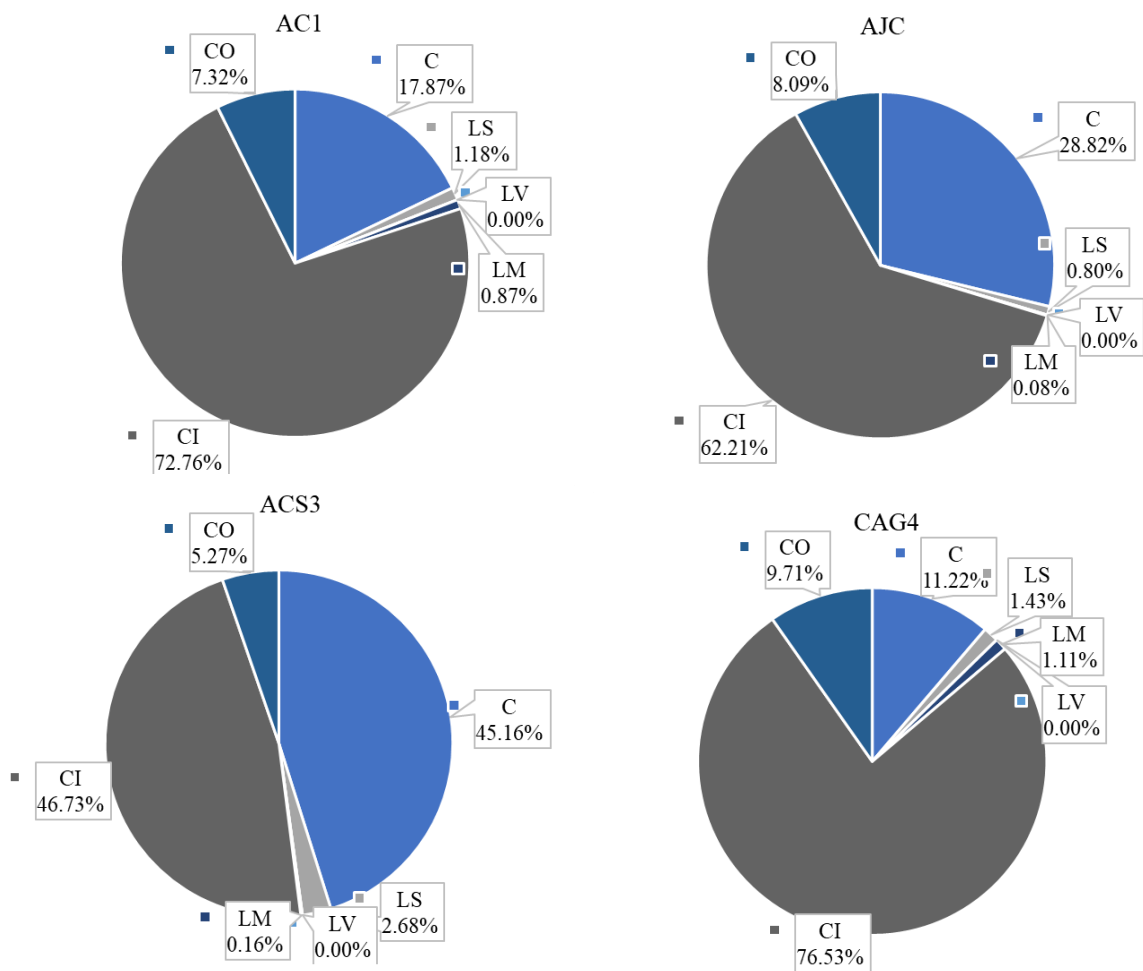


Figura 56. Resultados del análisis de conteo de componentes correspondientes a los morteros de restauración: AC1, AJC, ACS3 Y CAG4.

## 5.5. Espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR)

Los análisis de FTIR se aplicaron a un total de 18 muestras, 10 de ellas correspondientes a los morteros históricos y 4 de ellas correspondientes a los morteros de restauración (ver tabla 5), esto con la finalidad de encontrar una posible correspondencia entre los morteros históricos y el mucilago de nopal tomado como referencia de diferentes fuentes bibliográficas y diferenciar la composición del mortero de restauración, ya que se tiene la creencia del uso de aglutinantes como el mucilago de nopal en morteros históricos para la mejora de algunas características como el fraguado de estos (Veiga R., 2017).

Como resultado de los análisis de espectroscopía infrarroja, primeramente, se pueden observar los espectros de FTIR correspondientes a los 10 morteros históricos que se han ido estudiando a lo largo de este trabajo (Figura 57) y se analizan mediante la identificación de bandas características de los grupos funcionales<sup>7</sup> presentes en las estructuras de cada una de las muestras. Como se puede observar para las 10 muestras de mortero histórico se obtuvieron patrones espectrales parecidos y se interpretan de forma general de la manera siguiente:

Un espectro de FTIR consta de 3 regiones espectrales, la primera que va de los 4000 a 2500  $\text{cm}^{-1}$  y se encuentra relacionada con enlaces de estiramiento de (O-H, C-H y N-H). En la figura 54 se puede observar dentro de esta zona una banda ancha de poca intensidad dentro de esta región, de aproximadamente 3300  $\text{cm}^{-1}$  la cual se debe a vibraciones de estiramiento del enlace O-H de los grupos alcohol, muy característica cuando hay presencia o residuos de agua y aparecen debido a la formación de puentes de hidrogeno de estos grupos funcionales (Delgado-Arroyo *et al.*, 2018; Silva Cascante *et al.*, 2020; Otálora *et al.*, 2021)

Seguido de esto la segunda región espectral va de los 2500 a 2000  $\text{cm}^{-1}$ , a menudo en esta región no aparecen bandas y corresponde a la región de enlaces triples ( $\text{C}\equiv\text{C}$ ,  $\text{C}\equiv\text{O}$  o  $\text{C}\equiv\text{N}$ ), y como se menciona en los espectros de los morteros obtenidos no se mostraron bandas de gran intensidad y de la misma manera para la región que va de los 2000 a 1500 o región llamada de los dobles enlaces ( $\text{C}=\text{C}$  y  $\text{C}=\text{O}$ ).

---

<sup>7</sup> **Grupo funcional:** Arreglo geométrico de átomos que siempre reacciona de una forma determinada, es decir aquel que absorbe radiación en un intervalo específico de frecuencias. La banda que se genera en un espectro siempre se ubica en la misma zona.

Sin embargo, las bandas más intensas dentro de los espectros de la figura 57 ocurren en la región de la huella dactilar ( $1500$  a  $600\text{ cm}^{-1}$ ) en donde aparecen bandas producto de varias vibraciones de enlace. Esta región es muy importante ya que cada muestra tendrá un particular espectro. En todas las muestras se pueden observar las mismas bandas de esta región comenzando por una señal intensa que ronda los valores de  $1400\text{ cm}^{-1}$  que se asigna en Otálora, *et al.* (2021) a los modos de estiramiento del grupo  $\text{COO}^-$  y en Delgado-Arroyo *et al.* (2018) esta banda es asignada a vibraciones de deformación de C-H. Las bandas de mediana intensidad que van de los  $1010$  a  $1035\text{ cm}^{-1}$  es asignado a la vibración de estiramiento de C-O. La banda puntiaguda de alta intensidad de  $872\text{ cm}^{-1}$  y la banda de baja intensidad de alrededor de  $712\text{ cm}^{-1}$  es asociada a la vibración de estiramiento del enlace C-H y podrían corresponder a uniones de Ca-O.

Por consiguiente, también se analizaron los morteros de restauración (ver tabla 5), como se puede observar en la figura 58, la mayoría de las bandas que poseen estos morteros corresponden a los de los morteros históricos. Existe una correspondencia en las bandas ubicadas en la zona de la huella dactilar, comenzando con la banda que va de  $1416$  a  $1446\text{ cm}^{-1}$  que se muestra con menor intensidad que la anterior, además de las bandas que rondan los valores de  $1000\text{ cm}^{-1}$ , de  $874\text{ cm}^{-1}$  y  $777\text{ cm}^{-1}$  con distintas intensidades que las anteriores.

Por otro lado, estos espectros se diferencian de los históricos, por tener dos bandas que no aparecen en los anteriores, la primera presente en la huella dactilar con una longitud de onda de  $645\text{ cm}^{-1}$  y la segunda y característica de estos espectros es la correspondiente a una banda aguda de  $3641\text{ cm}^{-1}$  la cual es asignada a un aumento de OH que en conjunto con las bandas de mediana intensidad de alrededor de  $770\text{ cm}^{-1}$  (uniones de Ca-O), se pueden asociar al  $\text{Ca(OH)}_2$  (Piqué, T. y Vazquez. A., 2012), que como ya se dijo en el apartado de DRX, es producto de la hidratación de cemento o cal industrial presente en los morteros de restauración.

Finalmente, se tomaron como referencia los trabajos de Delgado-Arroyo, *et al.* (2018), Silva-Cascante *et al.* (2020) y Otálora, *et al.* (2021), en los cuales realizaron análisis FTIR en mucilagos de nopal de la especie *Opuntia ficus*, para diferentes objetivos, primeramente, en los espectros de mucilago se presentan un pico característico de agua correspondiente a una banda ancha de  $3300\text{ cm}^{-1}$  (enlace O-H). Además, el mucilago se caracteriza por presentar dos bandas agudas sobresalientes, la primera de gran intensidad de aproximadamente  $1040\text{ cm}^{-1}$  que involucra el estiramiento de C-O y la segunda de mediana intensidad de aproximadamente  $1600\text{ cm}^{-1}$  relaciona-



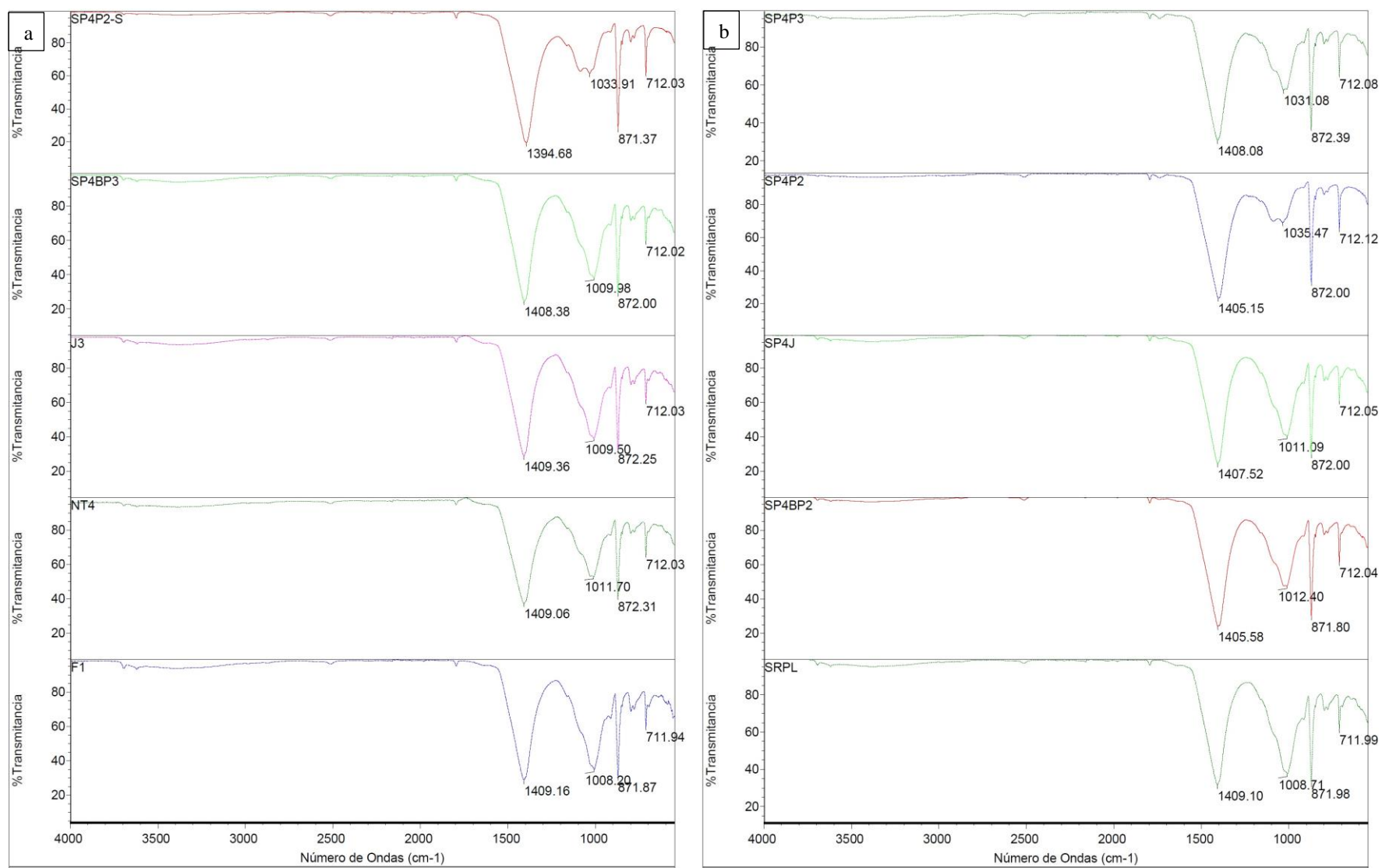


Figura 57. Espectros infrarrojos por FTIR correspondientes a los 10 morteros históricos estudiados en este trabajo. De arriba hacia abajo están identificados como a) SP4P3, SP4P2, SP4J, SP4BP2, SRPL y b) SP4P2-S, SP4BP3, J3, NT4 y F1.

