



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO



**DIVISION DE INGENIERÍAS CAMPUS GUANAJUATO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN MINAS, METALURGIA
Y GEOLOGÍA**

*Correlación de Propiedades Mecánicas del
Caliche con Composición Petrográfica*

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO**

PRESENTA:

Alexis Karim Ahedo Díaz

Directores de Tesis:

Dra. María de Jesús Puy Alquiza

Dra. Ma. del Carmen Salazar Hernández



Guanajuato, Guanajuato. Febrero del 2020



Declaratoria



Por medio de la presente me responsabilizo de la autenticidad y originalidad del presente trabajo de Tesis Titulado **“Correlación de Propiedades Mecánicas del Caliche con Composición Petrográfica”** realizado por la C. Alexis Karim Ahedo Díaz, alumno de la Licenciatura en Ingeniería en Geología de la División de Ingenierías, Campus Guanajuato; Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología obtener el título de Ingeniero Geólogo.

La tesis se desarrolló dentro del proyecto CONACYT, CB-2016/284510, “Consolidantes híbridos (polisacáridos naturales-alcoxilanos) para la conservación de materiales constructivos silíceos y calcáreos de bienes patrimoniales” modalidad Grupos de Trabajo integrado por el Grupo de Investigación en Materiales y Termofluidos del Instituto Politécnico Nacional, Campus Silao, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Guanajuato (UPII-GTO) de Silao, por el Centro-INAH Guanajuato, proyecto arqueológico “Cerro de Los Remedios”, Comonfort, Guanajuato. Por la Universidad de Guanajuato el Cuerpo Académico de Química y Tecnología de Silicio, Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato (responsable del proyecto CONACYT) y finalmente el Cuerpo Académico de Materiales Catalíticos y Cerámicos, Departamento de Química misma Institución.

Se agradece también al LICAMM-MEB (Laboratorio de caracterización de materiales y minerales del Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología) por su ayuda en los análisis de MEB y espectroscopia de fluorescencia de rayos X, al Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional por su apoyo en los ensayos de nanoidentación y DRX así como al Laboratorio Nacional de Caracterización de Propiedades Físicoquímicas y Estructura Molecular (LACAPFEM UG-UAA-CONACYT) Campus Guanajuato por apoyo en los análisis de EDS.

Dra. Ma. de Jesús Puy Alquiza

Director de Tesis

Dra. Ma. del Carmen Salazar Hernández

Director de Tesis

C. Alexis Karim Ahedo Díaz

Tesista

“Correlación de Propiedades Mecánicas del Caliche con Composición Petrográfica”

Alexis Karim Ahedo Díaz

Directores de Tesis:

Dra. María de Jesús Puy Alquiza¹

Dra. Ma. del Carmen Salazar Hernández²

Sinodales:

Dr. Jorge Cervantes Jauregui³, Dr. Raúl Miranda Avilés¹, Ing. Juan José Reyes Martínez¹

¹Departamento en Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología. Universidad de Guanajuato. Ex Hacienda de San Matías S/N Colonia San Javier, C.P.36020, Guanajuato, Gto. México.

²Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Guanajuato. Instituto Politécnico Nacional. Av. Mineral de Valenciana No. 200 Col. Fracc. Industrial Puerto Interior, C.P. 36275 Silao de la Victoria, Guanajuato México.

³División de Ciencias Naturales y Exactas. Universidad de Guanajuato. Norialta S/N C.P. 36000, Guanajuato, Gto México.

Dedicatoria

A mis padres Miriam y Bernardo, quienes me apoyaron día a día con palabras de ánimo, cuidado y guianza, sin las cuales no hubiera sido posible haber culminado de forma tan satisfactoria esta hermosa etapa de mi vida, gracias por inculcarme en mí los valores de paciencia, perseverancia y valentía, no temer a los cambios porque siempre son para mejor.

A mi mamá, quien fue la que financio mi vida universitaria y fue la que hizo posible mi sueño de estudiar en una ciudad nueva, permitiéndome conocer a maravillosas personas y dar un paso muy importante en mi vida, gracias por todo tu trabajo que me dedicaste. A mi papá, quien siempre me ha dado consejo oportuno en los diferentes problemas que he enfrentado en la vida y guiado intentando para tomar las mejores decisiones, gracias por siempre ahí para motivarme y darme ese empujón que me hace falta.

A mi abuelita Alicia, quien siempre me ha dado su amor incondicional, cariño y preocupación, siempre guardándome un lugar muy especial al cual regresar y llamar hogar, gracias por ser mi segunda madre y por quien gracias sé que Dios siempre me acompaña.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a mis amigos y hermanos Diego, Luis y Rodrigo, por siempre acompañarme y apoyarme en este camino universitario, por hacer de mis días los mejores que haya tenido.

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien siempre estuvo presente; y a mi familia por todo su amor. Mi profundo agradecimiento a todas las autoridades y personas que hacen del Departamento de Ingenierías en Minas, Metalurgia y Geología una casa de estudios de la cual me siento muy orgulloso, por creer en mí, abrirme sus puertas y permitirme graduarme de esta carrera tan emocionante como lo es la Geología.

De igual manera mis agradecimientos a la Dra. María de Jesús Puy, la cual me introdujo a este proyecto y me apoyó a lo largo de él; al Doc. Raúl Miranda quien siempre me ofreció su conocimiento y laboratorios de forma incondicional. También quiero agradecer a Rene por ofrecerme su amistad y a Daniela por siempre ofrecerme su mano en todo momento.

Asimismo, expresar mis agradecimientos a todos aquellos maestros que me marcaron a lo largo de mi carrera universitaria, en especial al Ing. Juan José, a la Maestra Moni, al Doc. Juventino, a la Maestra Betty y a mi tutor el Ing. Vogel.

Al Dr. Omar Cruces Cervantes, responsable del proyecto arqueológico “Cerro de los Remedios” Centro INAH-Guanajuato por las facilidades prestadas para la realización de esta tesis.

También, quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento a la Dra. Ma. del Carmen Salazar, principal colaboradora durante todo este proceso quien, con su dirección, conocimiento, enseñanza y ayuda permitió el desarrollo de este trabajo, sin la cual probablemente seguiría en desarrollo.

Finalmente, al CONACYT, proyecto CB-2016/284510, “Consolidantes híbridos (polisacáridos naturales-alcoxisilanos) para la conservación de materiales constructivos silíceos y calcáreos de bienes patrimoniales” modalidad Grupos de Trabajo por la beca otorgada como asistente de proyecto.

INDICE

Declaratoria	I
Dedicatoria.....	III
Agradecimientos.....	IV
INDICE.....	V
INDICE DE FIGURAS.....	VIII
INDICE DE TABLAS.....	XII
RESUMEN	XIV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Culturas pre-hispánicas en el Estado de Guanajuato.....	1
1.2. Plazuelas, Pénjamo	3
1.3. Cañada de la Virgen, San Miguel de Allende	4
1.4. Peralta, Abasolo.....	5
1.5. El Cópore, Ocampo	6
1.6. Arroyo Seco, Victoria.....	7
1.7. Zona de Estudio: Cerro de los Remedios	8
1.8. Marco Geológico Regional.....	10
1.9. Estratigrafía	13
1.10. Yacimientos Minerales	16
1.11. Propuesta del Proyecto	17
1.12. Objetivos.....	17
Objetivo General.....	17
Objetivos Específicos	18
1.13. Justificación.....	18
1.14. Hipótesis	18
2. CONCEPTOS GENERALES DE LAS ROCAS CARBONATADAS	19
2.1. Rocas Carbonatadas. Génesis y Formación.....	19
2.2. Rocas Carbonatadas: Calizas.....	22
2.3. El Rol de Organismos en la Precipitación de Carbonato de Calcio	24

2.4. Procesos Físicos en la Depositación Carbonatada.....	26
2.5. Dolomita	27
2.6. Diagénesis.....	27
2.7. Regímenes de Diagénesis de Carbonatos	28
2.8. Clasificación de las Rocas Carbonatadas	29
2.9. Rocas Carbonatadas: Caliche	33
3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA.....	35
3.1. Análisis Petrográfico.....	35
3.1.1. Identificación mineral y propiedades ópticas	35
3.1.2. Preparación de láminas delgadas	38
3.2. DRX.....	39
3.3. Microscopía Electrónica de Barrido/ Espectroscopia de Dispersión de Rayos X (SEM/EDS).....	41
3.4. Espectroscopía de Fluorescencia de rayos X.....	43
4. PROPIEDADES MECÁNICAS	48
4.1. Ensayo de Fuerza Normal: Tracción y Compresión.....	50
4.2. Deformaciones en Compresión	53
4.3. Ensayo de Dureza	55
4.4. Nanoindentación: Microdureza	57
5. METODOLOGÍA.....	61
5.1. Toma de muestras en Sitio Arqueológico y afloramiento <i>in situ</i> :	62
5.2. Caracterización Física: Densidad	63
5.3. Caracterización Física: Absorción de Agua	63
5.4. Caracterización Mecánica: Ensayo de Compresión Uniaxial.....	63
5.5. Caracterización Mecánica: Nanoindentación	64
5.6. Caracterización Química-Mineralógica: Petrográfica.....	65
5.7. Caracterización Química-Mineralógica: DRX	66
5.8. Caracterización Química-Mineralógica: Espectroscopia de Infrarrojo	66
5.9. Caracterización Química-Mineralógica: Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X	67
5.10. Caracterización Química-Mineralógica: SEM-EDS	67
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	68
6.1. Muestreo de Caliche	68

6.2. Caracterización Química-Mineralógica para las Muestras provenientes del Sitio Arqueológico	74
6.3. Caracterización Química-Mineralógica para las Muestras provenientes del Banco de Material de la Comunidad de la Merced	89
6.4. Caracterización Física.....	100
6.5. Caracterización Mecánica: Resistencia a la Compresión	102
6.6. Caracterización Mecánica: NIIT	105
6.7. Modelo de Predicción de Resistencia Mecánica	108
7. CONCLUSIONES.....	111
8. BIBLIOGRAFIA	115
APÉNDICE 1	120
A1.1 Calcita.....	120
A1.2 Cuarzo.....	121
A1.3 Andesita	122
A1.4 Leonhandrita	127
APÉNDICE 2	133
MEB para muestras de caliche y banco con diferente magnificación	133
APÉNDICE 3	139
Curvas Esfuerzo-Deformación	139

INDICE DE FIGURAS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
Figura 1.1 Sitios Importantes de la Cultura Chupicuarenses en el estado de Guanajuato	2
Figura 1.2 Muestra de Cerámica Chupicuarenses (a) policrómica (b) monocrómica (c) figurilla	2
Figura 1.3. Plano arqueológico de Plazuelas.....	4
Figura 1.4. El Complejo A o Casa de los Trece Cielos de Cañada de la Virgen.	5
Figura 1.5. Localización de Peralta y sitios arqueológicos de la tradición del Bajío.....	6
Figura 1.6. Zona ceremonial del el Conjunto Cópore.	7
Figura 1.7. Ejemplo de pintura rupestre encontrada en el sitio arqueológico Arroyo Seco ..	8
Figura 1.8. Mapa de la cabecera municipal del municipio de Comonfort señalando los límites entre las provincias fisiográficas de la Mesa del Centro y del Eje Neovolcánico. Mesa del Centro señalada de color naranja y Eje Neovolcánico señalado de color morado (Mapa generado por herramienta de mapas digital de INEGI de mapa escala 1:1,000,000).....	11
Figura 1.9. Provincias geológicas de México.....	12
Figura 1.10. Mapa geológico de la región San Miguel de Allende-Querétaro.....	16
2. CONCEPTOS GENERALES DE LAS ROCAS CARBONATADAS	19
Figura 2.1 Disolución del dióxido de carbono en agua y disociación del ácido carbónico..	22
Figura 2.2 Disolución de calcita y/o argonita.....	23
Figura 2.3 Eliminación de CO ₂ por Agua.	26
Figura 2.4 Reacciones de formación para la dolomita.	27
Figura 2.5. Clasificación de rocas carbonatadas según Folk	31
Figura 2.6. Clasificación textural de sedimentos carbonatados basados en la abundancia relativa de su matriz limo-arcillosa y sparry calcite cement, y su abundancia de aloquemos.	32
Figura 2.7 Disolución de Dolomita y calcita.....	34
3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA.....	35
Figura 3.1. Partes del microscopio de luz polarizada.	36
Figura 3.2 Ejemplo de lámina delgada empleadas en el análisis petrográfico.....	39
Figura 3.3. Reflexión de un haz de rayos X por los planos (d_{hkl}) de un cristal	40
Figura 3.4. Partes del microscopio electrónico de barrido.	42
Figura 3.5 Diferencia entre micrografías de matriz de una matriz calcárea (a) microscopia óptica (b) SEM.	43