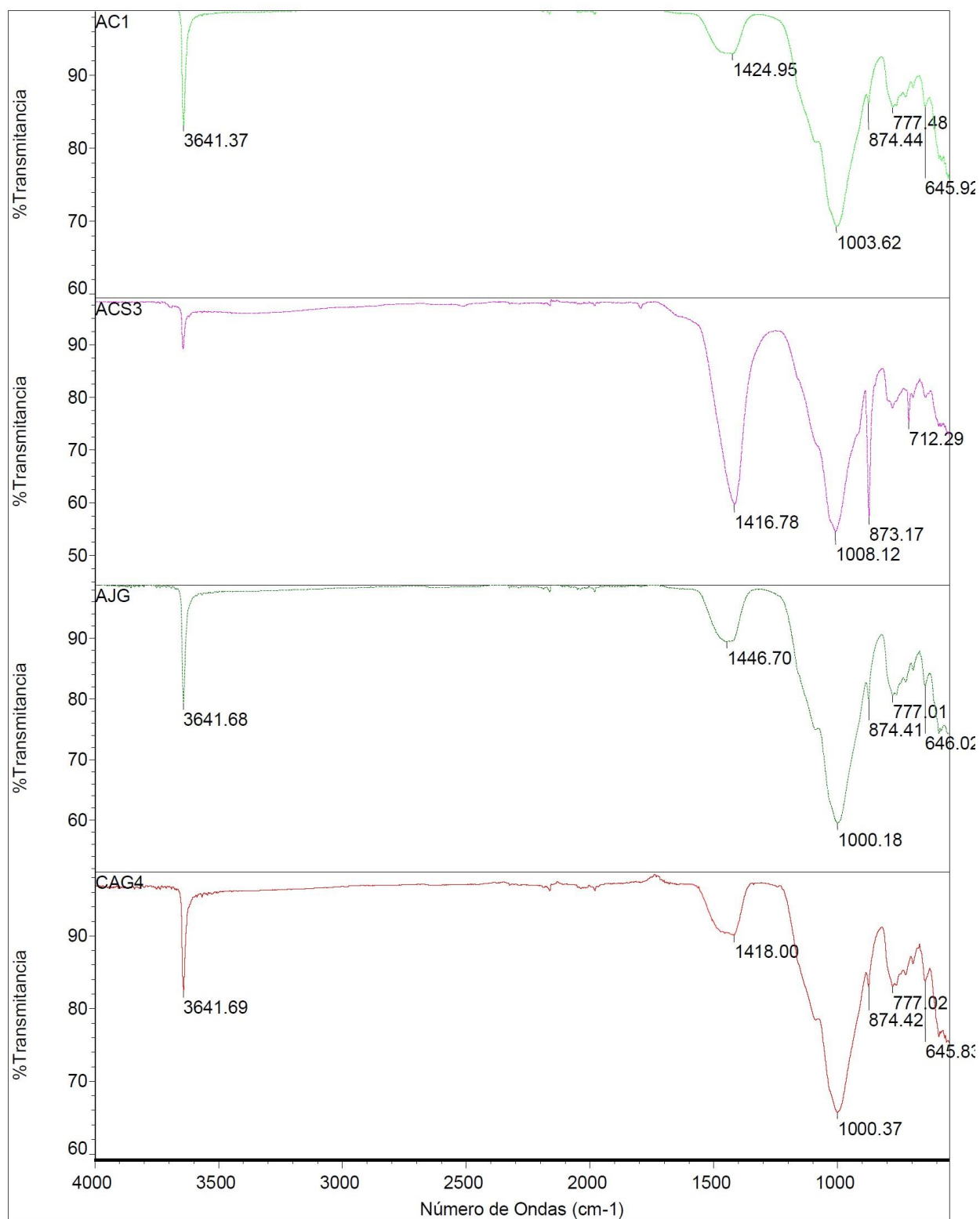


Figura 58. Espectros infrarrojos por FTIR correspondientes a los 4 morteros de restauración estudiados en este trabajo. De arriba hacia abajo están identificados como: AC1, ACS3, AJG y CAG4.

das a las vibraciones de estiramiento del grupo carbonilo C=O. Guillen-Aparicio *et al.* (2019) reporta que las bandas asociadas a mucilago *Opuntia ficus* está asociada por dos bandas de intensidad correspondiente a los enlaces C-O y R-O-R.

## **6. DISCUSIÓN**

### **6.1. Registro litológico y de intensidad de daños de las rocas del edificio D**

Los distintos tipos de roca presentes en los inmuebles históricos, en conjunto con su acomodo, distribución y propiedades físicas, pueden ser afectados por diferentes tipos de meteorización. Un registro litológico y de daños resulta ser esencial para el entendimiento del comportamiento de las rocas ante diversos factores intrínsecos y extrínsecos, así como, también aporta información acerca de los sistemas constructivos que se han utilizado a lo largo del tiempo, por lo que se considera un requisito previo para la caracterización y elección apropiada de los materiales de construcción para la conservación y restauración de los bienes inmuebles (Siedel y Siegsmund, 2014).

#### **Registro litológico**

Durante los registros litológicos realizados en el edificio D, tanto en las zonas originales como en las consideradas como de restauración (separadas por línea negra en los esquemas litológicos de las fachadas) de las 4 fachadas (norte, sur, este y oeste), se pudo identificar como roca predominante las areniscas de grano grueso y grano medio, seguidas en cantidad por los conglomerados de grano medio y areniscas de grano fino; por otro lado en las zonas de restauración se encontró una gran variedad de litología, que abarca las rocas predominantes que son areniscas y conglomerados, así como también calizas, rocas volcánicas y rocas metamórficas.

En lo que respecta al acomodo de rocas en las zonas originales (zona inferior de la línea negra marcada en todas las fachadas) se pudo observar un sistema constructivo similar en las 4 fachadas, el cual se basa en una sucesión de hiladas de grandes bloques de roca de labrada en forma de cuadro en la bases, alternadas con 2 o 3 hiladas de lajas de rocas y una hilada más de roca labrada en forma de cuadro hacia la cima, en la cuales la orientación predominante es horizontal, sin embargo hay alternancias dentro de este sistema constructivo de bloques con orientación vertical, por lo que dicho sistema coincide con lo realizado por Lerma-Pérez (2021) en el edificio J de la zona arqueológica de Monte Albán y el cual según la interpretación de este trabajo se asemeja al sistema constructivo “opus nuevo” correspondiente a la época II y IIIA de Monte Albán, consultado en Robles García (2011), más sin embargo dichas alternancias de bloques de roca verticales en estas zonas originales, nos indican la presencia de otros sistemas constructivos más recientes que se han empleado a lo largo de la historia.

Aunado a esto, se pudo observar que en gran parte de las zonas de restauración no existe una orientación o sistema constructivo predominante en las rocas, comenzando por la fachada este y oeste en donde las rocas muestran un arreglo geométrico totalmente desordenado, y los bloques que conforman las paredes muestran formas irregulares e incluso redondeadas y gran parte de éstas se muestran orientadas verticalmente con respecto al acomodo de sus granos, en especial la fachada oeste la cual se caracteriza por tener una gran cantidad de rocas dispuestas verticalmente y exceptuando el lado norte de la fachada este, donde se sigue un arreglo constructivo similar al original. Además, la fachada sur en sus extremos que corresponden a las paredes 1, 2, 3 y 4, se muestra de la misma manera un arreglo y sistema desordenado, sin embargo, en su escalinata sur, se observan bloques de tamaños promedios por estar dispuestos en una escalinata, pero se diferencian una gran cantidad de bloques de forma vertical en las partes superiores de esta. Por lo que de la misma manera que en el párrafo anterior, dichos arreglos desordenados coinciden con el documentado en el edificio J por Lerma-Pérez (2021).

Por último, la fachada norte se distingue de todas, ya que tanto en la zona original como zona de restauración se observa un arreglo geométrico muy homogéneo donde existe una sucesión de bloques cuadrangulares con lajas de roca en forma horizontal.

### **Registro de intensidad de daños**

Mediante el mapeo de daños se pudo identificar como principal patrón de deterioro la delaminación la cual se encontró distribuida heterogéneamente de manera superficial en todas las estructuras de cada una de las cuatro fachadas, principalmente en rocas areniscas de grano fino, ya que la delaminación es un proceso que afecta principalmente a las rocas laminadas como las areniscas la cual se genera mediante una separación física en capas y es provocada generalmente por la presencia de sales que se albergan principalmente en la atmósfera y cristalizan dentro de los poros de las rocas cuando hay presencia de agua como la de lluvia provocando tensiones dentro de estos (presión de poro) y generando el desprendimiento en capas (Snethlage y Wendler, 1997; Steiger y Charola, 2011; Siedel y Siegsmund, 2014). Este proceso se pudo observar en los procesos de experimentación por cristalización de sales en Lerma-Pérez (2021) donde se observa el proceso de delaminación en areniscas de Monte Albán que fueron sometidas a una solución salina.

Cabe destacar que las principales fachadas afectadas por delaminación fueron la fachada sur y oeste, en las cuales se pudo observar un factor importante que probablemente podría estar



influyendo en gran medida en estas fachadas y puede ser revisado en la sección 4.3, donde se monitorearon las condiciones de temperatura que adquieren las rocas en Monte Albán y se pudo observar que estas dos fachadas resultaron absorber mayor temperatura debido a la ubicación de estas ya que de acuerdo a los datos obtenidos de temperatura es posible que durante el día tengan mayor exposición al sol a comparación de las dos fachadas restantes, por lo que aumentos de temperatura pueden causar cambios de dilatación en el volumen de las rocas, sobre todo en rocas que tienen altos contenido de carbonatos de calcio como las rocas sedimentarias de la Formación Jaltepetongo, que forman parte del edificio D (González-Alvarado, 1970; Lerma-Pérez, 2021), ya que la calcita muestra importantes valores de expansión térmica, ocasionando desintegración granular (Kessler, 1919; Franzini, *et al.*, 1983), lo que conduce de la misma forma a la separación en capas de las rocas laminadas.

En segunda instancia, el daño predominante seguido de la delaminación fueron las llamadas costras negras, las cuales se encontraron en su mayoría de igual manera que la anterior en las fachadas sur y oeste, tanto en areniscas como en conglomerados, además en las fachadas norte y este también se encontró, pero de manera minoritaria. Por lo que según la interpretación de este trabajo, estas costras negras están relacionadas directamente con la contaminación atmosférica y deposición acida, las cuales son causadas principalmente por reacciones químicas como se menciona en el apartado 3.2.5; además, se sabe que en rocas con altos contenidos de carbonatos como las areniscas y conglomerados de Monte Albán el principal producto de reacción que genera estas costras negras es el sulfato de calcio en forma de yeso, que se genera por la incrustación de partículas contaminantes en el aire y la razón por la cual predominan en la fachada sur y oeste es por que probablemente las direcciones de viento predominan hacia estas direcciones; por consiguiente se recomienda realizar un análisis que nos arroje la composición exacta de estas costras.

Este tipo de daño se encontró primeramente en las partes superiores de la escalinata de la fachada sur donde se encontraron gran cantidad de rocas dispuestas verticalmente y se puede observar que se presentan en una especie de agrupaciones mostrando un patrón de escurrimiento, ya que solo se generan cuando hay presencia de agua como la de lluvia que escurre a lo largo de las estructuras y puede generar este patrón y de la misma manera en la fachada oeste estas costras se encuentran agrupadas sobre todo en el lado norte (Figura 30) donde se encontró un arreglo totalmente desordenado con gran cantidad de rocas orientadas verticalmente y de la misma manera en las

partes superiores de la fachada. Cabe destacar que las costras de yeso se observan solo de manera superficial en las rocas.

Prosiguiendo con los daños se encuentra la incrustación mineral de calcita la cual se encuentra distribuida en gran cantidad de manera aleatoria principalmente en las fachadas norte, sur y este, aunque cabe aclarar que se observó que este no es un daño que afecta directamente a la estructura, ya que se debe a una cristalización diagenética la cual rellena los planos de debilidad que facilita el fracturamiento de la roca donde se genera esta incrustación mineral, sin embargo en este trabajo se tomó en cuenta ya que es muy notable entre todas las rocas, ya que esta cristalización es muy característica de estas rocas por su alto contenido calcáreo .

Por otra parte, las costras blancas carbonatadas, aunque de manera minoritaria en comparación con los daños anteriores, se caracterizaron por presentarse en algunas de las rocas principalmente en las partes bajas de la fachada oeste y en la parte central de la fachada norte, donde se registraron valores significantes de humedad (véase sección 4.3). Así mismo, la alveolización se encontró en menor cantidad de forma aleatoria de igual manera predominando en las fachadas mencionadas, tanto en areniscas, calizas y conglomerados de grano fino.