Figura 3.6. Diagrama parcial de energía para un sistema fotoluminiscente. Tomada de un seminario impartido por la Universidad de Granada.....	44
Figura 3.7. Esquema de un espectrómetro de fluorescencia de rayos X clásico o espectrómetro de rayos X de dispersión de longitudes de onda.	46
Figura 3.8. Fluorescencia de rayos X de minerales hidratados. donde señalan que las señales de Co se deben a la fuente de rayos X y no a que este elemento esté presente en las muestras.	46
4. PROPIEDADES MECÁNICAS	48
Figura 4.1 (a) Esfuerzo promedio (b) Deformación promedio unitaria.	48
Figura 4.2 Ensayos de Fuerza normal (a) Máquina Universal (b) Polaridad de Fuerza.....	50
Figura 4.3 (a) Curva Esfuerzo-Deformación (b) Determinación del límite elástico.	51
Figura 4.4 Curva esfuerzo-deformación para materiales frágiles.....	53
Figura 4.5 Tipos de fractura en compresión (a) material frágil (b) material dúctil.....	55
Figura 4.6. Ensayo de dureza (a) Durómetro Universal (b) Huella Vickers.	56
Figura 4.7. NIIT (a) Principio de Carga, formación de la huella (b) Curva Carga-Desplazamiento (c) Hulla de NIIT.	58
Figura 4.8 NIIT (a) proceso de indentación (b) Curva P-h.	59
5. METODOLOGÍA	61
Figura 5.1. Metodología general empleada en el desarrollo del proyecto.....	61
Figura 5.2. Prueba de Carbonato con Ácido Clorhídrico.	62
Figura 5.3 Máquina Universal Shimadzu AGD-X.	64
Figura 5.4. Instrumento CSM de ensayos de Nanoindentación.	64
Figura 5.5. Maquina cortadora y pulidora GMW de láminas delgadas.....	65
Figura 5.6. Equipo de Difracción de Rayos X del Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional.....	66
Figura 5.7. Equipo de Microscopía Electrónica de Barrido del LABNAL de la División de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad de Guanajuato.	67
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
Figura 6.1 Ubicación del sitio arqueológico Cerro de los Remedios, Comonfort.....	68
Figura 6.2. Mapa del sitio arqueológico Cerro de los Remedios, Comonfort. Se señala la ubicación de las dos áreas muestreadas donde fue utilizado el caliche como material de construcción.....	69
Figura 6.3. Ubicación de tomas de muestra de caliche en el sitio arqueológico Cerro de los Remedios, Comonfort.....	70

Figura 6.4. Muestreo realizado en el banco de material inactivo de la comunidad la Merced, Comonfort.....	75
Figura 6.5. Mapa geológico de Comonfort. Se señala en círculos rojos las zonas de estudio muestreadas. Información tomada del SGM, cartas geológicas 1:50,000.....	71
Figura 6.6. (a) Acceso al banco de material inactivo en la comunidad la Merced.) (b) Afloramiento de caliche donde fue tomada la muestra MB 1.	72
Figura 6.7. Prueba de Carbonatos para muestras de caliche provenientes del sitio arqueológico de Comonfort, Gto y del Banco de Material de la Comunidad de la Merced.	74
Figura 6.8 Espectros de Infrarrojo obtenido por ATR-IR para las muestras de caliche del sitio arqueológico provenientes del patio hundido en excavación.	75
Figura 6.9 Espectros de Infrarrojo obtenido por ATR-IR para las muestras de caliche empleado para restaurar “Lajas	77
Figura 6.10. Difractogramas para muestras del sitio arqueológico patio hundido en excavación.	79
Figura 6.11. FXR para muestras de caliche proveniente del sitio arqueológico de Comonfort, Gto.	80
Figura 6.12. MEB para las muestras de caliche proveniente del sitio arqueológico.....	83
Figura 6.13. EDS análisis para las muestras de caliche proveniente del sitio arqueológico.	84
Figura 6.14. (a) Matriz dendrítica formada por procesos sedimentación ocasionados por decantación (b) Matriz de Micrita (c) CZA-2 observada a 1000x (d) CZA-3 observada a 5000X.	86
Figura 6.15. Espectros de Infrarrojo obtenido por ATR-IR para las muestras de la Comunidad de la Merced.	91
Figura 6.16. Análisis por DRX para las muestras de Banco de la Comunidad de la Merced ricas en carbonatos.....	92
Figura 6.17. Cuantificación de elementos presentes en las muestras de Banco de la Comunidad de la Merced por XFR.	93
Figura 6.18. Resultados de MEB para las muestras de Banco provenientes de la comunidad de la Merced en Comonfort.	95
Figura 6.19. Morfología de acuerdo a los planos cristalizados de la Leohandrita o Laumonita.	96
Figura 6.20. Patina carbonatada bandeada presente en las muestras con altos contenidos de carbonatos.	98
Figura 6.21. Distribución del tipo de roca presente en la Comunidad de la Merced, Comonfort, Gto.	99
Figura 6.22. Densidad medida para las muestras (a) caliche proveniente del sitio arqueológico (b) Muestras de banco de la comunidad de la Merced.	101

Figura 6.23. Porosidad accesible al agua medida para las muestras (a) caliche proveniente del sitio arqueológico (b) Muestras de banco de la comunidad de la Merced.....	101
Figura 6.24. Resistencia a la compresión (a) caliche de zona arqueológica (b) muestras de banco de la comunidad de la Merced.	103
Figura 6.25. Distribución de muestras de acuerdo con propiedades físicas y mecánicas. .	104
Figura 6.26. Curvas P-h para las muestras de caliche proveniente del sitio arqueológico.	107
Figura 6.27. Resultados de predicción de la resistencia mecánica de acuerdo con la composición de los caliches	110
Figura 6.28 Comportamiento teórico de la resistencia mecánica de caliches con respecto al contenido de CaCO ₃	111
Figura 6.29. Comportamiento de HV y E de acuerdo con la resistencia del material.....	112

INDICE DE TABLAS

2. CONCEPTOS GENERALES DE LAS ROCAS CARBONATADAS.....	19
Tabla 2.1. Principales procesos de meteorización química.....	21
Tabla 2.2. Principales factores que afectan la precipitación inorgánica del CaCO ₃ en el agua marina y agua dulce.....	24
Tabla 2.3. Clasificación de rocas carbonatadas.....	30
3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA.....	35
Tabla 3.1. Propiedades empleadas para la identificación de minerales empleando luz transmitida.....	37
4. PROPIEDADES MECÁNICAS.....	48
Tabla 4.1. Tipos de ensayos y normas ASTM correspondientes.....	49
Tabla 4.2. Tipos de deformación en compresión.....	54
Tabla 4.3 Tipo de Durezas Vickers.....	56
5. METODOLOGÍA.....	61
Tabla 5.1. Nomenclatura empleada para identificación de muestras.....	62
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	68
Tabla 6.1. Muestreos realizados en zonas de estudio: Sitio arqueológico Cerro de los Remedios y Banco de Material en Comunidad la Merced, Comonfort, Gto.....	73
Tabla 6.2. Contenido de materia silícica en las muestras de caliche provenientes del patio hundido en excavación.....	76
Tabla 6.3. Contenido de materia silícica en las muestras de caliche empleado para restaurar “Lajas”.....	77
Tabla 6.4. Análisis cuantitativo por FXR de los principales elementos presentes en las muestras de caliche provenientes del sitio arqueológico.....	81
Tabla 6.5 Análisis cuantitativo por EDS de los principales elementos presentes en las muestras de caliche provenientes del sitio arqueológico.....	85
Tabla 6.6. Análisis por petrografía en nícoles paralelos para las muestras de caliche provenientes del sitio arqueológico.....	87
Tabla 6.7. Propuesta de análisis mineralógico para las muestras de caliche del sitio arqueológico.....	89
Tabla 6.8 Resultados de prueba de Carbonatos para las muestras provenientes de la Comunidad de la Merced.....	90
Tabla 6.9. Contenido de materia silícica en las muestras de la Comunidad de la Merced...	91

Tabla 6.10. Análisis cuantitativo de los principales elementos presentes en las muestras provenientes del Banco de la Merced.....	94
Tabla 6.11. Análisis Petrográfico para las muestras proveniente del Banco de la comunidad de la Merced, Comonfort.....	97
Tabla 6.12. Tabla 6.12. Balance mineralógico para las muestras provenientes del banco de la comunidad de la Merced.....	100
Tabla 6.13. Muestras seleccionadas para la realización de NIIT.....	105
Tabla 6.14. Carga y desplazamientos registrados por NIIT para los caliches de la zona arqueológica.....	106
Tabla 6.15. Propiedades mecánicas calculadas por NIIT para las muestras de caliche provenientes del sitio arqueológico.....	108
Tabla 6.16. Propiedades mecánicas promedio para las principales fases mineralógicas presentes en las muestras de caliche.....	109

RESUMEN

El propósito del presente trabajo fue proponer un modelo que permita predecir las propiedades mecánicas del caliche, material de construcción utilizado en el sitio arqueológico Cerro de los Remedios ubicado en Comonfort, Guanajuato. Las propiedades mecánicas del caliche pueden variar dependiendo del porcentaje de las distintas fases mineralógicas que lo conforman.

Como primera etapa del trabajo se realizó la toma de muestras provenientes del sitio arqueológico; las cuales se tomaron de dos zonas diferentes (CZA y CZA-L). También, se estudió un material (MB) de la zona cercana (Comunidad de la Merced en Comonfort) con el objetivo de comparar sus propiedades e hipotéticamente establecer que pudiera haber sido de ese sitio donde se proveyó el material constructivo del sitio así mismo, proponer un posible banco de material que pudiese ser empleado para restauración.

Se caracterizó química y mineralógicamente las muestras CZA y MB; se hizo uso de ácido clorhídrico para conocer su porcentaje de carbonato de calcio, después, se obtuvo sus espectros de infrarrojo. Fue utilizada la difracción de rayos X (DRX) para conocer sus fases mineralógicas y la microscopia electrónica de barrido (MEB) para conocer su morfología, así como EDS para conocer su disposición composicional.

Para complementar el estudio mineralógico, fue utilizada la técnica de petrografía de lámina delgada, confirmando lo obtenido en la DRX y observándose también, minerales tales como fenocristales de cuarzo y otros en pequeñas concentraciones. Posteriormente, se realizó un análisis de espectroscopía de fluorescencia de rayos X (FXR), con la finalidad de realizar una semi-cuantificación de las fases mineralógicas observadas.

Se evaluaron las propiedades físicas del caliche, estudiando su densidad promedio y su porosidad accesible al agua, estas fueron comparadas con aquellas provenientes del Mediterráneo (softpand). Después, fueron ensayadas las muestras para conocer su resistencia a la compresión uniáxica, mostrando tres grupos distintos de resistencias.

A continuación, se realizó un análisis por nanoindentación (NIIT) que permitiera identificar la resistencia mecánica experimental para cada fase mineralógica; donde se

observaron tres grupos de resistencia correspondientes a las principales fases mineralógicas observadas.

Finalmente, fueron propuestos dos métodos para predecir la resistencia mecánica de los caliches:

- ✓ Método 1; considera que la resistencia de los materiales se debe a la contribución de la resistencia de cada fase multiplicada por su fracción masa.
- ✓ Método 2; considera que la resistencia total del material se debe a la fracción masa y resistencia mecánica de las dos principales fases mineralógicas observadas en la roca.

De acuerdo con los resultados experimentales; ambos métodos tienen un excelente ajuste a la resistencia observada para los CZA-de resistencia moderada. Sin embargo, entre ellos, el Método 1 tiene menor exactitud de ambos.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Culturas pre-hispánicas en el Estado de Guanajuato

Guanajuato forma parte de la región geográfica de “El Bajío”, que es una región histórica, económica y cultural del centro de México. En su periodo prehispánico fue densamente poblada por grupos sedentarios y nómadas relacionadas con otras regiones mesoamericanas. A lo largo de la región, es posible observar más de mil sitios arqueológicos distintos que varían en escalas, siendo algunas pequeñas comunidades hasta extensas y complejas ciudades que dominaron grandes territorios. El Bajío fue la frontera entre Mesoamérica y Aridoamérica, separando sociedades con distintas culturas, convirtiéndose en un sitio de congregación, intercambio y migración entre el Norte, Occidente y Centro de México.

Entre los años 500 a.C y 200 d.C floreció la cultura prehispánica de Chupícuaro que significa lugar donde abundan las plantas gramíneas, medicinales y de tallo rastreros, esta cultura se asentó en los márgenes del río Lerma, en el sureste de Guanajuato ^[1]. La Figura 1 muestra los sitios importantes para los establecimientos de la cultura Chupicuareense. Esta cultura abarcó básicamente la Mesoamérica Septentrional y se extendió hacia el norte comprendiendo sitios tales como: Villa de Reyes en San Luis Potosí; en Guanajuato: El Coporo, El Cubo, Carabino Cañada de la Virgen, San Miguel el Viejo, Morales, La Gloria, Los Locos, Peralta, Los Garos, El Cobre, Plazuelas, La Virgen, Chupícuaro, San Bartolo y Tierra Blanca. En Querétaro: Puertecito, La Magdalena, Cerrito o el Pueblito, La Negreta, Tepozán, San Juan del Río y Cerrito de la Cruz. Esta zona incluye una arquitectura de plataformas, patios y montículos que fue la base de posteriores desarrollos ^[1].

Después de la cultura Chupícuaro, se desarrolló otra cultura en Guanajuato y Querétaro que se le conoció como “la tradición de El Bajío”; esta fue desarrollada después de los 300 d. C y se le ubica entre los 300 y 650 d.C ^[4]. En la región occidental de Guanajuato se han encontrado edificaciones que son vestigios de estas culturas; se han encontrado patios hundidos, estructuras circulares y concéntricas de la cultura de Teuchitlán, Jalisco.

Desde 2001, el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) ha estado trabajando con el Estado de Guanajuato con el Instituto Estatal de la Cultura (IEC) con el objetivo de desarrollar proyectos arqueológicos, estudiarlos y preservarlos, para posteriormente ser restaurados, ya que en el estado se han localizado numerosos sitios arqueológicos, de los cuales cuatro son de principal importancia: Plazuelas, Peralta, Cañada de la Virgen, El Cóporo y Arroyo Seco ^[3].

De los avances encontrados, resalta la apertura al público de la zona arqueológica de Plazuelas en Pénjamo y su museo de sitio en marzo de 2006, así como la zona arqueológica de Peralta en el municipio de Abasolo en diciembre de 2008. Añadiendo, las zonas arqueológicas de Cañada de la Virgen en San Miguel de Allende y El Cóporo en Ocampo (IEC, 2001); así como Arroyo Seco en Victoria que fue recientemente abierto al público en marzo de 2018.

A continuación, se dará una descripción más amplia de cada uno de estos sitios arqueológicos.

1.2. Plazuelas, Pénjamo

Plazuelas es una de las ruinas de las ciudades más complejas de la región, se encuentra al suroeste del Estado en las estribaciones al sur de la Sierra de Pénjamo. Fue edificada entre 600 y 900 d.C. en un espacio abierto y moldeada entre los cerros, construida de forma armoniosa con el orden de su entorno; durante este periodo, Guanajuato logró su mayor densidad de población ^[1].

La ciudad, como puede observarse en la Figura 1.3, fue construida de manera dispersa por lo que se encuentran largas calzadas y veredas que suben y bajan entre los cerros, que se juntan en el manantial Agua Nacida. Sus límites son: al norte con la Sierra de Pénjamo, al sur con los bajíos michoacanos, al este y oeste con laderas que son parte de las estribaciones

sureñas. El sitio arqueológico se compone de una ladera oeste, ladera este, ladera central, una cancha del juego de la pelota, petrograbados y casas tapadas.

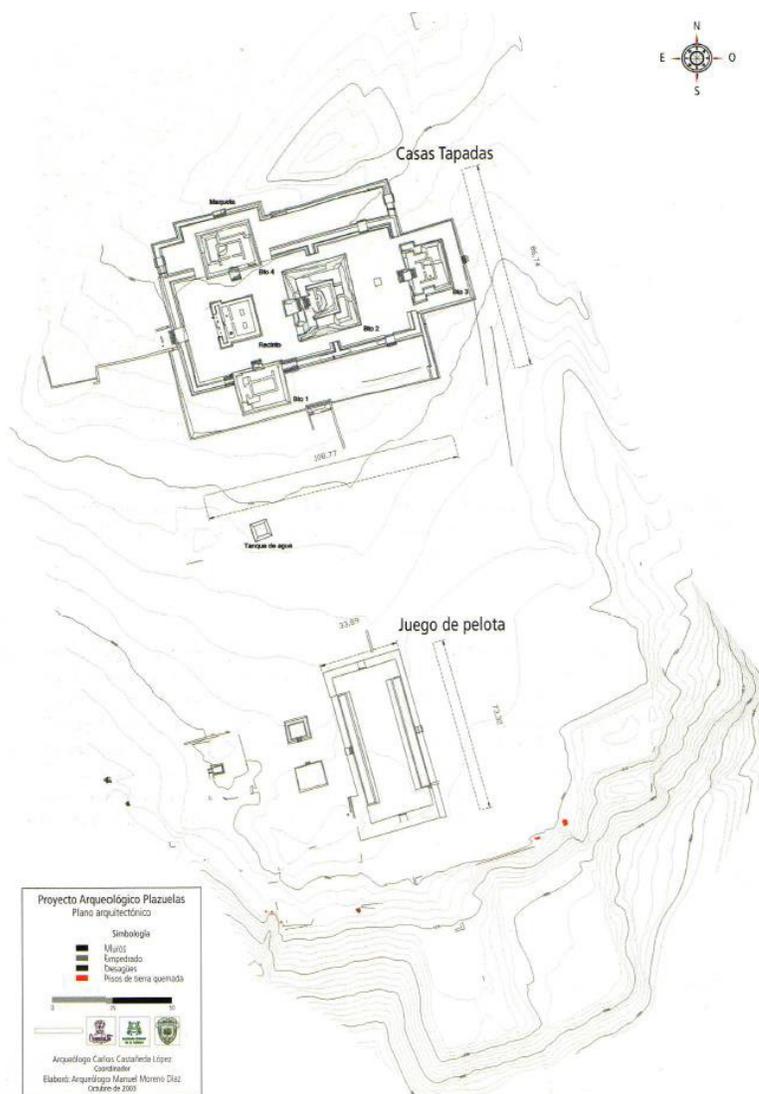


Figura 1.3. Plano arqueológico de Plazuelas ^[3].

1.3. Cañada de la Virgen, San Miguel de Allende

Este sitio arqueológico es un asentamiento prehispánico que se encuentra ubicado a 30 km de la ciudad de San Miguel de Allende. Cañada de la Virgen fue construido en la frontera norte de Mesoamérica, en una loma de pendiente moderada asociada a profundas cañadas. Sus principales monumentos fueron utilizados para realizar observaciones del cielo, ligando su traza urbana con los ciclos cósmicos, donde, su eje de simetría se encuentra dirigido a las

salidas y puestas del sol y la luna. Debido a su ubicación geográfica, dominada una posición defensiva capaz de visualizar la cuenca central del río Laja, resaltando la importancia ritual del enclave ^[4].

El asentamiento (Figura 1.4) está conformado por cinco complejos arquitectónicos: el Complejo A o Casa de los Trece Cielos que es un espacio fundamental para la observación celeste, ya excavado y consolidado; el Complejo B o Casa de la Noche más Larga, que es un grupo arquitectónico que presenta un basamento piramidal, patio hundido y plataformas, con distintas funciones; el Complejo C, una estructura circular asociada a la veneración del viento; y el Complejo D, un patio hundido con funciones habitacionales, y la Calzada, que une las cañadas con el Complejo A y mide 840 m de largo por 18 m de ancho ^[4].



Figura 1.4. El Complejo A o Casa de los Trece Cielos de Cañada de la Virgen ^[5].

1.4. Peralta, Abasolo

Este sitio arqueológico es un exponente de la cultura regional “la tradición de El Bajío”. Se ubica en las laderas y planicies al oriente del municipio de Abasolo, en la región suroeste del Estado. Este se encuentra en la porción central de la planicie aluvial del río Lerma (véase Figura 1.5) a un kilómetro de su cauce; el ambiente lacustre y palustre ricos en agua permitió generar riqueza material y cultural en las sociedades mesoamericanas que se vieron beneficiados con bienes estratégicos tales como tierras fértiles y yacimientos de materias primas como la obsidiana y la riolita en las sierras de Abasolo y Pénjamo, creando un ambiente adecuado para el desarrollo de las sociedades antiguas. Estas condiciones permitieron un sistema de producción e intercambio regional, estableciendo relaciones sociales y culturales entre diferentes asentamientos, abarcando aun a distancias mayores al municipio de Abasolo.

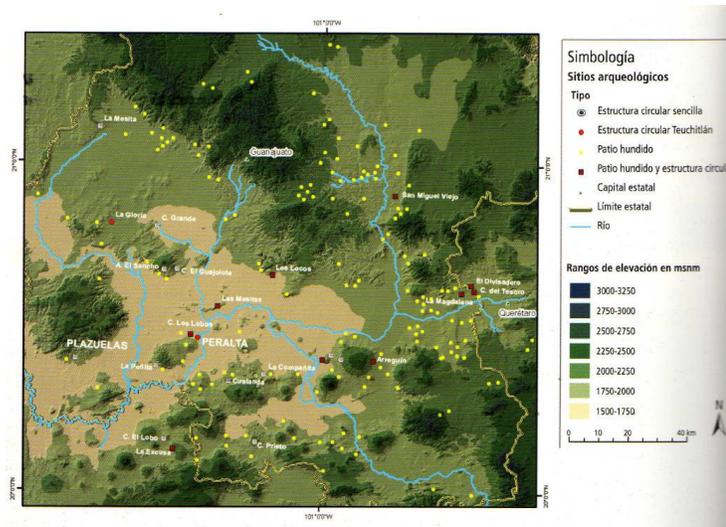


Figura 1.5. Localización de Peralta y sitios arqueológicos de la tradición del Bajío [4]

El principio constructivo utilizado en los casi doscientos asentamientos prehispánicos en el Estado de Guanajuato se forma básicamente de montículo y patio hundido con ocho variantes, seis de las cuales se encuentran en Peralta, y forman parte de la tradición El Bajío, que fue denominada así a partir de esta red social de comunidades organizadas políticamente en centros independientes con territorios propios, que presentan similitud arquitectónica y cultural [3].