Por último se mencionan algunos otros de los daños como los son mecánicos, que se encontraron distribuidos en todo el edificio D, las fracturas que se encuentran generalmente de forma aleatoria sobre todo en algunas de las areniscas y además sobresalen las encontradas a través de la estructura que se distinguen por estar dispuestas entre la separación de la zona original y la zona de restauración (véase como ejemplo la fachada oeste lado norte, figura 30) y además también se pueden observar en los extremos de la fachada norte y este, las cuales están siendo provocadas por inestabilidad de los taludes que sostienen el edificio por el desnivel del terreno donde se encuentra asentado el edificio D.

El resto de los daños de forma aleatoria, como el *chipping*, *pitting*, patina de hierro (en areniscas), no se observaron con ningún tipo de patrón.

Recapitulando, según los daños encontrados en este trabajo se pueden comparar con los descritos por Lerma-Pérez (2021) en su trabajo para la caracterización de las rocas del edificio J y del edificio de Danzantes en la zona arqueológica de Monte Albán, donde los daños predominantes que se describen en su trabajo corresponden a los causados por erosión y además el *pitting*, generalmente

identificados en conglomerados, por lo que en definitiva se puede afirmar que el tipo de roca así como su orientación y distribución, condicionan el tipo e intensidad de deterioro, además también influye la ubicación y orientación de cada una de las fachadas del edificio correspondiente.

## 6.2. Propiedades petrofísicas de las rocas de Monte Albán

Las propiedades físicas de las rocas en conjunto con su composición son directamente las responsables de su comportamiento ante diversos agentes intrínsecos y extrínsecos, principalmente la porosidad, la cual se considera un parámetro importante por tener una relación directa con el resto de las propiedades de las rocas, como lo es la densidad, capacidad de absorción, dilatación y propiedades mecánicas (Siegesmund y Dürrast, 2011).

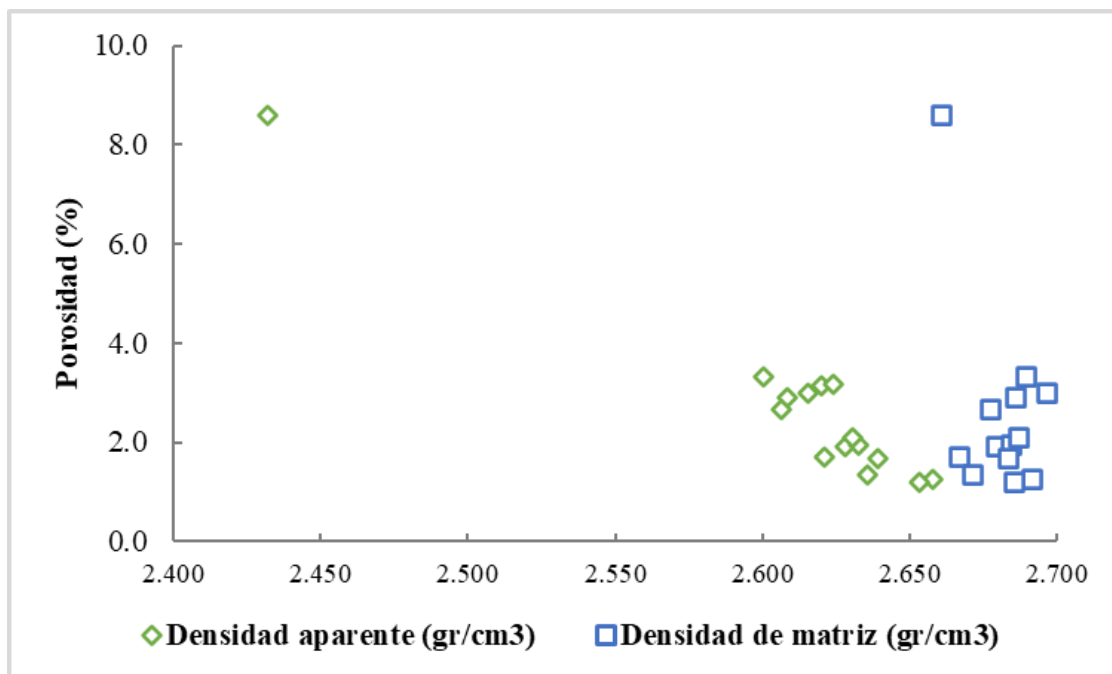


Figura 59. Gráfico correspondiente a los valores de densidad aparente y densidad de matriz con respecto a la porosidad.

Debido a esto, como se vio anteriormente en el apartado 4.4, se realizaron algunas pruebas petrofísicas para conocer primeramente sus propiedades de espacio poroso (ver tabla 3) en donde se pudieron clasificar tanto areniscas y conglomerados como rocas poco porosas. En la figura 59 se pueden observar los valores de ambas densidades medidas (de matriz y aparente) vs. la porosidad, en donde se muestra una relación para ambas, es decir para la densidad de matriz donde solo se toma en cuenta los componentes de la roca, las densidades promedio que se obtuvieron tanto para areniscas como conglomerados fue de 2.68 g/cm<sup>3</sup>, cuyo valor refleja las densidades

reales de los componentes principales de las areniscas como lo es el cuarzo un mineral principal y en el caso de los conglomerados de Monte Albán de igual manera. Además, en cuanto a la densidad aparente la cual es establecida con respecto a la porosidad de una roca, se puede observar una relación lineal, es decir a mayor porosidad, las densidades son más bajas, sin embargo, los valores de densidad aparente son en promedio similares a los de densidad de matriz debido a los bajos valores de porosidad que presentan las rocas.

Aunado a esto, cabe mencionar un valor que destaca de entre el resto de las muestras de roca el cual corresponde al de la arenisca de grano fino, la cual arrojó el valor más alto de porosidad (8%) (ver tabla 3 muestra MAD-F) y de igual manera durante los registros de daños este tipo de areniscas de grano fino, destacan por ser las más afectadas ante la delaminación, por lo que se confirma la influencia de esta propiedad ante el deterioro.

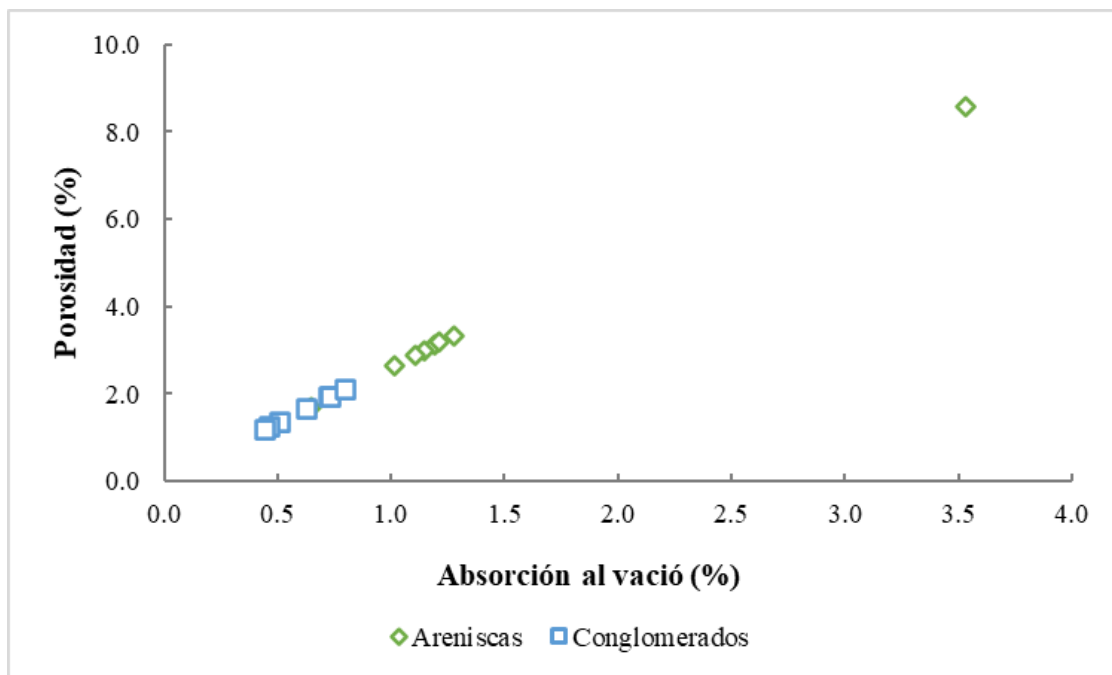


Figura 60. Gráfico correspondiente a los valores de absorción al vacío tanto de areniscas y conglomerados con respecto a la porosidad.

Por otro lado, en cuanto a las propiedades de retención de agua, las cuales son importantes conocer ya que el agua es uno de los principales causantes de daño en las rocas de construcción. Primeramente, se hizo una correlación entre los valores de porosidad y absorción al vacío obtenidos mediante la prueba de porosidad-densidad (sección 4.3.1), donde se puede observar de igual manera que en la anterior una correlación lineal donde conforme aumenta la porosidad de la misma manera aumenta la absorción, siendo los conglomerados las rocas menos absorbentes por sus bajas

porosidades. Esta relación también muestra que la porosidad de las rocas, aunque es relativamente pequeña es de tipo efectiva, es decir los poros se encuentran interconectados. (Figura 60).

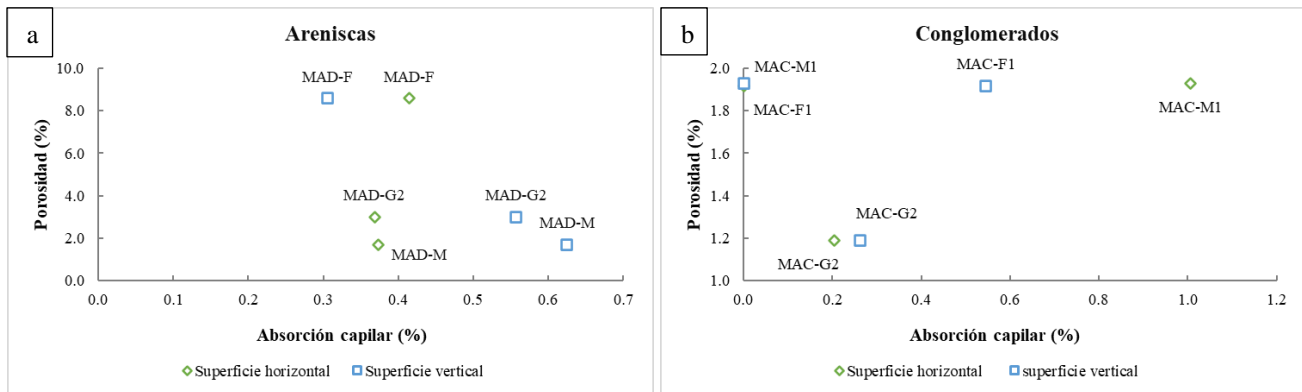


Figura 61. Gráficas correspondientes a la capacidad de absorción por capilaridad con respecto a la porosidad: a) areniscas y b) conglomerados.

En segunda instancia también se pudo realizar la correlación correspondiente a porosidad vs. absorción de agua por capilaridad medida en sus dos direcciones (plano XY, horizontal y plano XZ, vertical), la cual se puede visualizar en la figura 61, que tanto para las areniscas de grano medio y grueso (MAD-M y MAD-G2) y los conglomerados de grano fino y grano grueso (MAC-F1 y MAC-G2) la capacidad de absorción aumento al colocarlas en el plano XY (vertical), a excepción de la arenisca de grano fino y el conglomerado de grano medio, las cuales mostraron una mayor absorción en el plano XZ (horizontal), además en esta ocasión se mostró una máxima absorción en algunos conglomerados con respecto a las areniscas, sin embargo estos últimos puntos se pudieron ver influenciados por la presencia de alguna grieta o fisura presente en las caras medidas que permitió una mayor cantidad de agua a la estructura porosa.

Recapitulando, con respecto a la capacidad de absorción, los valores que se registraron en ambas pruebas (al vacío y capilarmente) fueron muy bajos, por lo que ambas tipologías mencionadas se consideran rocas ligeramente absorbentes.

Finalmente, la resistencia de los materiales es uno de los parámetros básicos para clasificar las rocas de construcción y esta depende directamente de las propiedades físicas como lo es la porosidad y además de otros factores como lo es su composición, fabrica, el envejecimiento de las rocas y/o presencia de humedad, es por eso por lo que se realizó una correlación igualmente que en las anteriores de la porosidad vs. los valores de resistencia obtenidos sección 4.3.3.

En la figura 62 se pueden observar dos tendencias, la primera de ellas en la que se muestran los primeros tres ejemplares con mayor porosidad al resto (MAC-M2, MAD-G2 y MAD-F) se observa que conforme la porosidad de la roca aumenta de igual manera la resistencia de la roca aumenta, se supondría que a mayor porosidad la resistencia de la roca disminuye, sin embargo, no se mostró una relación lineal de disminución de resistencia, probablemente debido a que como son rocas muy compactas su tensión longitudinal la pudieron haber experimentado en planos de debilidad como grietas.