1.5. El Cóporo, Ocampo

Este sitio arqueológico del Epiclásico se encuentra ubicado a 19 km al sur de la ciudad de Ocampo, sobre las estribaciones al poniente de la sierra de Santa Bárbara, e igualmente sobre la antigua frontera norte de Mesoamérica. El Cóporo es el vestigio de una antigua ciudad que se compone de distintos espacios arquitectónicos (Figura 1.6) que junto con los objetos cerámicos y herramientas de piedra establece una correlación con la región de Tunal Grande en San Luis Potosí y fuertes vínculos con los asentamientos prehispánicos de Zacatecas, Jalisco y el Bajío guanajuatense [5].



Figura 1.6. Zona ceremonial del el Conjunto Cóporo ^[5].

El asentamiento está conformado por seis complejos arquitectónicos distribuidos en la cima y en las laderas del Cerro del Cóporo: Conjunto Llano, localizado en la parte baja, se caracteriza por la presencia de distintas áreas públicas y domésticas así como talleres; Conjunto Gotas, ubicado sobre la ladera, es un espacio cívico-administrativo; Conjunto Montes, que es una zona residencial; Conjunto Puerto del Aire, presenta un camino empedrado que da acceso a los sitios sagrados del asentamiento; Conjunto Cóporo, localizado en la cima del cerro es la zona ceremonial; y Conjunto Caracol, que a pesar de ser también un área residencial, presenta elementos defensivos tales como alabardas.

1.6. Arroyo Seco, Victoria

El sitio arqueológico Arroyo Seco contiene conjuntos pictóricos que se distinguen como una de las concentraciones de arte rupestre más importantes a nivel nacional. El sitio se ubica a 2.5 km al sur de localidad Victoria, donde se encuentra una planicie y dos pequeñas elevaciones naturales. El sitio cuenta con 46 espacios con grafías (véase Figura 1.7) donde algunas son representaciones humanas en actividades tales como la caza o danza en grupos, y también presenta motivos zoomorfos tales como zorros, coyotes, perros y venados; águilas, lagartijas y ranas, e insectos como arañas o alacranes, así como vegetales, como la planta de maíz o peyote ^[6].



Figura 1.7. Ejemplo de pintura rupestre encontrada en el sitio arqueológico Arroyo Seco ^[7].

Se distinguen cinco etapas de poblamiento que corresponden a diferentes periodos donde fueron plasmadas las pinturas. Los colores más empleados fue el rojo y naranja, seguidos del amarillo y el negro; también se presenta motivos pintados en blanco. La mayoría de los motivos son monocromos, sin embargo, también existen elaborados de dos y hasta tres colores.

1.7. Zona de Estudio: Cerro de los Remedios

El asentamiento prehispánico Cerro de los Remedios se ubica en los márgenes del río Laja, donde a largo de éste y de sus afluentes, se cuentan emplazados una serie de asentamientos. El sitio se encuentra localizado en un punto estratégico, donde debido a su interacción con otros grupos y unidades político-culturales, debió haber tenido un papel importante social, económico e ideológico en la cultura de la “tradicón del Laja” ^[8].

El sitio arqueológico pertenece a la región política cuya cabecera fue San Miguel Viejo, segunda en densidad de asentamientos, que abarcó las vertientes del río Laja y sus afluentes tales como Dolores, San Juan y San Marcos, colindando con la región de San Bartolo en la porción sur de Aguascalientes.

Los asentamientos del río Laja se subdividen por su posición geográfica, aquellos localizados en la Mesa del Centro y su desemboque hacia El Bajío y aquellos localizados a lo largo del río Apaseo, que es afluente del río Laja. Es considerada como especial el área donde se encuentra asentado el Cerro de los Remedios debido a sus circunstancias geográficas particulares, que podría señalar una vía hacia Querétaro, San Juan del Río y el Valle de México.

El sitio arqueológico Cerro de los Remedios fue ubicado por Cruces sobre las estribaciones meridionales del cerro del mismo nombre, el cual forma parte de un macizo montañoso doble denominado Dos Cerros. Este fue un sitio cívico ceremonial compuesto de varios complejos arquitectónicos construidos en la ladera sur, entre las cotas 1,855 y 1,870 msnm y fue definido en las coordenadas UTM 2,292,785.4 mN y 317,355.8 mE.

Este es descrito por Cruces como: “un patrón de asentamiento nucleado con un área principal de monumentos; se configura la presencia de cuatro conjuntos arquitectónicos delineando un espacio cuadrangular en torno a una plaza central de amplias dimensiones, los conjuntos arquitectónicos se ubicarían hacia los vértices de un cuadrángulo. El Conjunto A se emplaza al suroeste, el Conjunto B hacia el noroeste, el Conjunto C al noreste y el Conjunto D se extiende demasiado hacia el sureste. Los conjuntos mayores se componen de plataformas rectangulares, presencia de dos basamentos piramidales, patios hundidos, patios cerrados, así como plataformas escalonadas ^[8].

En el sitio se clasificaron los materiales de construcción pétreos como: Basalto, riolita, caliche y tepetate, donde se les describió como rocas rostreadas, bolondas o irregulares, lajas, lajas biseladas, lajados de caliche y bloques cortados, entre otros. Donde se encontró mayor uso de caliche, ubicado a nivel superficial, en rellenos, cimientos de piedra miscelánea y muro lajeado de caliche.

En las primeras excavaciones realizadas por Cruces, se encontraron un total de 17,723 tepalcates de ollas, cajetes, comales, platos, incensarios, sahumadores, etc. Estos se caracterizaron por ser sencillos, con poco trabajo de pasta y acabado; presentaban algunos fragmentos colores rojos, naranjas, café, bayo, y otros de mayor pulido de color guinda y café oscuro que se consideró como cerámica fina. También fueron encontradas piezas como el

brasero y cerámica con pegotes o picos que se les atribuyó a una ídole ceremonial; así como 6 fragmentos de figurillas antropomorfas (4 cabezas, 1 tocado y 1 cuerpo) que presentan variedades de manufactura y rasgos físicos, y la cabeza de una figurilla que representa a un ave. Añadiendo, se encontraron puntas, raspadores, punzones, raederas, hachas, morteros, pulidores y fragmentos de metate de sílex, basalto y obsidiana.

El sitio arqueológico Cerro de los Remedios es un punto estratégico por su posición geográfica e importancia cultural que al relacionarse con el afluente del río Laja que tiene su dirección al Bajío, Cruces consideró que el cañón San Miguel pudo haber dio el control de paso entre ambas regiones fisiográficas.

1.8. Marco Geológico Regional

El municipio de Comonfort se encuentra localizado en los límites de las provincias fisiográficas de la Mesa del Centro que abarca el 51.8% y del Eje Neovolcánico que abarca el 48.2% del municipio ^[9]; así mismo, dentro de las subprovincias Sierras y Bajíos Michoacanos y Bajío Guanajuatense (Figura 1.8). La cabecera municipal se encuentra dentro del límite oeste del Eje Neovolcánico. La porción de la Mesa del Centro dentro del municipio se caracteriza por planicies de altitudes mayores a los 1,900 m.s.n.m. y en menores proporciones, lomeríos y elevaciones aisladas, tales como el Cerro de San Pedro con una altitud de 2,580 m.s.n.m. y Cerro Grande con altitud de 2,220 m.s.n.m. Por otro lado, la provincia del Eje Neovolcánico, que es aquella sobre la cual yace el sitio arqueológico, se caracteriza de extensas mesetas formadas de rocas volcánicas rodeadas por elevaciones significativas de predominancia volcánica, tales como los cerros El Gigante y La Giganta con altitudes mayores a 2,900 m.s.n.m, donde se encuentran barrancas de profundidad media. El INEGI clasificó su sistema de toposformas de la siguiente manera: Meseta disectada con cañadas (48.2%), Escudo volcanes (22.4%), Llanura aluvial (15.8%) y Lomerío de basalto con llanuras (13.6%) ^[9].

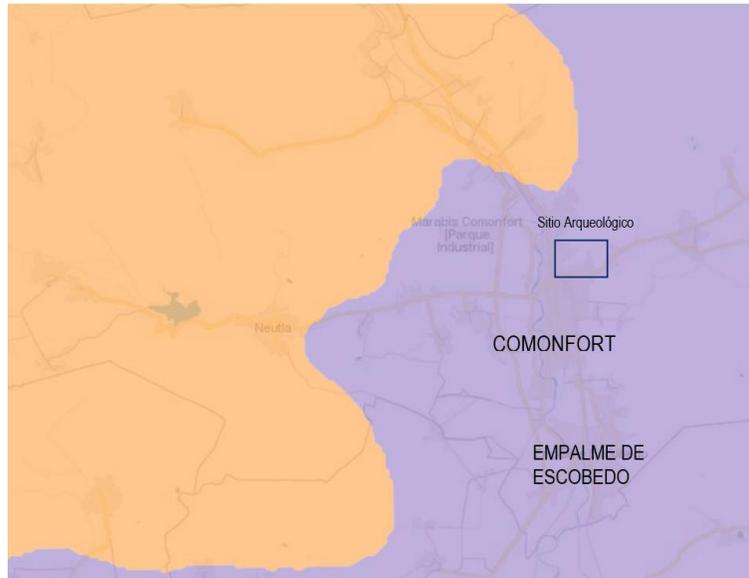


Figura 1.8. Mapa de la cabecera municipal del municipio de Comonfort señalando los límites entre las provincias fisiográficas de la Mesa del Centro y del Eje Neovolcánico. Mesa del Centro señalada de color naranja y Eje Neovolcánico señalado de color morado (Mapa generado por herramienta de mapas digital de INEGI de mapa escala 1:1,000,000) [9].

Dentro de su marco hidrológico, el municipio se ubica en la región hidrológica Lerma-Santiago, en la cuenca del R. Laja, donde la subcuenca R. Laja-Celaya predomina casi en su totalidad, observándose muy pequeñas porciones de las subcuencas R. Apaseo y P. Ignacio Allende. Su drenaje principal son arroyos intermitentes tributarios tales como el Arroyo Peña Prieta y perenes del Río Laja, los cuales finalmente conducen sus aguas al Lago Chapala.

Comonfort se encuentra dentro de la provincia geológica Complejo Orogénico Zacatecano en su límite con la provincia Faja Volcánica Transmexicana (véase Figura 1.9). El Complejo Orogénico Zacatecano se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas terciarias y sedimentos cretácicas subyacidas por rocas vulcano-sedimentarias del Jurásico y Triásico, y sedimentarias del Pérmico, presentando también pliegues amplios y fallamiento; a esto se le relaciona con incrementos en las velocidades de expansión del fondo oceánico de la placa Farallón que subducía a la placa Norteamericana. La Faja Volcánica Transmexicana se constituye por derrames de rocas volcánicas de composición variada e intercalaciones de tobas, cuyas edades varían del Mioceno medio hasta el Holoceno, formando extensas cadenas

de volcanes; se le asocia a un arco volcánico continental formado por la subducción de las placas Rivera y Cocos bajo la Placa Norteamericana.



Figura 1.9. Provincias geológicas de México ^[10].

En la porción sur del Complejo Orogénico Zacatecano se encuentra una importante deformación tridimensional que ocurrió entre el Oligoceno y el Mioceno, de cuyos límites del bloque continental extendidos fueron el graben de Villa de Reyes y la falla de San Miguel de Allende al este, y la falla de Aguascalientes al oeste. Sin embargo, no fue la única ocurrida durante el Cenozoico, también se pueden destacar: “un primer evento extensional ocurrido en el Eoceno, un evento menor ocurrido antes de 32 Ma, el evento principal que tuvo edad entre 30 y 27 Ma, y dos eventos menores cercanos a los 24 y 11Ma” ^[11].

1.9. Estratigrafía

La estratigrafía fue tomada con base a lo establecido en cartografía geológica escala 1:50,000 y fechamientos isotópicos presentados por Alaníz *et al.* ^[11] (Figura 1.10) se destacan:

➤ **Unidad volcanosedimentaria (Kvs).** Esta unidad también es conocida como Secuencia Volcanosedimentaria Sierra de Guanajuato, que integra a las formaciones mesozoicas Esperanza y La Luz, que forman parte del Terreno Guerrero. Se conforma de estratos de arenisca, lutita, pedernal y algunos horizontes de radiolarita; estas se encuentran intercaladas con rocas volcánicas mayormente básicas, así como lavas, lavas almohadilladas, diques y abundante material piroclástico, que en general presenta una fase de metamorfismo de esquistos verdes. Presenta rocas metasedimentarias tales como filita, pizarra y cuarcita.

➤ **Caliza y Arenisca (KiCa).** Como límite superior del paquete mesozoico se encuentran areniscas calcáreas, margas y lutitas, intercaladas en calizas que pueden presentar vetillas de yeso; estas presentan un lineamiento regional con dirección NE-SW. Esta unidad yace discordantemente con sedimentos continentales conglomeráticos o por rocas andesíticas oligocénicas del área. Presenta una edad Aptiana-Albiana.

➤ **Conglomerado Polimíctico (TeCg).** En la región solo se encuentran pequeños afloramientos de esta unidad, que consiste de conglomerado y areniscas con una variedad de litofacies presentes. Se describe al conglomerado encontrado cercano al poblado de Corrales como un conglomerado rojo con intercalaciones de basalto y, ocasionalmente, de ignimbrita riolítica, diques y cuerpos intrusivos andesíticos y riolíticos; el conglomerado descansando discordantemente sobre el basamento mesozoico e igualmente discordantes yaciendo debajo por la secuencia volcánica oligocénica.

➤ **Andesita El Cedro (ToA).** Esta unidad de edad oligocénica (30.6 ± 0.4 Ma.) presenta grandes afloramientos en la porción sur de la Mesa Central yaciendo siempre bajo domos y derrames riolíticos oligocénicos. Se conforma de lavas y de algunas tobas, de composición basáltica a andesítica. Presenta espesores variables de hasta más de 100 m. Debido a la irregularidad de la superficie sobre la que se depositó

esta unidad es posible observar porciones donde la Andesita El Cedro descansa directamente sobre el basamento mesozoico, otras con intercalaciones de las lavas y rocas piroclásticas ácidas pertenecientes a la base de la Riolita Chichíndaro, o yaciendo sobre el conglomerado polimíctico.

➤ **Riolita Chichíndaro (ToCh).** Esta unidad se conforma de domos y derrames de lavas ácidas en un área extensa, esta riolita se caracteriza por ser rica en sílice y alta en potasio, y se encuentra cubriendo grandes porciones de la zona sur de la Mesa Central. De forma secundaria, también presenta traquita y riolacita; y asociadas a las lavas, ignimbritas, tovas, vitrófido y brechas, que comúnmente forman parte de las estructuras dómicas. Presenta espesores promedio de 100 y 150 m, llegando hasta 400 m, con una datada cercana a los 30 Ma. Esta unidad intrusión al basamento mesozoico, encontrándose derrames riolíticos cubriendo de forma discordante las rocas mesozoicas.

➤ **Ignimbrita Oligo-Miocénica (Tig).** Esta unidad agrupa ignimbritas con amplio rango de edades, tales como el conjunto de tobas e ignimbritas ubicadas en Cañada de la Virgen, aquellas encontradas en la falla de San Miguel de Allende, y las que afloran en la Sierra de los Cuarzos. Principalmente son de composición ácida, mayormente poco soldada, presentando intercalaciones de tobas y vitrófidos, con espesores promedio de 100 m y máximos de 200 m. Estas yacen de forma discordante sobre la Riolita Chichíndaro o sobre el basamento mesozoico. Sus edades fechadas por distintos autores varían de los 23.0 ± 0.3 Ma, 24.8 ± 0.6 Ma, 28.6 ± 0.7 Ma y 29.3 ± 0.3 Ma.

➤ **Riolita Romero (Trr).** Unidad que aflora en Cañada de la Virgen; se conforma de derrames riolíticos y domos riolíticos, presenta líneas de flujo bien definidas y gran cantidad de esferulitas. Su espesor máximo es de 150 m. Se le asigna una edad ubicada entre el Oligoceno y Mioceno medio.

➤ **Dacita Obrajuelo (Tdo).** Esta unidad se conforma de rocas volcánicas efusivas que afloran en forma de domos, presentando una amplia serie de estructuras con dirección NE; se caracterizan por ser rocas ricas en fenocristales de andesina, con contenidos de feldespato potásico, biotita y relictos de anfíbol, y ser rocas con una

coloración rosada. Cuenta con espesores de 150 y 200 m desde su base hasta la cima. Se le asigna una edad ubicada entre el Oligoceno y Mioceno medio.

➤ **Secuencia Cerro Colorado (Tdcc).** Se conforma de derrames, depósitos de lahar y brechas de composición andesítica y dacítica que forman un domo. Presentada una edad fechada de 16.1 ± 1.7 Ma.

➤ **Andesita y Basalto La Joya (TmJ).** Esta unidad se forma de los productos volcánicos de los estratovolcanes Palo Huérfano, La Joya, San Pedro y otros derrames que afloran en la parte sur de la Sierra de Guanajuato. Presenta una composición básica e intermedia, con derrames de espesores menores a 70 m. Se la asignó una edad de Mioceno medio.

➤ **Andesita y Basalto pliocénicos (TpAB).** La unidad agrupa los derrames de basalto y aparatos centrales más jóvenes de la zona; presentan una composición andesítica a basáltica, aflorando a lo largo de la falla San Miguel de Allende en su porción sur. Se le asigna una edad por correlación morfológica de entre 2.10 ± 0.24 Ma y 2.27 ± 0.27 Ma.

➤ **Arenisca y Conglomerado cenozoicos (ArCg).** Esta unidad agrupa a los sedimentos aluviales y lacustres encontrados en el área. Los sedimentos afloran en las partes bajas de las sierras, siendo depósitos sedimentarios de relleno de cuencas continentales. Se conforma de principalmente areniscas y conglomerados, pudiendo encontrar margas, lutitas, lentes de caliza y pedernal, tobas y material piroclástico re TRABAJADO. Sus espesores varían dependiendo de la cuenca donde fueron depositados.

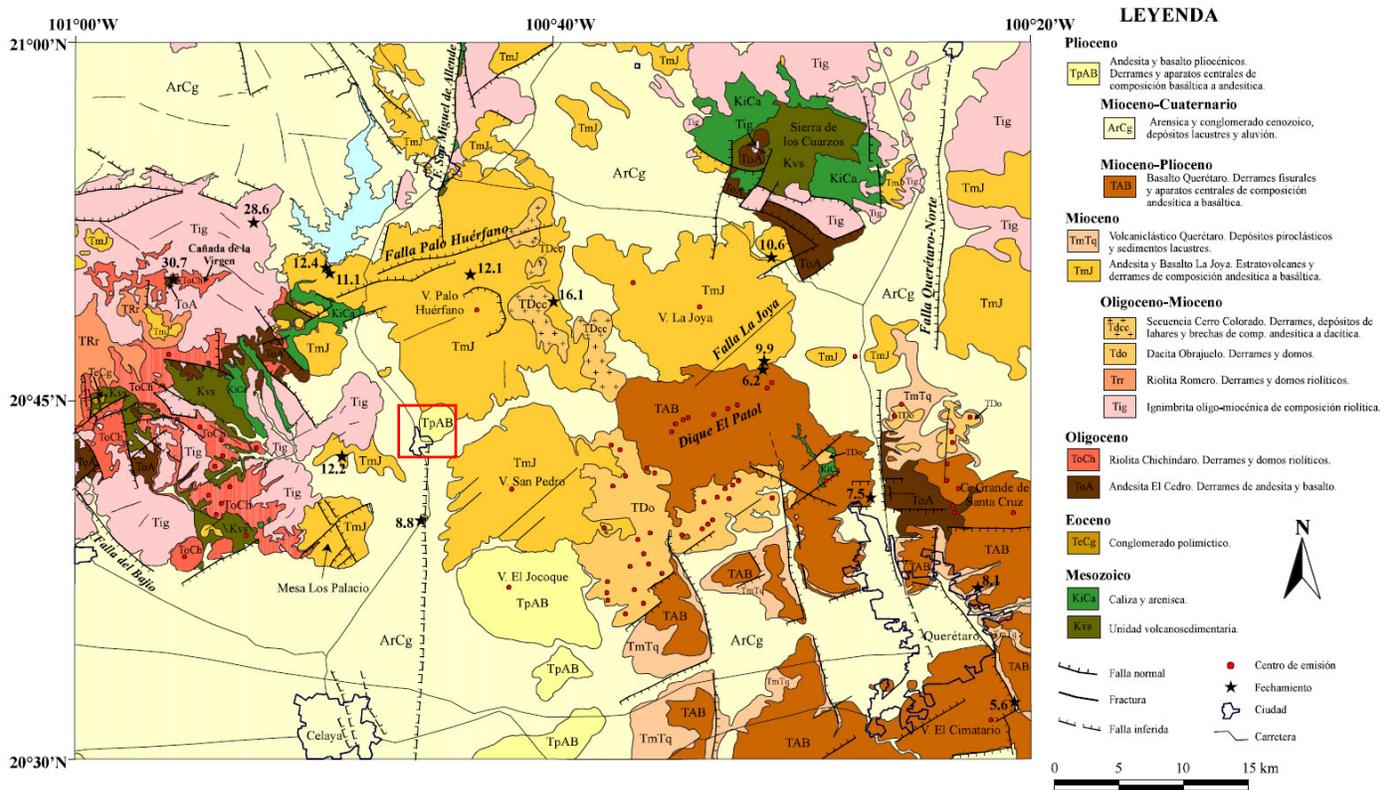


Figura 1.10. Mapa geológico de la región San Miguel de Allende-Querétaro [11]. Abarca de las coordenadas (UTM) 2,323,448.3 mN y 292,110.8 mE a 2,267,379.5 mN y 360,962.5 mE, ubicándose el sitio arqueológico en las coordenadas 2,292,785.4 mN y 317,355.8 mE.

1.10. Yacimientos Minerales

El municipio de Comonfort no cuenta con una tradición de minería metálica como en algunos otros municipios de Estado de Guanajuato, sin embargo, cuenta con abundantes yacimientos de minerales no metálicos, principalmente el caolín, encontrándose igualmente otros materiales pétreos y rocas dimensionables.