Por otro lado, y de manera contraria, existe una tendencia más, donde el resto de los ejemplares (MAC-G2, MAC-F1 y MAD-M) que muestran valores de porosidad más bajos que los anteriormente mencionados, si muestran una relación lineal donde sus altos valores de resistencia a la compresión son debido a la disminución de la porosidad.

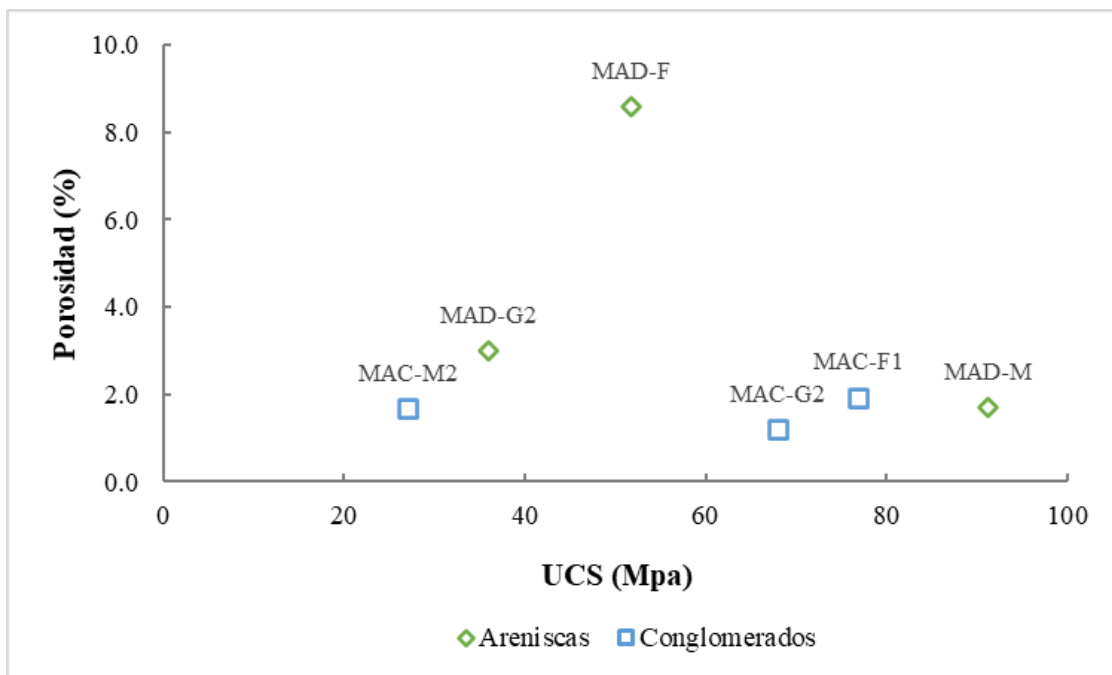


Figura 62. Graficas correspondientes a UCS (Mpa) con respecto a la porosidad.

### 6.3. Evaluación geoquímica y física de los morteros de Monte Albán

La caracterización de morteros consistió en la aplicación de una serie de metodologías que se pudieran adaptar al estudio de estos, los cuales nos permitieron confirmar la composición y diferencia entre morteros históricos y morteros de restauración.



Por lo tanto, con base a los resultados generales que se obtuvieron a partir de cada uno de los análisis que se realizaron (tabla 12), se pudo determinar la composición de los morteros históricos, los cuales como material principal muestran una gran predominancia de carbonatos ( $\text{CaCO}_3$ ) derivados de la cal utilizada para la conformación de estos es decir de su matriz, además presenta cantidades significativas de cuarzo y en menor cantidad se encontraron componentes provenientes de las rocas correspondientes a la geología del lugar, lo que resume como ya se ha dicho anteriormente, que dichos morteros presentan una escases de arena deriva de la erosión de rocas volcánicas.

Por otro lado, en los morteros de restauración se pudo observar que el material predominante resulta ser el cuarzo, además se detectó la presencia de portlandita, la cual es un hidróxido de calcio proveniente del cemento y de manera contraria a los anteriores, estos mostraron enriquecimientos en componentes provenientes de arenas de las cuales forma parte el cuarzo y material volcánico, por lo que la presencia de estos cambia totalmente la composición del mortero original.

Tabla 12. Resumen general correspondiente a la composición de los morteros históricos y de restauración

Análisis	Mortero histórico	Mortero de restauración
<b>LFRX</b>	CaO: > 44 %      SiO <sub>2</sub> : < 38%	CaO: >19 %      SiO <sub>2</sub> : > 60%
	Empobrecimiento en: Ti, Al, Na y K Enriquecimiento en: Mg, Fe y P	Empobrecimiento en: Mg, Fe y P Enriquecimiento en: Ti, Al, Na y K
<b>ICP-MS</b>	Referencia: MMA	Ligeras anomalías positivas y negativas con respecto a MMA.
		Grandes anomalías en Sr, Ti y P.
<b>DRX</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Picos de gran intensidad: Calcita</li> <li>• Picos de menor intensidad: Cuarzo</li> <li>• Poca intensidad de: Feldespatos alcalinos y plagioclasa, minerales de alteración (illita y caolinita) y minerales accesorios (muscovita, hornblenda, osumilita y cloritoide).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Picos de gran intensidad: Cuarzo</li> <li>• Picos de menor intensidad: Portlandita</li> <li>• Poca intensidad de: Calcita, feldespatos alcalinos y plagioclasa, y minerales accesorios (biotita, crossita y clinocloro)</li> </ul>
	Componentes encontrados por orden de predominancia:	Componentes encontrados por orden de predominancia:
<b>Conteo de componentes</b>	C: > 42%, CI: < 30%, LS: <15%, CO: < 5.5%, LV: ≥ 3% y LM: ≥ 0 %	CI: < 60%, C: > 15%, CO: < 7.5%, LS: ≥ 3%, LM: ≥ 3%, LV: ≥ 0 %

*C: carbonatos, CI: cristales incoloros, CO: cristales oscuros, LV: líticos volcánicos, LS: líticos sedimentarios y LM: líticos metamórficos. MMA: Mortero de Monte Albán.*

Aunado a esto, con respecto al análisis granulométrico de los morteros históricos, como ya se mencionó anteriormente, los valores de los parámetros estadísticos que se estudiaron en este trabajo (sección 5.4) fueron muy variables de una muestra a otra, sin embargo se pudieron diferenciar de entre todas, las muestras SP4P3, SP4P2, SP4P2-S y NT4, correspondientes a algunos de los pisos de las estructuras y núcleos de tierra que se extrajeron, las cuales mostraron predominancias de tamaño de grano hacía los materiales más gruesos (Gravas medias a gruesas). No obstante, para el resto de los ejemplares también se mostraron valores predominantes hacia el material grueso, sin embargo, en estos destaca el tamaño de arenas gruesas a muy gruesas, menor que el de los ejemplares mencionados en el párrafo anterior.

Además, en cuanto a los morteros de restauración muestran la misma predominancia de tamaño de grano que los anteriores, es decir hacia el material grueso, de gravas finas a gruesas, por lo que no se pudo determinar una diferencia significativa entre morteros históricos y de restauración, además de manera general todas las muestras analizadas resultaron ser de mal clasificadas a muy mal clasificadas.

Finalmente, en relación a las evidencias anteriores en los análisis de FTIR (sección 5.5), se pudieron identificar cada uno de los grupos funcionales tanto para morteros históricos como para morteros de restauración, sin embargo, de acuerdo a los trabajos tomados como referencia (Delgado-Arroyo *et al.*, 2018; Silva-Cascante *et al.*, 2020; Guillen-Aparicio *et al.*, 2019; Otálora, *et al.*, 2021) en donde asocian como bandas características del mucilago *Opuntia ficus* las longitudes de  $3300\text{ cm}^{-1}$ ,  $16000\text{ cm}^{-1}$  y  $1040\text{ cm}^{-1}$ , se determinó que no fue posible identificar vestigios de mucilago de nopal en los morteros históricos, ya que estos no presentan las longitudes de onda características que se asignan al mucílago de nopal.

No obstante, cabe destacar que las gomas vegetales o mucilagos, se pueden degradar fácilmente con el tiempo, además debido a que pudo haber estado originalmente mezclado con otros agregados y que a lo largo del tiempo ha estado en contacto con diversas sustancias ambientales y tejidos vegetales de otras plantas, se puede dificultar la identificación de mucilago debido a la interferencia de provocan los otros componentes, por lo que cabe la posibilidad, de que con un método como lo es FTIR no sea el método ideal para identificar de manera directa esta sustancia.

Por último, mediante FTIR se pudo identificar una notable diferencia para el mortero de restauración, que comprueba la presencia de agregados de distinta composición a los originales

como lo es la portlandita  $\text{Ca(OH)}_2$  que de la misma manera se identificó mediante DRX. Además, el mortero histórico, así como el mortero de restauración mostraron las mismas longitudes de onda (a excepción de la correspondiente a la portlandita), por lo que se determinó que pueden ser asociados a diversos componentes propios de un mortero como los carbonatos.

## CONCLUSIONES

La caracterización de los materiales constructivos ha sido fundamental para conocer el comportamiento de los materiales constructivos ante diversos factores internos y externos que afectan a las rocas. Primeramente, mediante la evaluación litológica fue posible la identificación del tipo de roca y arreglo geométrico original en cada una de las fachadas del inmueble y el cambio que se ha provocado a lo largo de las diversas intervenciones que se han realizado en el edificio D.

De manera general, se identificaron dos tipos principales de roca como material principal de construcción, que son las areniscas y los conglomerados, predominando para todas las fachadas, las areniscas de grano grueso y grano medio, seguidas en cantidad por conglomerados de grano medio y areniscas de grano fino. Se pudo observar que en la zona original la litología se limita a rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados y calizas) y de manera contraria en las zonas de restauración la litología que se encontró fue más diversa, en su mayoría rocas sedimentarias, pero además también algunas rocas volcánicas y metamórficas.

Durante la evaluación litológica del edificio D, en las zonas originales se pudo determinar un estilo constructivo que se asemeja al “*opus nuevo*”, donde el arreglo geométrico consta de una sucesión de una hilada de grandes rocas labradas en forma de cuadro alternada con dos o tres hiladas de rocas alargadas, lo que permite un arreglo más ordenado en la estructura y el acomodo predominante de bloques horizontales (plano XY), aunque en ocasiones se encontraron alternancias de bloques verticales, lo que indica la intervención de otros sistemas constructivos.

Y de manera contraria, en las áreas correspondientes a las zonas restauradas a excepción de las molduras, taludes escalonados y algunas zonas de la parte restaurada, existe un acomodo totalmente desordenado, donde la mayoría de las rocas pertenecientes a la zona restaurada presentan formas irregulares e incluso redondeadas y se destacan dentro de este trabajo la fachada sur hacia la cima de su escalinata y el lado norte de la fachada oeste donde se encontraron gran cantidad de bloques verticales.

Mediante el registro de daños en conjunto con la caracterización litológica y petrofísica, fue posible determinar los daños que predominan en el edificio D e identificar algunos de los factores que afectan directamente en la alteración del inmueble.

La delaminación se estableció como principal deterioro de las areniscas (roca preponderante en el edificio D) en especial las de grano fino y se pueden establecer como principales mecanismos de alteración el crecimiento de sales y los ciclos termales, que inducen la expansión de la roca provocando su desprendimiento en capas, siendo las fachadas sur y oeste la más afectadas por este tipo de intemperismo, ya que se pudo observar que debido a su posición, durante el día estas fachadas tienen una mayor exposición al sol lo que provoca altos valores de absorción de temperatura.

En segundo lugar, las costras negras se establecieron como otro deterioro predominante y de la misma manera que la anterior afectan en gran medida las fachadas sur y oeste, principalmente en las zonas superiores de ambas y el lado norte de la fachada oeste, precisamente donde se encontraron gran cantidad de bloques verticales y de formas irregulares. Este daño es provocado por la incrustación de partículas contaminantes en la atmosfera, por lo que probablemente se presentan en gran cantidad en estas paredes por las direcciones dominantes del viento hacia el NE.

Es necesario resaltar que los daños anteriormente mencionados rara vez ocurren solos (delaminación y costras negras), es decir se necesita la presencia de agua para provocar y acelerar el deterioro, que generalmente en las construcciones es el agua de lluvia y a pesar de que las propiedades porosas fueron favorecedoras en todas las rocas analizadas (muy poco porosas) se demostró que el arreglo geométrico y orientación desordenada de las rocas si influye directamente en su intemperismo y este hecho se pudo confirmar mediante la prueba de absorción por capilaridad, donde se expone que las rocas con orientación vertical obtienen una mayor capacidad de absorción.

Las fachadas norte y este resultaron ser las menos afectadas debido a su posición, probablemente porque la cantidad de sol que reciben durante el día es menor a la anteriores y a que presentan una menor cantidad de bloques verticales; como daño predominante en ellas se encuentra la incrustación mineral, aunque se determinó como una cristalización diagenética de estas rocas.