Las comunidades donde existe gran abundancia de caolín son las de Delgado de Arriba y Delgado de Abajo, donde existen decenas de minas caoliníferas en operación y abandonadas. Estas presentan diferentes calidades, dependiendo de la alteración que se encuentre, tal como la silicificación y hematización. El caolín puede ser explotado y utilizado para la elaboración de cemento blanco, cemento Portland, pastas cerámicas, piso cerámico, fertilizantes, papel,

plásticos, pinturas vinílicas, y aquellos con mayor pureza, en cosméticos y productos farmacéuticos ^[12].

1.11. Propuesta del Proyecto

Los procesos de restauración y conservación de sitios arqueológicos requieren de conocer de manera global las propiedades químicas, físicas y mecánicas de los materiales con los cuales se construyeron las edificaciones. Esto permite que los restauradores puedan seleccionar de manera más acertada el material que se empleará como remplazo o bien los tratamientos requeridos para su conservación. Entonces, un conocimiento profundo de la geología en la región (Cerro de los Remedios en Comonfort Guanajuato) así como del material encontrado en el sitio permite teorizar la proveniencia del material constructivo utilizado en el sitio arqueológico por lo cual este proyecto propone:

1) Realizar una caracterización física y química del caliche del sitio arqueológico, así como de caliche proveniente de la región; esto con la finalidad de conocer sus similitudes y para proponer la localización de los posibles sitios que podrían ser empleados como bancos de caliche para material de remplazo, y establecer la posibilidad de proponer la hipótesis de que del banco de material pudo provenir el material constructivo.

2) Por otra parte, las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales dependen de su composición y estructura de los componentes. Entonces, es posible generar un modelo de correlación entre propiedades mecánicas del material y su composición mineralógica que permita predecir su grado de deterioro y con ello la selección oportuna del tratamiento de conservación.

1.12. Objetivos

Objetivo General

Caracterizar el caliche, material de construcción del sitio arqueológico Cerro de los Remedios para conocer sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, y desarrollar un modelo matemático que permita predecir la pérdida de la resistencia mecánica de muestras de caliche con la composición del material.

Objetivos Específicos

1) Realizar la caracterización química a través de espectroscopía de fluorescencia de RX e infrarrojo, así como DRX de muestras de caliche sin deteriorar y presentes en el sitio arqueológico del Cerro de los Remedios en Comonfort Guanajuato.

2) Realizar el análisis petrográfico de muestras de caliche presentes en el sitio arqueológico del Cerro de los Remedios en Comonfort Guanajuato.

3) Determinar la dureza vickers en las fases mineralógicas presente en las muestras de caliche.

4) Realizar ensayos de compresión para conocer las propiedades mecánicas del caliche.

5) Desarrollar un modelo de correlación entre la composición de la roca y la resistencia mecánica.

1.13. Justificación

El deterioro natural de las rocas ocasiona la pérdida de sus propiedades mecánicas como son la dureza y resistencia, dichas propiedades son determinadas a través de ensayos destructivos; por lo que, no es posible medir de manera continua la disminución en la resistencia de materiales pétreos de monumentos históricos y/o arqueológicos sometidos a diferentes agentes de degradación natural como son el aire y la humedad. Por lo cual, se propone investigar la posibilidad de generar un modelo de predicción de la resistencia mecánica de materiales pétreos a través de la medición local de la dureza Vickers en las fases petrográficas de las muestras de caliche y su correlación con las microfases presentes en el material.

1.14. Hipótesis

El deterioro natural de los minerales que conforman la roca ocasiona la pérdida de sus propiedades mecánicas como son la dureza y resistencia, dichas propiedades dependen de las fases mineralógicas presentes en la roca; por lo cual podría existir una correlación entre la composición mineralógica de la roca y su resistencia mecánica.

CAPÍTULO 2

2. CONCEPTOS GENERALES DE LAS ROCAS CARBONATADAS

Este capítulo es tomado del libro: *Principles of Sedimentology and Stratigraphy* por Sam Boggs, Jr. (2009) ^[13].

Las rocas sedimentarias químicas/bioquímicas tienen un origen al precipitar los minerales contenidos en el agua a través de varios procesos químicos y bioquímicos. Estas se distinguen de las rocas sedimentarias siliciclásticas por su química, mineralogía, y textura. Mineralógicamente, estas pueden ser divididas en cinco grupos fundamentales:

- 1) Carbonatos
- 2) Evaporitas
- 3) Rocas sedimentarias siliciclásticas (pedernal)
- 4) Rocas sedimentarias con abundante hierro
- 5) Fosforitas.

Las rocas carbonatadas, tales como el carbón y la lutita bituminosa, pertenecen a un grupo especial de rocas que contienen abundante materia orgánica no-esqueletal además de otros constituyentes químicos o siliciclásticos.

Las rocas carbonatas, son por mucho el tipo de roca más abundante de las rocas sedimentarias químicas, y pueden ser divididas mineralógicamente en calizas y dolomitas. Las calizas están compuestas principalmente del mineral calcita, y las dolomitas están compuestas principalmente del mineral dolomita. Las rocas carbonatadas representan del 20 al 25 por ciento de todas las rocas sedimentarias del registro geológico. Están presentes en muchos afloramientos Precámbricos y en todos los sistemas geológicos del Cámbrico al Cuaternario.

2.1. Rocas Carbonatadas. Génesis y Formación

Las rocas carbonatadas al pertenecer al grupo de las rocas sedimentarias se originan de un proceso común denominado intemperismo. El intemperismo involucra procesos químicos, físicos y biológicos, sin embargo, los procesos químicos son por mucho los más

importantes. El intemperismo químico involucra cambios que pueden alterar las composiciones químicas y mineralogías de las rocas. Durante el intemperismo químico, los minerales en las rocas son atacados por el agua y disuelve gases atmosféricos tales como el oxígeno y dióxido de carbono, causando que algunos de los componentes de los minerales sean disueltos y removidos de la solución. Otros constituyentes minerales se recombinan *in situ* y cristalizan para formar nuevas fases minerales. Los procesos de intemperismo químico son listados a continuación en la Tabla 2.1 y explicados brevemente.

Una vez que ocurren los procesos de intemperismo químico se libera iones de la roca que se disuelven en agua subterránea y agua superficial, estos iones logran llegar a lagos y océanos y gracias a la interacción que hay entre el agua con el CO₂ (atmosférico y contenido en los suelos) es posible que sean añadidos iones de bicarbonato (HCO₃⁻); la mayoría de estos iones disueltos terminan llegando al océano, donde se mantienen en disolución en agua marina por periodos que van de los cientos a millones de años. Al tiempo que permanece el ion metálico disuelto en aguas del océano antes de precipitar es llamado tiempo de residencia; por ejemplo, los iones de calcio (Ca²⁺) tiene tiempos de residencia cortos que van entre los ~110,000 años.

La abundancia de iones de calcio y carbonato en el agua de los ríos contra la del agua oceánica son muy diferentes; mientras que los iones de bicarbonato (HCO₃⁻) y Carbonato (CO₃²⁻) juntos conforman casi el 49% total de los sólidos disueltos en promedio del agua de los ríos, en el caso del agua oceánica representa únicamente el 1% del total de sólidos disueltos. De la misma manera, los iones de calcio (Ca²⁺) componen alrededor del 12% de sólidos disueltos en el agua de los ríos, pero únicamente el 1% en el caso del agua oceánica. La diferencia en la abundancia de los iones de carbonato, bicarbonato, y calcio entre los dos tipos de aguas se puede explicar observando la abundancia relativa de varios tipos de rocas sedimentarias no-siliciclasticas preservadas en el registro geológico. Las mediciones de los espesores y volúmenes de distintos tipos de rocas sedimentarias muestran que las rocas sedimentarias químicas y bioquímicas depositadas componen casi la cuarta parte de todas las rocas sedimentarias.

Tabla 2.1. Principales procesos de meteorización química. ^[13].

Intemperismo Químico	Ejemplos	Tipos principales de materiales rocosos afectados
Solución simple (congruente) - Disolución de minerales solubles en H ₂ O (solución directa) o en H ₂ O + CO ₂ (carbonación) para ceder cationes y aniones en solución.	SiO ₂ + 2H ₂ O → H ₄ SiO ₄ (solución directa) (cuarzo) (ácido silícico) ac	Minerales altamente solubles Ejemplos: halita, yeso, cuarzo
	CaCO ₃ + H ₂ O + CO ₂ ↔ Ca ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻ (carbonatación) (calcita)ac	Rocas carbonatadas
Hidrolisis (disolución incongruente) – Reacción entre iones H ⁺ y OH ⁻ de agua y iones de minerales silicatos, produciendo cationes solubles, ácido silícico, y minerales arcillosos (si hay Al presente).	2KAlSi ₃ O ₈ + 2H ⁺ + 9H ₂ O → H ₄ Al ₂ Si ₂ O ₉ + 4H ₄ SiO ₄ + 2K ⁺ (ortoclasa)ac (caolinita) (ácido silícico)ac	Minerales silicatados
	2NaAlSi ₃ O ₈ + 2H ⁺ + 9H ₂ O → H ₄ Al ₂ Si ₂ O ₉ + 4H ₄ SiO ₄ + 2Na ⁺ (albita) (caolinita) (ácido silícico)ac	
Oxidación - Pérdida de un electrón de un elemento (comúnmente Fe o Mn) en un mineral, resultando en la formación de óxidos o hidróxidos (si hay presencia de agua).	2FeS ₂ + 15/2O ₂ + 4H ₂ O → Fe ₂ O ₃ + 4SO ₄ ²⁻ + 8H ⁺ (pirita) (hematita) ac	Sulfuros de hierro, minerales silicatados con hierro y magnesio
	MnSiO ₃ + 1/2O ₂ + 2H ₂ O → MnO ₂ + H ₄ SiO ₄ (rodonita) (pirolusita) (ácido silícico)	
Otros Procesos		
Hidratación y Deshidratación - Ganancia (hidratación) o pérdida (deshidratación) de moléculas de agua de un mineral, dando como resultado en la formación de un nuevo mineral.	Fe ₂ O ₃ + H ₂ O ↔ 2FeOOH (hidratación) (hematita) (goethita)	Óxidos de hierro
	CaSO ₄ · 2H ₂ O ↔ CaSO ₄ + 2H ₂ O (yeso) (anhidrita)	Evaporitas
Intercambio Iónico - Intercambio de iones, principalmente cationes, entre soluciones y minerales.	arcilla-K + Mg ²⁺ ↔ arcilla Mg + K ⁺	Minerales arcillosos y zeolitas
	zeolita -Ca + Na ⁺ ↔ zeolita-Na + Ca ²⁺	
Quelación - Enlace de iones metálicos a moléculas orgánicas formando anillos estructurales.	Iones metálicos (cationes) + agente de quelación (ej. Secretado por líquenes) → iones H ⁺ + quelación (iones metálicos/moléculas orgánicas en solución)	Minerales de silicato
Nota: ac = acuoso		

La mayoría de estas rocas son rocas carbonatadas, compuestas de carbonato de calcio y minerales de carbonato calcio-magnesio; siendo removidos de los océanos preferentemente los iones de carbonato, bicarbonato y calcio a través del tiempo geológico para formar rocas carbonatadas, así explicándose la baja abundancia relativa de estos iones en los océanos modernos y su corto tiempo de residencia.

2.2. Rocas Carbonatadas: Calizas

La disolución y precipitación de los minerales de carbonato de calcio (CaCO_3), calcita y aragonita, son controlados principalmente por el pH, que a su vez es ampliamente controlados por la presión parcial de dióxido de carbono disuelto en el agua, cuando éste es disuelto en el agua pueden ocurrir las reacciones químicas mostradas en la Figura 2.1, formación del ácido carbónico y su disociación en ion bicarbonato y ion carbonato.