Por último, el resto de los daños fueron encontrados de manera dispersa y en menor cantidad en todo el edificio D, como lo son las fracturas que se encontraron atravesando los límites de la zona original y de restauración es decir donde existe un cambio de material, además de en algunos extremos de las paredes por los desniveles del terreno. Las costras blancas carbonatadas se

encontraron en gran cantidad en las partes bajas de la fachada norte y oeste y su principal mecanismo de alteración resulto ser la presencia de humedad que provoca la disolución de minerales. La alveolización, el *chipping*, *pitting* y patinas de hierro no afectan en gran medida a la estructura del edificio.

Vinculado a esto, se concluye que las rocas presentes en el edificio D, son buenas rocas de construcción con altas resistencias y buenas propiedades físicas, ya que los daños que se observaron, aunque fueron en gran cantidad, se mostraron de manera superficial, no obstante, no se descarta el hecho de que las rocas como cualquier otro material lleguen a meteorizarse en gran medida a lo largo del tiempo, por lo que para aminorar los procesos de intemperismo se recomienda que las rocas sean colocadas de manera horizontal (plano XY) y que además se mantenga el sistema constructivo original, ya que permite un mejor acomodo de los bloques.

En cuanto al estudio de los morteros analizados en este trabajo, mediante la aplicación de diversos análisis (LFRX, ICP-MS, DRX, Granulometría y conteo de componentes y FTIR), se realizó la diferenciación de la composición entre los morteros históricos y los morteros de restauración. Por lo tanto, de manera resumida, se determinó que los morteros históricos presentan un enriquecimiento correspondiente a su matriz cementante es decir de carbonatos provenientes de roca caliza de la cual se obtiene la cal y además un empobrecimiento en otros componentes como el  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$  y  $K_2O$  y de manera contraria los morteros de restauración contienen una importante disminución de carbonatos que son sustituidos por sílice en gran cantidad (>60%) y ahora un enriquecimiento en el resto de los componentes ya mencionados, por lo que se puede concluir que se está haciendo uso excesivo de arenas derivadas de la erosión de rocas presentes en el lugar (areniscas y rocas volcánicas).

Por medio de los análisis geoquímicos correspondientes a LFRX e ICP-MS, se pudo determinar la composición exacta de los morteros de Monte Albán, generando una referencia específica para ellos la cual se definió en este trabajo como MMA y por lo tanto es posible tomar como referencia MMA para la comparación e identificación de morteros que no presenten la misma composición o que estén contaminados con otro tipo de material.

Seguido de esto, mediante el análisis correspondiente a DRX, también fue posible confirmar la disparidad entre ambos morteros estudiados, pero además en los morteros de restauración se



identificó la presencia de un componente correspondiente a  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandita), el cual nos indica la presencia de cemento o cal industrial que afecta la originalidad de MMA. Además de la misma manera que los análisis ya mencionados para el estudio de morteros, el conteo de componentes nos arrojó la misma información que distingue al mortero original pero esta vez de manera estadística, por lo que se resultó ser un buen método que nos puede arrojar resultados de buena calidad para la diferenciación de partículas y en cuanto al análisis granulométrico, se pudo establecer que antiguamente no se utilizaba un tipo específico de tamaño de grano para la conformación de morteros originales que los diferencie de los actuales.

Finalmente, el objetivo de la realización de FTIR fue obtener información acerca del uso de aglutinantes como el mucilago del nopal en morteros históricos, sin embargo, no se encontró ningún vestigio de esta sustancia, por lo que se llegó a la conclusión que el método no es el adecuado para la obtención específica de sustancias orgánicas en un mortero histórico, ya que estas se pueden degradar fácilmente con el tiempo por lo que es posible que ya no estén presentes en el mortero y por otra parte también cabe la posibilidad que debido a que esta mezclado con diversos agregados, estos creen una interferencia al momento de analizarlos que ocasiona la aparición de longitudes de onda correspondientes a otro tipo de material. Sin embargo, mediante FTIR, se reafirmó la aparición de portlandita que de igual manera se obtuvo mediante el análisis de DRX.

## REFERENCIAS

- Acosta, J.A. (1965) Preclassic and Classic Architecture of Oaxaca. Handbook of Middle American Indians, Vol. 3, R. Wauchope (Ed.), University of Texas Press, pp. 814 - 836. Texas.
- Almaguer-Rodríguez, J. (2010) Estudio Geoquímico de Elementos Traza en Unidades Volcánicas del CVSLP: Método ICP-MS (Validación del Método): San Luis Potosí, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Licenciatura, 91.
- Barboza-Gudiño J.R. (2012) Sedimentary Tectonics and Stratigraphy: The Early Mesozoic Record in Central to Northeastern Mexico, en Ömer Elitok (ed.), Stratigraphic Analysis of Layered Deposits, InTech
- Bernal, I. (1965) Archaeological Synthesis of Oaxaca. Handbook of Middle American Indians, R. Wauchope (ed.), University of Texas Press, Austin, v. 3. Pp. 744-813.
- Bland, W., Rolls, D. (1998). Weathering. Arnold, London.
- Blanton, R. (1976) The Origins of Monte Albán. Cultural change and continuity: Essays in honor of James Bennett Griffen, Ed. C.E. Cleland, pp. 223-232. Academic Press. Nueva York.
- Blanton, R., Feinman, G., Stephen A., y Linda M. (1999) Ancient Oaxaca: The Monte Albán State. Cambridge University Press, Cambridge.
- Blott, S. J., Pye, K. (2012) Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures. *Sedimentology*, 59(7), 2071–2096. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01335.x>.
- Caso. A. (1965) Sculpture and Mural Painting of Oaxaca. Handbook of Middle American Indians, editado por Robert Wauchope y Gordon R. Willey, vol. 3, Austin, University of Texas Press, pp. 849-870.
- Caso, A., Bernal I. y Acosta J.R. (1967) La Cerámica de Monte Albán, Memorias del Instituto Nacional de Antropología e Historia 13, México, Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Campa U. M. F., Coney P. J., (1982) Tectono-estratigraphic Terranes and mineral resource distributions in Mexico PEMEX, Department of Geosciences University of Arizona, Tucson.

- Camuffo, D., Del Monte, M., Sabbioni, C., Vittori, O. (1982) Wetting, deterioration and visual features of stone surfaces in an urban area. *Atmos Environ* 16:2253–2259.
- Chamley, H. (1989) *Clay Sedimentology*, Springer, Berlin, 623.
- Oliveros, A. (2002) Monte Albán, Oaxaca. La Ciudad de la Gente de las Nubes. *Arqueología Mexicana* Vol. X, No. 55, pp. 80 - 87.
- Otálora, M.C.; Wilches-Torres, A.; Castaño, J.A.G. (2021) Extraction and Physicochemical Characterization of Dried Powder Mucilage from *Opuntia ficus-indica* Cladodes and Aloe Vera Leaves: A Comparative Study *Polymers*, 13, 1689. <https://doi.org/10.3390/polym13111689>.
- Fahmel, B. (1991) *La Arquitectura de Monte Albán*. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Ferrusquía-Villafranca, I. (1993) Geology of Mexico: a synopsis. In *Biological diversity of Mexico. Origins and distribution*. T. P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot, and J. Fa (eds), pp. 3-108. Oxford: Oxford University Press.
- Fitzner, B., Basten, D. (1994) Gesteinsporosität – Klassifizierung, meßtechnische Erfassung und Bewertung ihrer Verwitterungsrelevanz – Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm “Steinzerfall-Steinkonservierung” 1992, Förderprojekt des Bundesministers für Forschung und Technologie. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- Folk, R., Ward, W. (1957) Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1), 3-26.
- Flannery, K. V. y Marcus, J. (2003) *The Cloud People: Divergent Evolution of the Zapotec and Mixtec Civilizations*. Percheron Press, New York.
- Flügel, E. (2004) *Microfacies of carbonate rocks: Analysis Interpretation and Application*, 2nd Edition. Germany; Springer, p. 1006.
- Franzini, M., Gratziu, C., Spampinato, M. (1983) Degradazione del marmo per effetto di variazione di temperatura. *Rend Soc It Min Petrol* 39:47–58.
- García-Nava, A (2020) *Estudio del Flujo de Detritos que Destruyó el Pueblo de Minatitlán, Colima, el 27 de octubre de 1959*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Tesis de Maestría, 179pp.
- González-Alvarado, J. (1970) Levantamiento Geológico del área Chilapa-Tlaxiaco, Oax: Pemex, p. 2.5-548.

- González-Licón (2011) *Desigualdad Social y Condiciones de Vida en Monte Albán, Oaxaca*. Instituto Nacional de Antropología e Historia, México D.F.
- González R. A., Mota M. S., Arceo y Cabrilla F. A., Zárate L. J. (1997) *Informe de la Carta Geológica-Minera y Geoquímica Oaxaca Escala 1:250,000*. Consejo de Recursos Minerales.
- Greger, O. (1930). *Druckfestigkeit und Bergfrische beim Granit*. *Straßenbau* 21, 99–102.
- Grüneisen, E. (1926). *Zustand des festen Körpers*. In: Geiger H, Scheel K (eds) *Handbuch der Physik*. Vol. 10, *Thermische Eigenschaften der Stoffe*. Springer-Verlag, Berlin.
- Guillen-Aparicio, J., León-Monter, E., Ortiz-Lara, N., Escudero-García, R. y Rojas-Valencia, M. N. (2019). *Study of properties of Echerhirhu-Block made with Opuntia ficus mucilage for use in the construction industry*. *Case Studies in Construction Materials*, 10, 1–7.
- Harker, A., (1909) *The natural history of igneous rocks*. Methuen, London.
- Joyce, Arthur A. (2000) *The founding of Monte Albán: Sacred propositions and social practices*. In *Agency in archaeology*, Eds. M.A. Dobres y J.E. Robb, pp. 71-91. Routledge. Londres y Nueva York.
- Joyce, Arthur A. (2001) *Poder sacrificial en Oaxaca durante el Formativo Tardío*. *Memoria de la Primera Mesa Redonda de Monte Albán*, Ed. N. Robles, pp. 97-110. CONACULTA-INAH, México.
- Joyce, Arthur A. (2004) *Sacred Space and Social Relations in the Valley of Oaxaca*. En *Mesoamerican Archaeology*, Eds. J.A. Hendon y R. Joyce, pp. 192-216. Blackwell. Malden.
- Kessler, D.W. (1919) *Physical and Chemical Tests on the Commercial Marbles of the US*. NBS Technologic Paper 123. Government Printing Office, Washington, DC.
- Koch, A., Siegesmund, S. (2004) *The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble*. *Environ Geol* 46:350–363.
- Kück, A. (2019) *Weathering behaviour and petrophysical properties of volcanic tuff as historical building stone in Oaxaca, Mexico*. Georg-August-Universität Göttingen.
- Lerma-Pérez, L.M. (2021) *Evaluación del deterioro y propiedades físicas de las rocas del Edificio J y Edificio de los Danzantes en la Zona arqueológica de Monte Albán, Oaxaca*. – México,

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Tesis de Maestría, 156 pp.

Loaeza-García, J.P. y 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*, 12 (194): 4-10.

López-Doncel, R., Wedekind, W., Dohrmann, R., Siegesmund, S. (2013) Moisture expansion associated to secondary porosity: an example of the Loseros Tuff of Guanajuato, Mexico. *Environ Earth Sci* 69, 1189–1201.

Marcus, Joyce y Kent V. Flannery (1996) Zapotec civilization: How urban society evolved in Mexico's Oaxaca Valley. Thames and Hudson. Londres.

Martínez y Ojeda, M. (2004) Recursos Naturales de la Zona Arqueológica de Monte Albán. México: Plaza y Valdes.

Medina-Villalobos, J. (2015) Arquitectura, Urbanismo y Aprovechamiento de Espacios en la Periferia de Monte Albán: Estudio de Caso del Conjunto de El Paragüito. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, Tesis de Licenciatura.

Middendorf, B., Hughes, J.J., Callebaut, K., Baronio G., & Papayianni, I. (2005a) Investigative methods for the characterisation of historic mortars - Part 1: mineralogical characterisation. *Materials and Structures*, 38, pp.761-769.

Monicard, RP. (1980) Properties of Reservoir Rocks: Core Analysis. Edition Technip, Paris.

Morales-Demarco, M., Jahns E, Ruedrich J. (2007) The impact on partial water saturation in rock strength: an experimental study on sandstone. *Z dtsh Ges Geowiss* 158, 869–882.

Morales-Isunza, A. C. (1992) Estado, Estructura Urbana y Materiales de Construcción en los Valles Centrales de Oaxaca. Escuela Nacional de Antropología e Historia, México D.F, Tesis de Licenciatura.

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; Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, Tesis de Maestría, 163 pp.

Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L.M., Roldán-Quintana, J., Aranda-Gómez, J.J., Morán-Zenteno, D., Alaniz-Alvarez, S.A., y Nieto-Samaniego, A.F. (1992) Texto explicativo de la quinta edición de la Carta Geológica de la República Mexicana escala 1:2,000,000: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales: 1-74.

Paddock, J. (1966) *Ancient Oaxaca. Discoveries in Mexican Archaeology and History.* Stanford University Press, California.