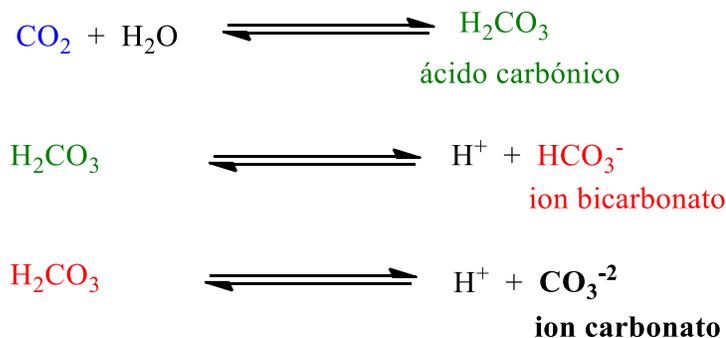


Figura 2.1 Disolución del dióxido de carbono en agua y disociación del ácido carbónico.

Cuando los cristales de calcita y aragonita entran en contacto con el CO_2 disuelto en agua; éstos reaccionan para disociarse reversiblemente en ion calcio e incrementando la concentración de bicarbonato (Figura 2.2). En caso de que ocurra una pérdida de dióxido de carbono, disminuirían los iones de hidrógeno y el pH se incrementaría, resultando en la precipitación de CaCO_3 sólido. Sin embargo, cabe mencionar que a pesar de que esto es teóricamente plausible, la precipitación de carbonato de calcio causado por la pérdida de CO_2 puede no ser tan importante bajo condiciones naturales en el océano abierto.



Figura 2.2 Disolución de calcita y/o aragonita.

Dos de los principales mecanismos que pueden causar pérdida de dióxido de carbono en el agua son el incremento en la temperatura y la disminución de la presión en el agua. La primera, causa un descenso en la solubilidad del dióxido de carbono y de otros gases en el agua disminuyendo su capacidad de disolver y retener el dióxido de carbono. La segunda, es debido a condiciones naturales, al disminuir la presión del agua puede causar que el dióxido de carbono escape y que sea absorbido por la atmósfera, estos cambios pueden deberse a la agitación causada por tormentas o el rompimiento de las olas, inclusive la disminución de la presión atmosférica puede causar la liberación de una pequeña cantidad de dióxido de carbono.

El incremento de la temperatura de la misma manera causa una disminución en la solubilidad de minerales de carbonato de calcio, esto significa que un mineral puede ser más propenso a precipitarse bajo ciertas condiciones dadas; por lo tanto, la deposición de carbonato de calcio es más favorable en las áreas tropicales de los océanos, donde las temperaturas del agua superficial puedan alcanzar hasta 30°C, comparado a los aproximados 0°C en las regiones polares.

La solubilidad de los constituyentes químicos es también afectada por la salinidad, la fuerza iónica del agua y temperatura (véase Tabla 2.1). La fuerza iónica es función de la concentración de iones en la solución y las cargas en estos iones; por lo tanto, la fuerza iónica aumenta si la salinidad incrementa. Los minerales de carbonato de calcio disminuyen considerablemente su solubilidad cuando existe poca salinidad, esto se debe a que el descenso de la fuerza iónica disminuye la concentración de iones externos (ej. Mg^{2+}), cualquier otro que Ca^{2+} y CO_3^{2-} . Entonces, los diferentes iones externos interfieren con la formación de la estructura de los cristales de carbonato de calcio, causando que sea más difícil para los minerales de calcita y aragonita que crezcan y se precipiten; por lo tanto, la solubilidad del

carbonato de calcio es mucho más baja en presencia de agua dulce que en comparación con el agua marina, lo que significa que el carbonato de calcio precipita más fácilmente en agua dulce. Sin embargo, la influencia de la salinidad en la solubilidad del carbonato de calcio en las aguas superficiales del océano abierto puede ser ligera debido a que los rangos de salinidad de estas aguas varían únicamente entre 32 y 36 partes por mil.

Tabla 2.2. Principales factores que afectan la precipitación inorgánica del CaCO_3 en el agua marina y agua dulce ^[13].

Condiciones del agua	Dirección del cambio	Efectos por el cambio	Efecto en la solubilidad del CaCO_3	Tipo de CaCO_3 precipitado
Temperatura	Incrementa	Pérdida de CO_2 , incremento en el pH	Disminuye*	Micrita u oolitos
Presión	Disminuye	Pérdida de CO_2 , incremento en el pH	Disminuye	Micrita u oolitos
Salinidad	Disminuye	Disminución de actividad de cationes externos	Disminuye	Micrita u oolitos

*Disminución de la solubilidad del CaCO_3 = incremento de la precipitación

2.3. El Rol de Organismos en la Precipitación de Carbonato de Calcio

La precipitación de minerales a partir del agua es fundamentalmente un proceso químico; sin embargo, los procesos químicos pueden ser auxiliados por organismos en una variedad de formas. A pesar de que pueda ocurrir una precipitación inorgánica de minerales de carbonato de calcio partir de agua marina de salinidad normal o agua dulce, es menos común hoy en día que la precipitación auxiliada de alguna manera por procesos orgánicos. Además, evidencia geológica sugiera que los organismos han jugado un papel un importante durante la sedimentación de carbonatos a lo largo del tiempo Fanerozoico (post-Precámbrico),

y durante el tiempo Precámbrico algunos organismos como las bacterias pudieron también haber sido los mediadores de la precipitación carbonatada de ese periodo.

El rol más importante que tienen los organismos al momento de la formación de sedimentos carbonatados es probablemente que estos remueven directamente el carbonato disuelto para hacer sus conchas, siendo éste un proceso bastante común. Los vertebrados marinos que construyen su concha protectora o algún otro de estructura tipo esqueleto de carbonato de calcio varían desde especies planctónicas tales como los foraminíferos y terópodos, hasta organismos bentónicos tales como las algas calcáreas, corales, moluscos, y equinodermos; estos pueden remover el CaCO_3 no de únicamente del carbonato de calcio que se encuentra saturado en las aguas superficiales en las regiones tropicales, sino también de las aguas menos saturadas en regiones de temperaturas más frías. Algunos organismos forman material esquelético a partir de calcita y otros de aragonita. La importancia del papel que juegan los organismos al momento de remover carbonato de calcio de los océanos es demostrada por el hecho de que la mayoría de las calizas Fanerozoicas contienen fósiles reconocibles de carbonato de calcio, y muchas están compuestas en su mayoría de estos restos. También, grandes áreas del piso oceánico moderno están cubiertas por restos calcáreos compuestos principalmente de las heces de los foraminíferos, algas unicelulares (cocolitóforos) y terópodos.

Debido a que existen en grandes cantidades organismos que hacen uso del carbonato de calcio en varias partes del océano, estos tienen el potencial de suplir en importantes volúmenes sedimentos carbonatados de distintos tamaños al desintegrarse o depositarse sus restos esqueléticos después de su muerte en el lecho oceánico. Algunos restos esqueléticos pueden consistir de caparazones de grandes invertebrados tales como pelecípodos, gasterópodos, braquiópodos, y corales; estos grandes caparazones pueden fragmentarse a pedazos del tamaño de las arenas o inclusive más pequeños debido a actividad biogénica o rompimiento físico. Dependiendo del tipo de organismos del cual se desprende el carbonato de calcio depende el tamaño de la partícula, que pueden ir desde el tamaño de arenas (foraminíferos y terópodos) hasta limos finos (coccolitos), también las algas pueden presentar una variedad de tamaños debido a la actividad de bacterias y descomposición química.

Por otra parte, existe otro tipo de actividad orgánica que puede ser importante para la remoción de dióxido de carbono del agua y éste es el proceso de la fotosíntesis de las plantas; como se ha mencionado esto aumenta el pH del agua facilitando la precipitación de los carbonatos, se representa en la Figura 2.3.



Figura 2.3 Eliminación de CO₂ por Agua.

Algunos de los ejemplos más importantes de organismos que utilizan el dióxido de carbono en el lecho marino son el alga azul-verde (cianobacteria), bacterias fotosintéticas, y pequeño fitoplancton tales como las diatomeas, dinoflagelados, y coccolitos. La actividad fotosintética depende de la luz solar, por lo que será mayor en zonas con mayor acceso a ella, removiendo CO₂.

La descomposición de organismos muertos también afecta al pH, debido a que este proceso libera ácidos orgánicos y dióxido de carbono al agua, causando una disminución del pH; aunque, algunos productos de descomposición pueden ser alcalinos causando un incremento de pH, esto es causado debido a que las bacterias degradan a través de una reducción de sulfato la materia orgánica, favoreciendo la precipitación de CaCO₃.

Los *Pellets* fecales pueden ser observados como peloides carbonatados, generados por organismos tales como el pepino de mar, moluscos, y gusanos; estos organismos ingieren arcillas de carbonato de calcio para obtener nutrientes y expulsan los restos como *pellets*; este proceso no genera nuevos sedimentos carbonatados, sino que simplemente remoldean los sedimentos a una nueva forma.

2.4. Procesos Físicos en la Depositación Carbonatada

Las partículas carbonatadas tales como los fósiles de carbonato de calcio, oolitos, fragmentos de esqueletos y conchas, al igual que los granos continentales, se ven sometidos

a los procesos físicos de transporte en el océano; así, la deposición final de la mayoría de las calizas ocurre a través de procesos de sedimentación por corrientes y gravedad. Por lo tanto, las calizas pueden presentar estratificación y otras estructuras sedimentarias al igual que las rocas sedimentarias continentales.

2.5. Dolomita

Las dolomitas son rocas de carbonato de calcio compuestas por más del 50 por ciento del mineral dolomita $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$. Estas rocas son abundantes y ampliamente distribuidas en el récord geológico, encontrándose del Precámbrico al Holoceno, sin embargo, los mayores volúmenes se encuentran situados en el Paleozoico o en tiempos aún más antiguos. Las dolomitas se forman en asociación cercana con las calizas y en muchas unidades estratigráficas como intercalaciones en calizas, también son comúnmente asociadas a las evaporitas. Las dolomitas presentan dos procesos de formación, el primero es por reemplazamiento, debido a una alteración rápida de un precipitado inicial de CaCO_3 convirtiéndolo a dolomita, el segundo es al igual que en el caso de las calizas, por precipitación. Las reacciones químicas responsables de la formación de las dolomitas se indican en la Figura 2.4; donde la Ecuación A ilustra la precipitación directa de dolomita de una solución acuosa; la Ecuación B muestra el reemplazamiento de calcita o aragonita por dolomita.

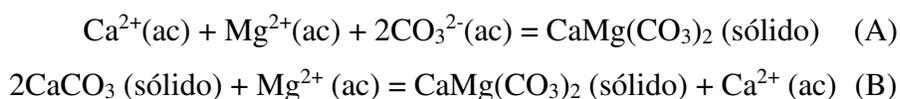


Figura 2.4 Reacciones de formación para la dolomita.

2.6. Diagénesis

La mayoría de las rocas carbonatadas son formadas bajo condiciones marinas, sin embargo, también pueden formarse en condiciones continentales. Después de su deposición, los sedimentos carbonatados son puestos bajo una variedad de procesos diagenéticos que causan cambios de porosidad, mineralogía y química. Los sedimentos carbonatados son

generalmente más susceptibles a disolución, recristalización y reemplazamiento que la mayoría de los silicatos, por lo que la mineralogía de los sedimentos carbonatados puede ser completamente alterada. Estos cambios pueden modificar o destruir las texturas originales con la que se formaron, tales como granos de carbonato y micrita; también su porosidad puede ser reducida por compactación y cementación o aumentada por disolución.