Piqué, T. y Vázquez, A. (2012) Uso de espectroscopía infrarroja con transformada de fourier (Ftir) en El Estudio De La Hidratación del cemento. *Concreto y cemento. Investigación y Desarrollo*, 3, pp. 62-71.

Ponce-de León, M.J., Valencia-Rivera, R., Ciudad-Ruiz, A. (2006) *Nuevas ciudades, nuevas patrias. Fundación y relocalización de ciudades en Mesoamérica y el Mediterráneo antiguo.* Sociedad Española de Estudios Mayas, pp. 209-239.

Rocha-Reina, K. (2020) *Estudios geológicos y petrofísicos de las rocas naturales de construcción en el centro histórico de Santo Domingo, República Dominicana.* Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura, 93 pp.

Raisz E. (1964) *Land Forms of Mexico* Geographic Branch of the Office of Naval Research, Cambridge Mass. U. S. A. 1 map.

Robles-García, N.M. (2011) Monte Albán. En *Arqueología Mexicana* Vol. XVIII, No. 107, pp. 34 - 38.

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.

Rodríguez, E (2011) *Atlas de riesgos del municipio de Oaxaca de Juárez.* Ayuntamiento de Oaxaca de Juárez-SEDESOL. Oaxaca, México.



- Ruiz (Eds.) Nuevas ciudades, nuevas patrias. Fundación y relocalización de ciudades en Mesoamérica y el Mediterráneo antiguo (pp. 209–239). Madrid: Sociedad Española de Estudios Mayas.
- Peschel, A. (1974) Zur Ermittlung und Bewertung von Festigkeitseigenschaften bei Natursteinen. *Z Angew Geol* 20,118–128.
- 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.
- Scott, John F. (1978) *The Danzantes of Monte Albán*. Dumbarton Oaks. Washington D.C.
- Sedlock L. R., Ortega G. F. Speed R. C. (1993) *Tectonostratigraphic Terranes and Evolution of Mexico*. San José State University, UNAM, Northwestern University.
- Siedel, H. y 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. y Snethlage R. (2011) *Stone in Architecture: Properties, Durability 4th Edition*. Germany: Springer. P. 552.
- Siegesmund, S. y Dürrast, H., (2011) Physical and mechanical properties of rocks. In: *Stones in Architecture: Properties, Durability 4th Edition* (130). Germany: Springer ,97-227.
- Silva Cascante, A.V., Vazquez Mora, C.A. y Uría Cevallos, G.R. (2020) Determinación del uso del mucilago de nopal en la construcción de la época colonial (caso Convento de San Diego). *Project, Design and Management*, 2(2), -. doi: 10.29314/pdm.v2i1.433.
- Steiger, M. (2005) Crystal growth in porous materials I: the crystallization pressure of large crystals. In: *Journal of crystal growth* 282 (3), S. 455–469.
- Steiger, M., Charola, A., Elena, Sterflinger, K., (2011) Weathering and Deterioration. In: Siegfried Siegesmund und Rolf Snethlage (Hg.): *Stone in Architecture. Properties, Durability*. 4th ed. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 227–316.

- Snethlage, R. y Wendler, E. (1997) Moisture cycles and sandstone degradation. In: Baer NS, Snethlage R (eds) Saving our architectural heritage: conservation of historic stone structures. Wiley, Chichester, pp. 7–24.
- Stockhausen, N. (1981) Die Dilatation hochporöser Festkörper bei Wasseraufnahme und Eisbildung. Diss TU Munich.
- Urrutia-Fucugauchi, J. y Ferrusquía-Villafranca, I. (2001) Paleomagnetic results for the Middle-Miocene continental Suchilquitongo Formation, Valley of Oaxaca, southeastern Mexico. – *Geofísica Internacional*, 40 (3), 191-205.
- Von Moos A. y De Quervin F. (1948) Technische Gesteinskunde. Birkhäuser, Basel.
- Winter, Marcus. (1984) Exchange in Formative highland Oaxaca. In Trade and exchange in early Mesoamerica, Ed. K.G. Hirth, pp.179-214. University of New Mexico Press. Albuquerque.
- Winter, M. (2006) La fundación de Monte Albán y los orígenes del urbanismo temprano en los altos de Oaxaca. In M. J. Iglesias Ponce de León, R. Valencia Rivera, & A. Ciudad Ruiz (Eds.), Nuevas ciudades, nuevas patrias. Fundación y relocalización de ciudades en Mesoamérica y el Mediterráneo antiguo (pp. 209–239). Madrid: Sociedad Española de Estudios Mayas.
- Washburn, E.W. (1921) A method of determining the distribution of pore sizes in a porous material. *Proc Nat Acad Sci* 7:115.
- Wedekind, W., López-Doncel, R., Dohrmann, R., Kocher, M., Siegesmund, S. (2013). Weathering of volcanic tuff rocks caused by moisture expansion. *Environ Earth Sci* 69, 1203–1224.
- Wedekind, W., Pöztl, C., López-Doncel, R., Platz, T. and Siegesmund, S. (2016) Surface hardness testing for the evaluation of consolidation of porous stones. *Science and art: a future for Stone*, I, 491-499.
- Winter, M. (2006) La fundación de Monte Albán y los orígenes del urbanismo temprano en los altos de Oaxaca. In M. J. Iglesias Ponce de León, R. Valencia Rivera, & A. Ciudad
- Weimann, MB. (2001) Hygrische Eigenschaften von Polymerbeton im Vergleich zu porösen mineralischen Werkstoffen im Bauwesen. Thesis, Technical University, Zurich, p.14.

# ANEXOS

## Anexo 1

### Glosario:

**Asentamiento:** Unidad arqueológica, analítica e históricamente significativa, sobre cuya base se realizan los análisis y comparaciones de las culturas prehistóricas y de las historias culturales. Un asentamiento arqueológico puede ser reconocido y descrito según las siguientes características: a) artefactos, b) otras pruebas de ocupación humana y c) su contexto de deposición (Chang, 1967).

**Escalinata:** Escalera exterior, de un solo tramo, que interconectaba los diferentes espacios de un conjunto monumental o andenerías

**Bien cultural:** Conjunto de bienes u objetos producidos a lo largo de la historia que dan cuenta de la memoria de las sociedades precedentes y actuales.

**Bienes inmuebles.** Conjunto de bienes patrimoniales naturales o edificados

**Mortero:** 1. Mortero hecho de cal, arena y agua, que se emplea en las obras de albañilería. 2. Mezcla de arena con tierra, cal ordinaria o hidráulica y cementos rápidos, Pórtland o puzolana, para formar una pasta que reúna y trabee los materiales que se emplean en una construcción, a fin de que en conjunto formen una sola pieza

**Relleno:** Conjunto de materiales culturales y de construcción que fueron arrojados a una zanja, entrepiso o nivelación, con el objeto de darle consistencia al terreno o de hacer un nuevo nivel más elevado.

**Sillar:** 1. Piedra labrada, de forma cuadrangular o de paralelepípedo, que formaba parte de la construcción de un edificio. Todas las caras estaban vestidas y todas las esquinas y los bordes eran cuadrados.

**Terraza:** Superficie aplanada rodeada por un escarpado fuerte; puede ser de aluvión o de roca sólida.

## Anexo 2

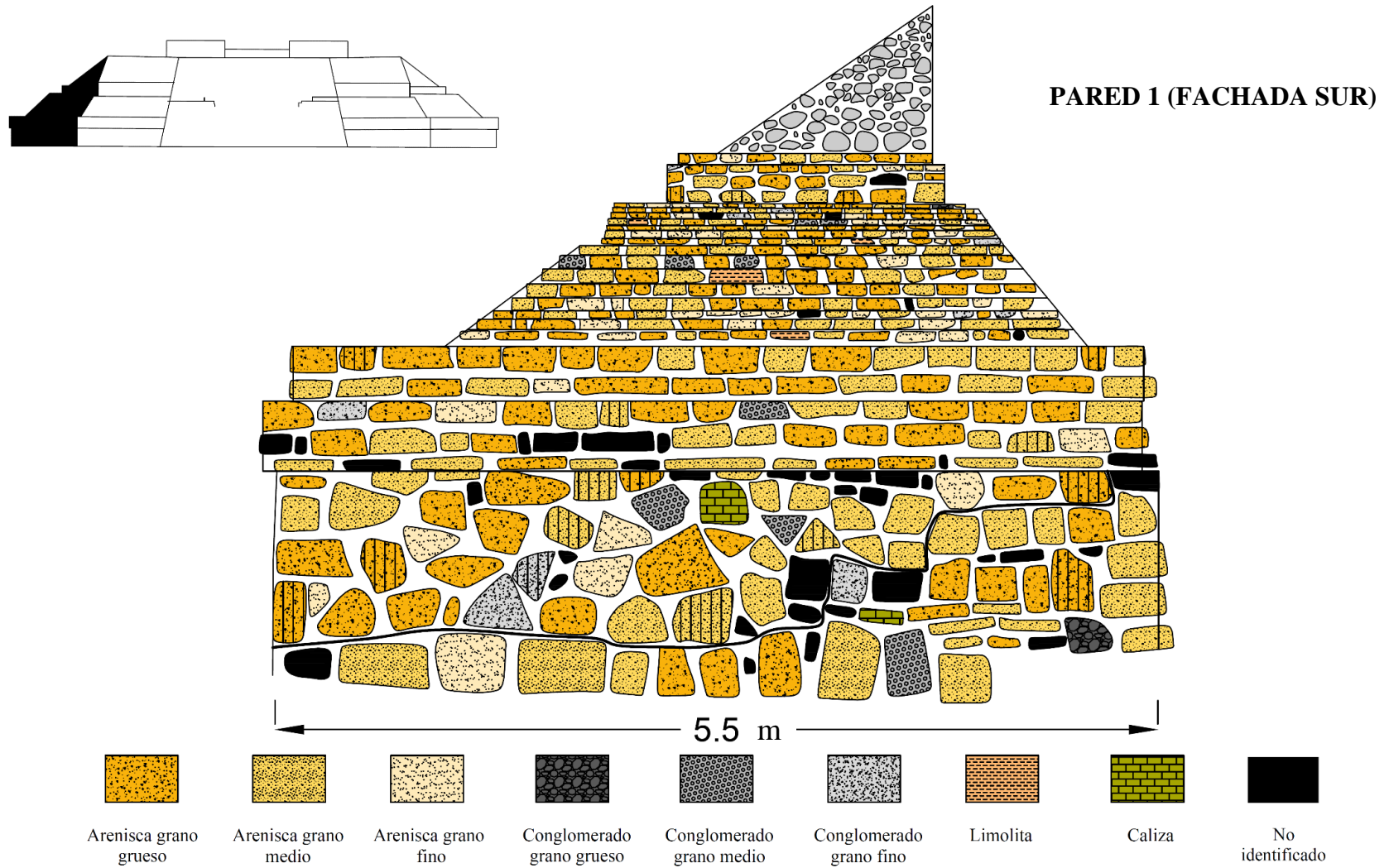


Figura 63. Registro litológico de la pared 1, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).

## PARED 1 (FACHADA SUR)

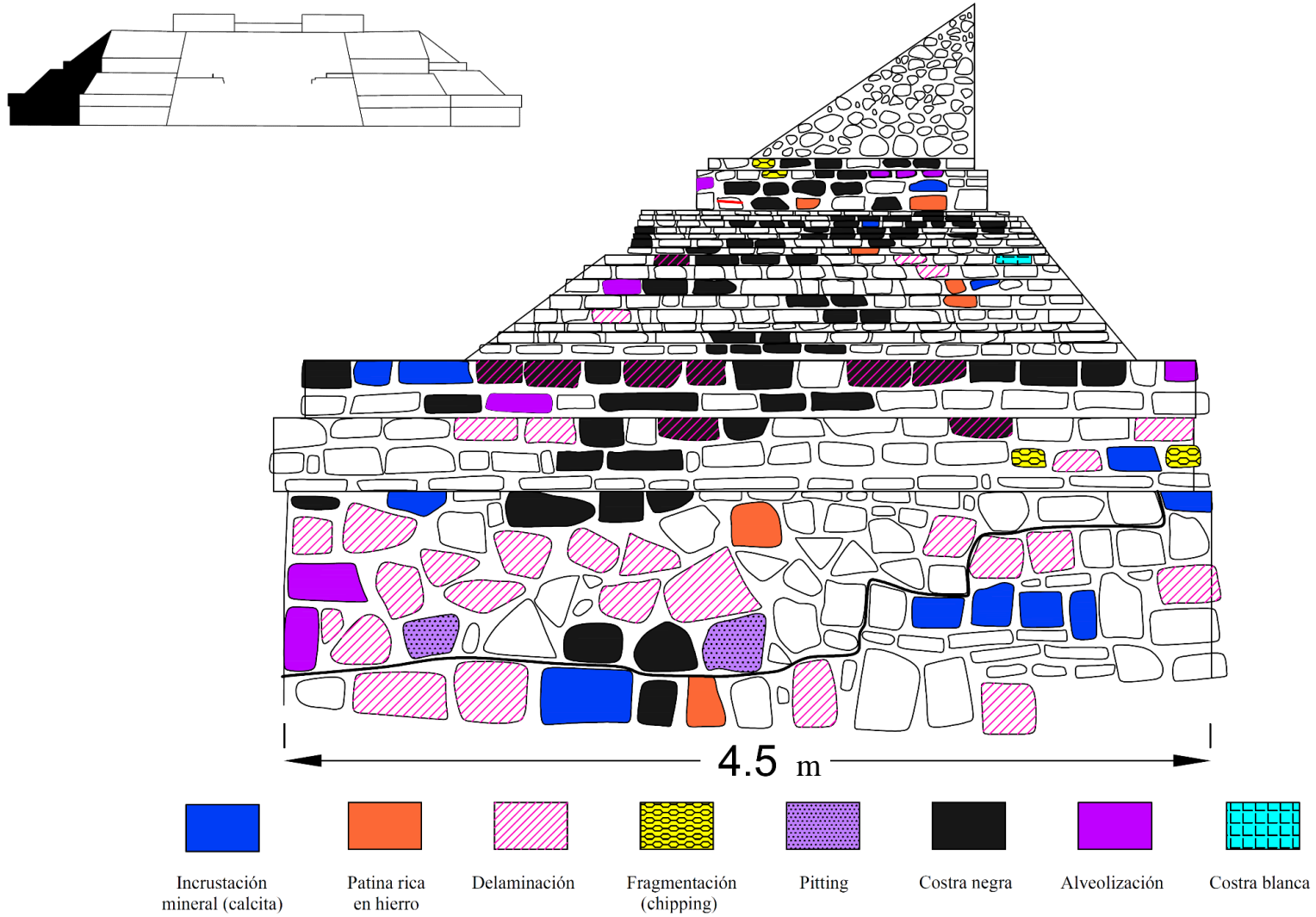


Figura 64. Registro de intensidad de daños de la pared 1, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).

## PARED 2 (FACHADA SUR)

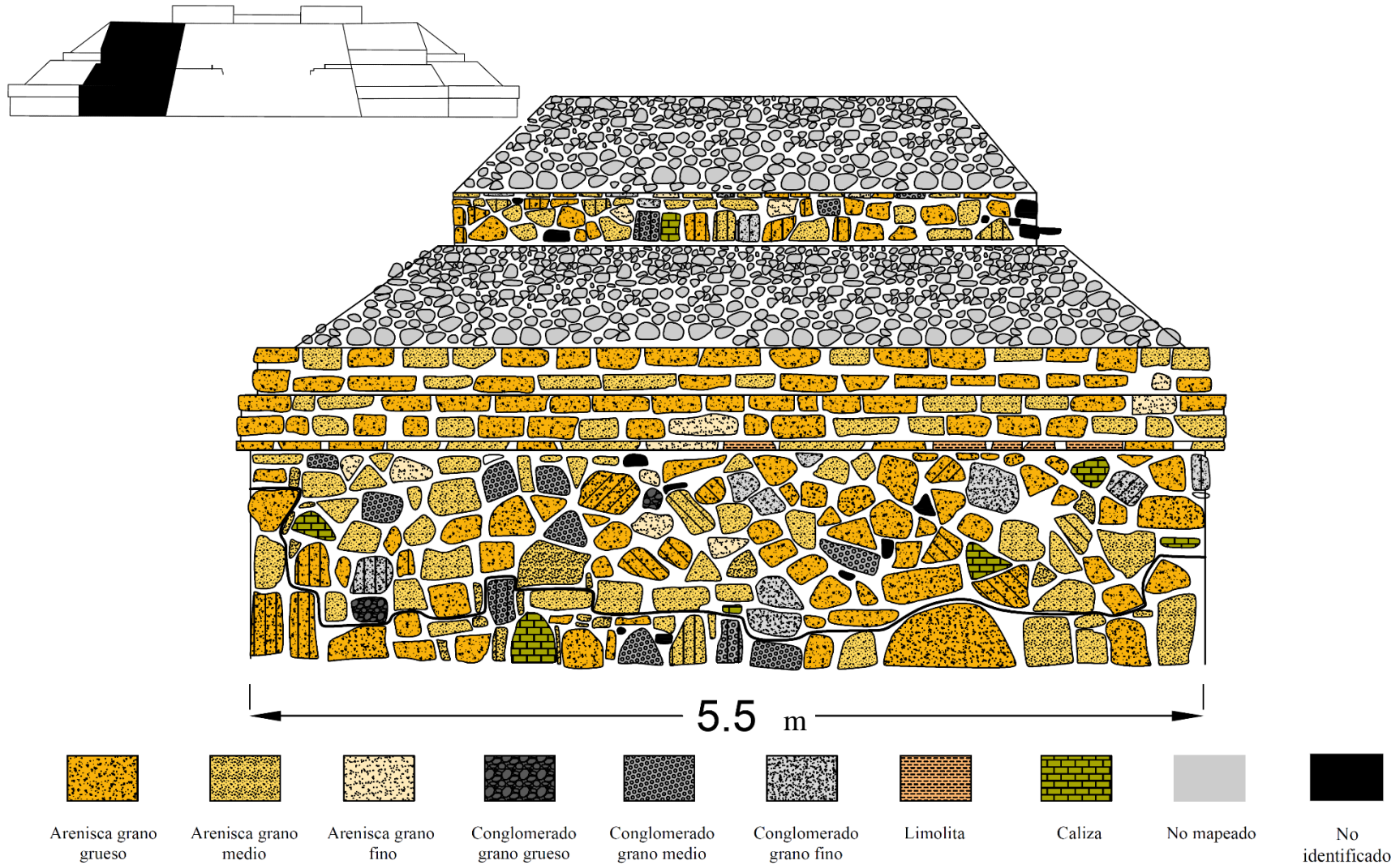


Figura 65. Registro litológico de la pared 2, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).



## PARED 2 (FACHADA SUR)

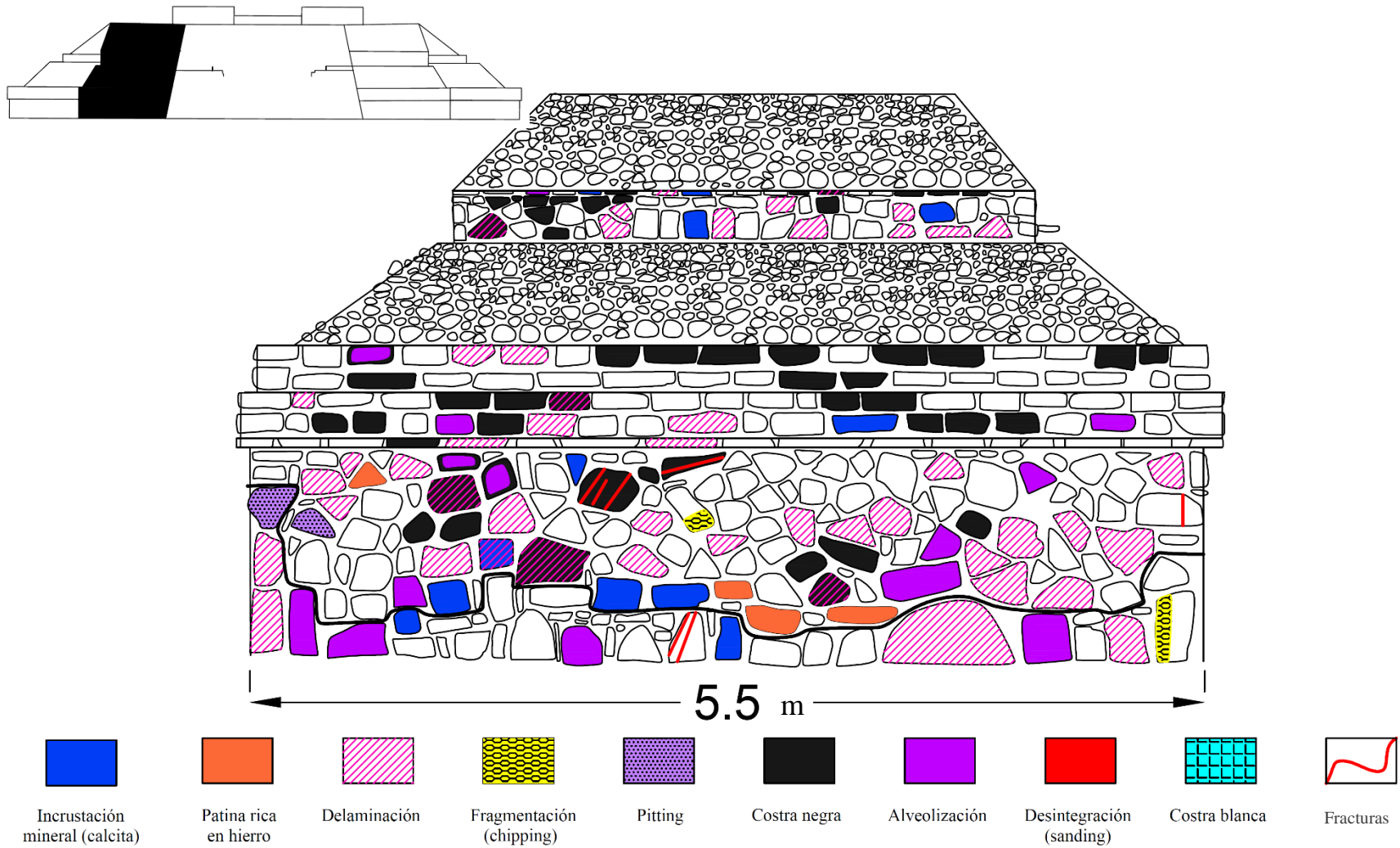
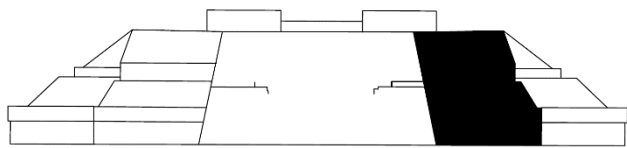


Figura 66. Registro de intensidad de daños de la pared 2, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).



**PARED 3 (FACHADA SUR)**

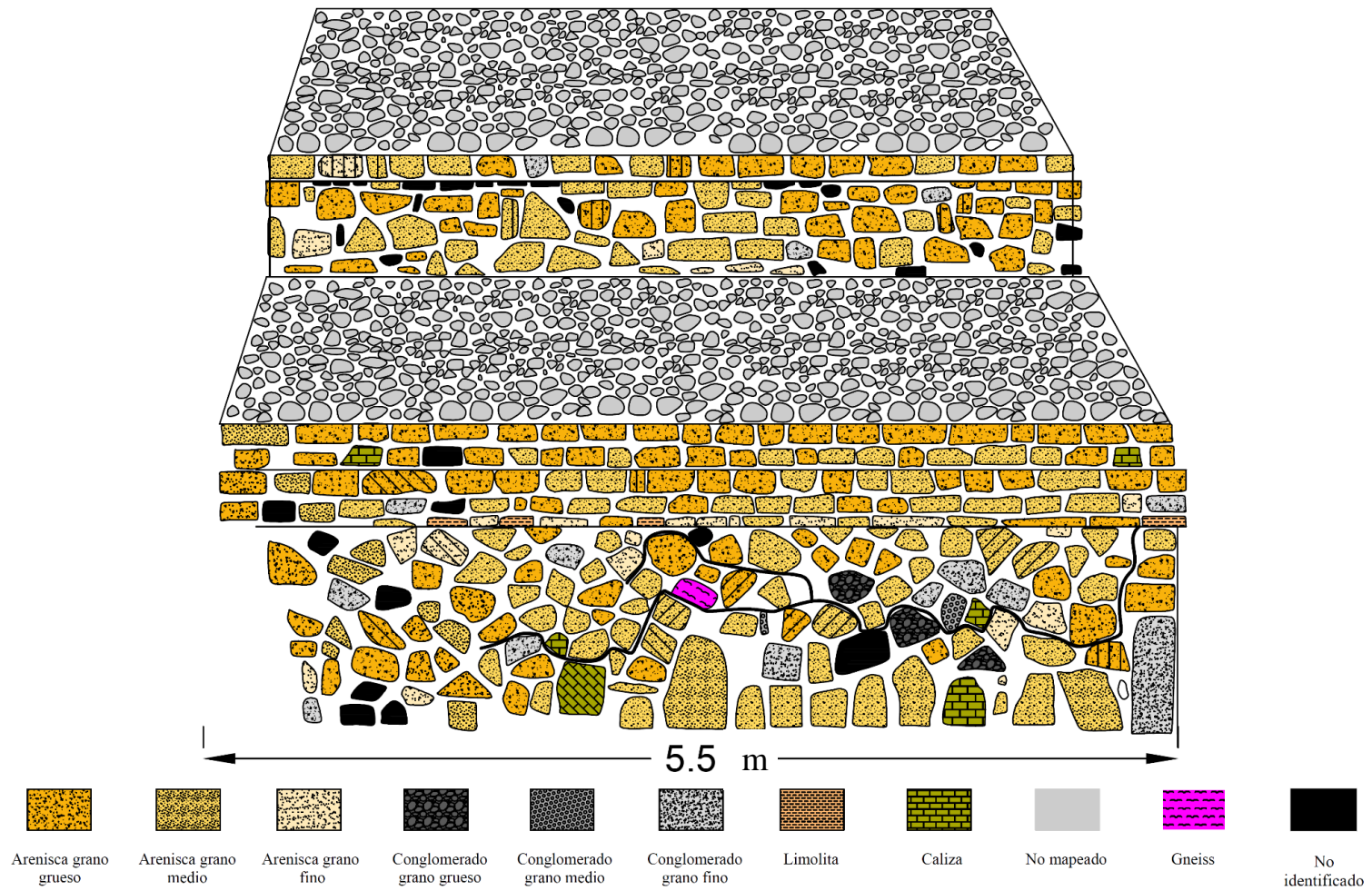


Figura 67. Registro litológico de la pared 3, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).

### PARED 3 (FACHADA SUR)

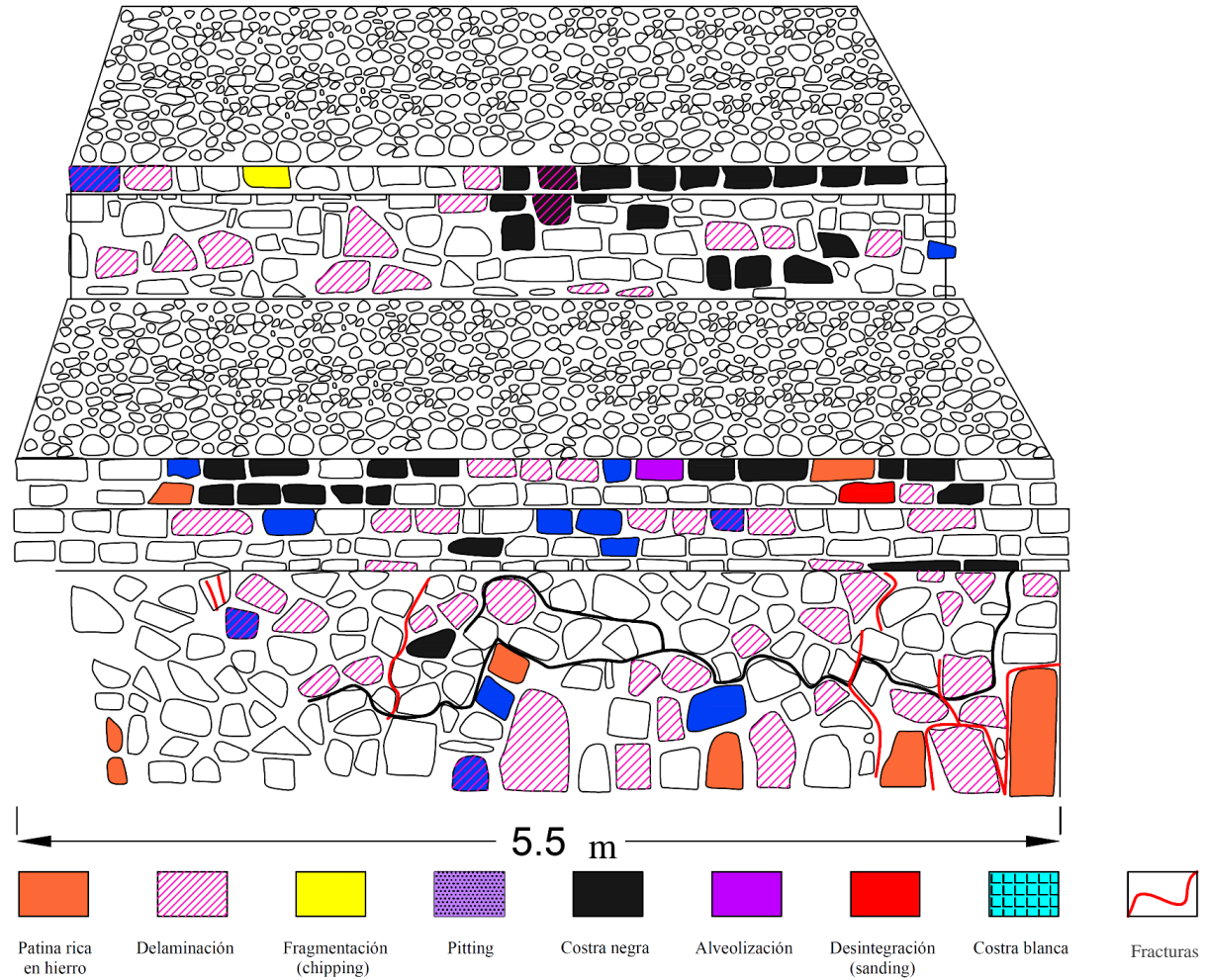
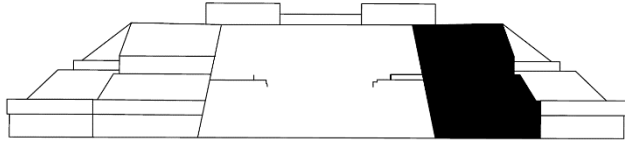


Figura 68. Registro de intensidad de daños de la pared 3, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).



**PARED 4 (FACHADA SUR)**

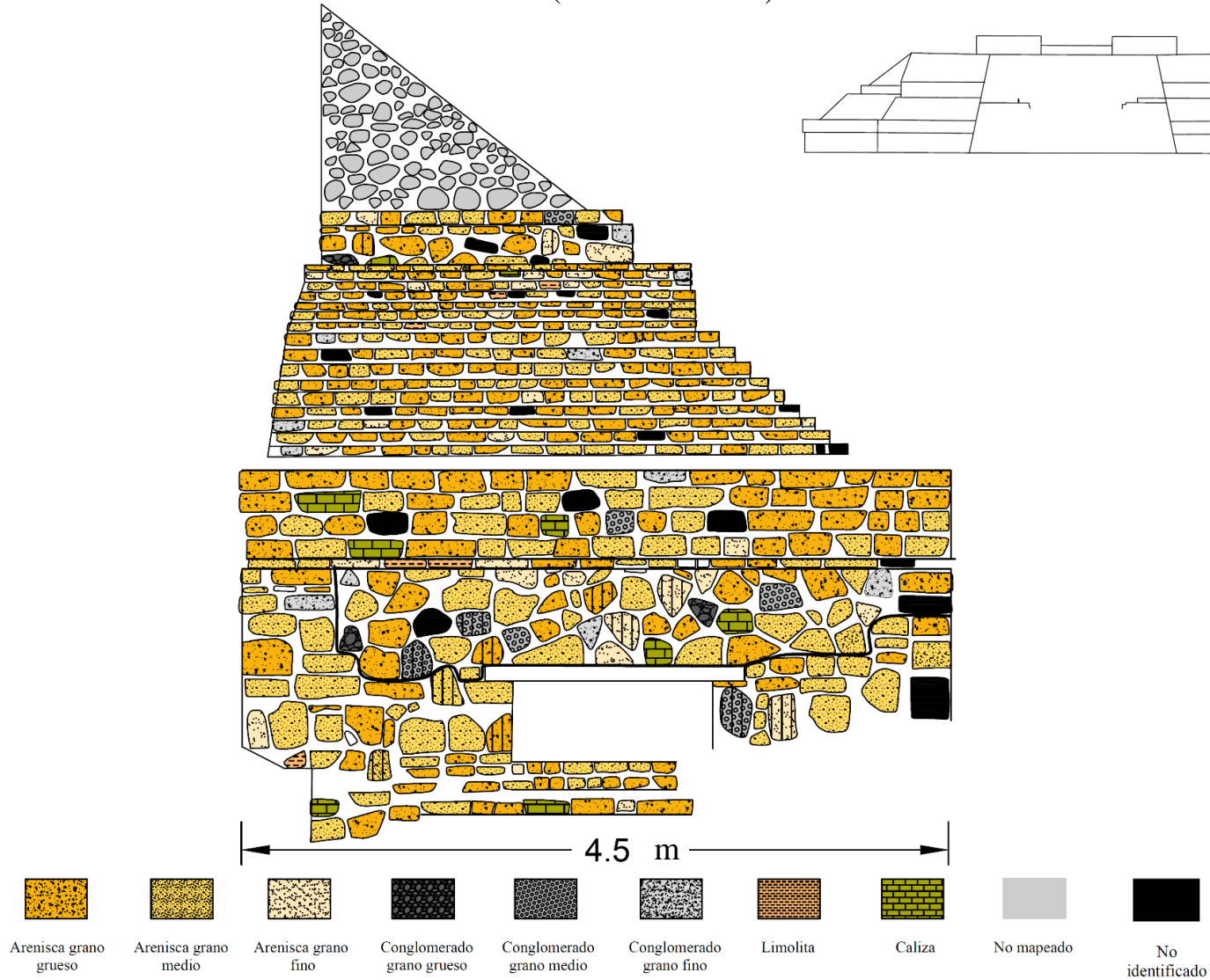


Figura 69. Registro litológico de la pared 4, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).

### PARED 4 (FACHADA SUR)

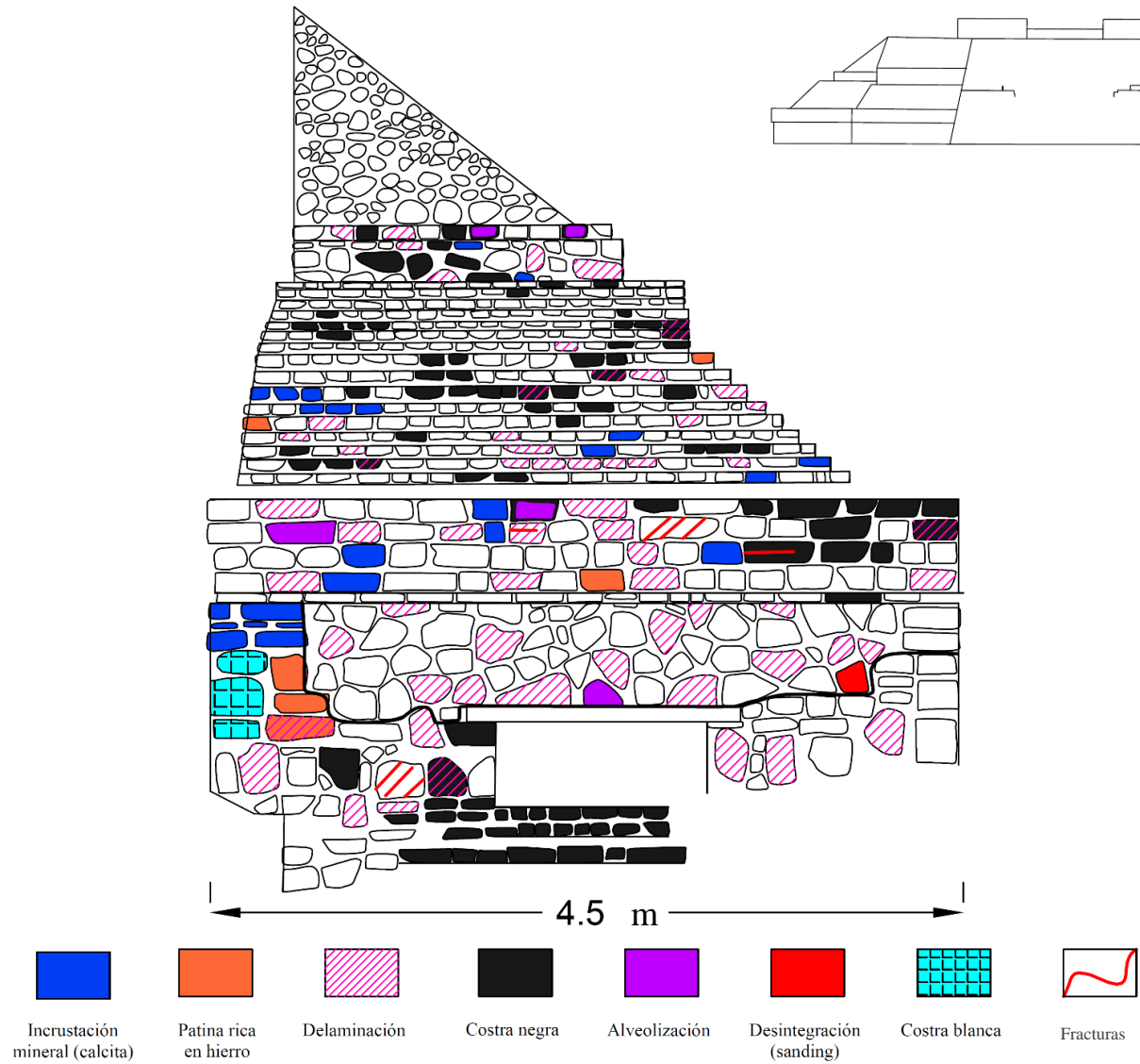


Figura 70. Registro de intensidad de daños de la pared 3, correspondiente a la Fachada Sur del Edificio D. La línea negra que atraviesa la estructura representa separación de la parte original del inmueble (zona inferior) y la parte que ya ha sido restaurada (zona superior).