2.7. Regímenes de Diagénesis de Carbonatos

Al igual que los sedimentos siliciclásticos, los sedimentos carbonatados pasan por las etapas generales de diagénesis, tales como eogénesis (enterramiento somero), mesogénesis (enterramiento profundo) y telogénesis (erosión y oxidación por exhumación). El proceso de diagénesis toma lugar en tres grandes regímenes o zonas: marina, meteórica, y subsuelo.

El régimen marino comprende al suelo marino y la parte somera del subsuelo marino, éste se caracteriza de por tener una salinidad normal. Los principales procesos diagenéticos en este ambiente son la bioturbación de sedimentos, la modificación de conchas carbonatadas y de otros granos por *boring organisms*, y cementación de granos en áreas de agua templada, particularmente en arrecifes, bancos de arena en los márgenes de plataforma, y depósitos carbonatados de playa.

Entonces, los sedimentos de carbonato pueden ser llevados del suelo marino a la región meteórica de dos formas: bajando el nivel del mar (regresión marina) y rellenando progresivamente una cuenca carbonatada somera; también puede ser causado por el levantamiento tectónico de un complejo carbonatado profundamente enterrado (telegénesis). Esta región se caracteriza por la presencia de agua dulce; ésta incluye la zona vadosa insaturada arriba del nivel freático, o la zona saturada. Debido a que las aguas meteóricas típicamente presentan altas cantidades de CO₂ son químicamente muy agresivas (ácidas), y debido a que la aragonita y la calcita rica en magnesio son más solubles que la calcita, éstas se disuelven fácilmente estas aguas corrosivas causando que el agua se sature con carbonato de calcio y provocando que la calcita se precipite, a esto se le llama calcitización.

Después del periodo inicial de diagénesis en el suelo marino, y posiblemente en la región meteórica, los sedimentos carbonatados son gradualmente enterrados entrando a la región del subsuelo y sujetos a mayores presiones, superiores temperaturas, y un cambio composicional de los fluidos en sus poros. Bajo estas condiciones los sedimentos carbonatados sufren cambios, tales como una compactación física, química, y cambios químicos o mineralógicos que pueden incluir disolución, cementación, transformación de aragonita a calcita, y reemplazamiento de calcita por otro mineral, tal como la dolomita. La naturaleza de los cambios puede variar dependiendo de las condiciones específicas del ambiente en donde son sepultados (temperatura, composición de fluidos en los poros, pH).

2.8. Clasificación de las Rocas Carbonatadas

La mineralogía tiene solo un pequeño rol en la clasificación de rocas carbonatadas debido a que la mayoría de estas son esencialmente monomineral. La mineralogía es utilizada principalmente para diferenciar la dolomita de la caliza o rocas carbonatadas de las no carbonatadas. Los principales constituyentes o parámetros utilizados en la clasificación de carbonatos son los tipos de granos carbonatados o aloquímicos; así como su cantidad de grano/micrita. La naturaleza de la matriz o fábrica es también utilizada en algunas clasificaciones, en las cuales la fábrica es nombrada como grano-soportada o matriz-soportada. Una fábrica grano soportada es aquella en cual los granos se encuentran en contacto entre sí, creado una red de granos, en la cual los espacios pueden o no estar rellenos con matriz. En una fábrica de matriz-soportada, la mayoría de los granos no se encuentran en contacto, y aparentan “flotar” en una matriz carbonatada.

La clasificación de Folk (1959,1962) resumida en la Tabla 2.3, es considerada como la clasificación de calizas más aceptada debido a su aplicación a un amplio rango de tipos de rocas carbonatadas y la facilidad con la que sus términos pueden ser comprendidos y utilizados. La clasificación se basa en la abundancia relativa de tres grandes constituyentes: granos carbonatados o aloquemos, barro carbonatado microcristalino (micrita), y calcita cementada espática. La clasificación primero determina la abundancia relativa del total de aloquemos contra micrita más calcita cementada espática ^[14].

Tabla 2.3. Clasificación de rocas carbonatadas ^[14].

		Calizas, calizas parcialmente dolomitizadas				Dolomitas de reemplazo				
		>10% Aloquemos Rocas aloquímicas		<10% Aloquemos Rocas Microcristalinas		<i>Undisturbed bioherm rocks</i>	<i>Allochem ghosts</i>	No allochem ghosts		
		Calcita cementada espática > matriz microcristalina Rocas aloquímicas espáticas	Matriz microcristalina > calcita cementada espática Rocas aloquímicas microcristalinas	1% - 10% Aloquemos	<1% Aloquemos					
Composición volumétrica de aloquemos	>25% Intraclastos	<i>Intrasparrudite</i> <i>Intrasparite</i>	<i>Intramicrodite</i> <i>Intramicroite</i>	Mayor abundancia de Aloquemos	Intraclastos: Intraclastos rellenos por micrita Ooides: ooides rellenos por micrita Fósiles: micrita fossilífera Peloides: micrita pelóica	Micrita, si es alterada, dismicrita; Si primaria, dolomita, dolomicroita	<i>Bioherm</i>	Aloquemos evidente	Dolomita cristalina fina intraclástica, etc. Dolomita oolítica cristalina gruesa, etc. Dolomita biogénica afanítica, etc. Peloides dolomíticos cristalinos muy finos.	Dolomitas con cristales medianos Dolomita microcristalina Etc.

La Figura 2.4 representa la esquemática de los constituyentes que forman las bases para la clasificación de Folk de rocas carbonatadas. Donde, se tiene una división en rocas aloquímicas y orthoquímicas; teniendo como matriz la calcita microcristalina para las orthoquímicas y matriz de calcita espática o microcristalina para las aloquímicas ^[14].

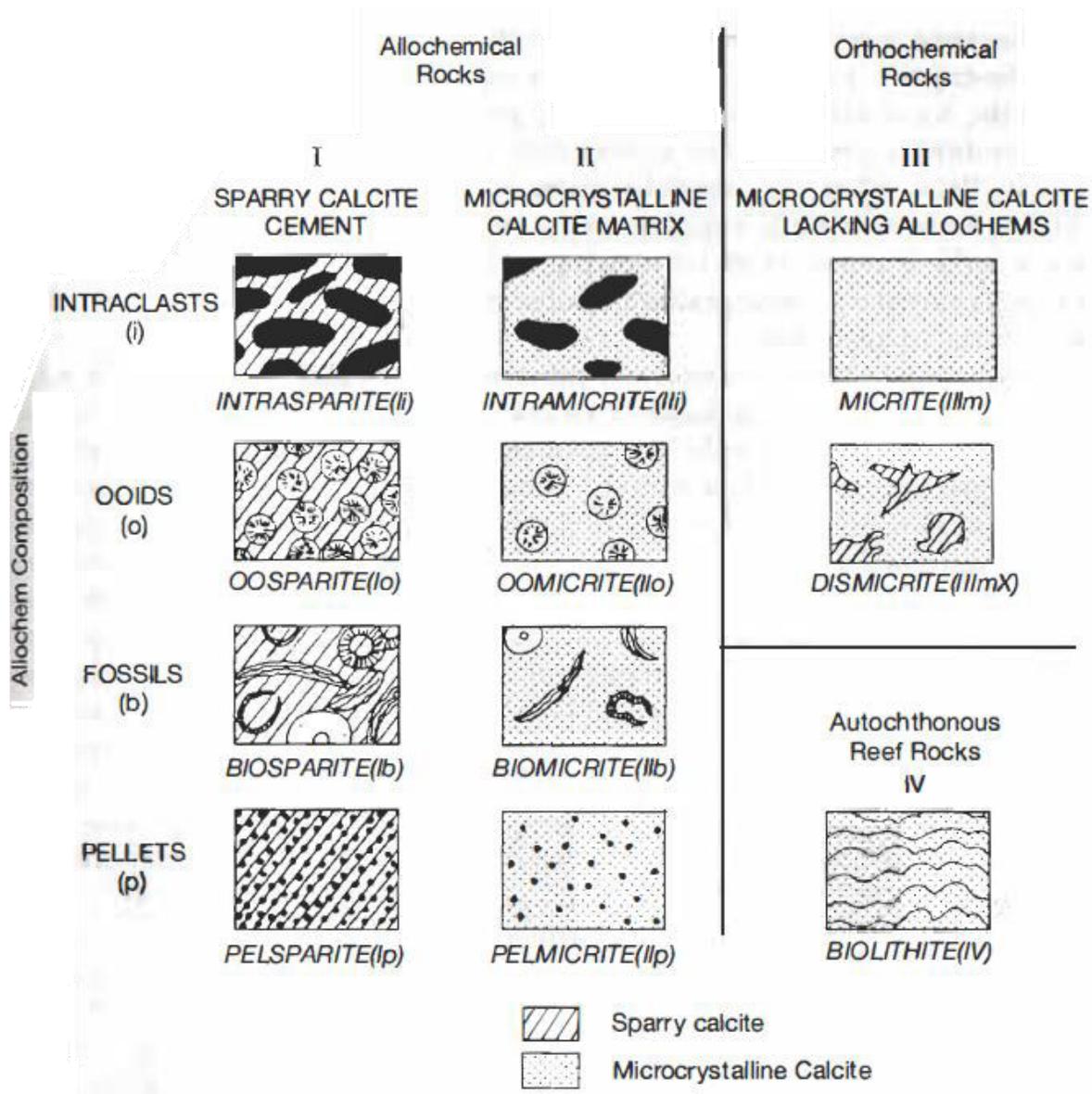


Figura 2.4. Clasificación de rocas carbonatadas según Folk ^[14].

En la Figura 2.5 se muestra la clasificación textural de sedimentos carbonatados basados en la abundancia relativa de su matriz limo-arcillosa y calcita espática y su abundancia de

aloquemos. Los términos utilizados por Folk (1959, 1962) para diferenciar texturas depositacionales son puramente descriptivas; sin embargo, también tienen significado ambiental. Por ejemplo, el término biomicrita señala una interpretación de depositación bajo condiciones de aguas tranquilas donde la micrita es abundante y la separación de limos y arcillas es mínima. Así, la micrita es acumulada junto con partículas esqueléticas; por otro lado, el término bioesparita sugiere una depositación en un ambiente con más agitado con oleaje donde micrita es removida por las corrientes de arrastre, permitiendo la acumulación de granos carbonatados libres de barro. Estos granos son posteriormente cementados con calcita espática durante su diagénesis.

	OVER 2/3 LIME MUD MATRIX				SUBEQUAL SPAR & LIME MUD	OVER 2/3 SPAR CEMENT		
	0 - 1%	1 - 10%	10 - 50%	OVER 50%		SORTING POOR	SORTING GOOD	ROUNDED & ABRADED
Percent Allochems								
Representative Rock Terms	MICRITE & DISMICRITE	FOSSILIFEROUS MICRITE	SPARSE BIOMICRITE	PACKED BIOMICRITE	POORLY WASHED BIOSPARITE	UNSORTED BIOSPARITE	SORTED BIOSPARITE	ROUNDED BIOSPARITE
Terminology	Micrite & Dismicrite	Fossiliferous Micrite	Biomicrite		Biosparite			
Terrigenous Analogues	Claystone		Sandy Claystone	Clayey or Immature Sandstone	Submature Sandstone	Mature Sandstone	Supermature Sandstone	

LIME MUD MATRIX

SPARRY CALCITE CEMENT

Figura 2.5. Clasificación textural de sedimentos carbonatados basados en la abundancia relativa de su matriz limo-arcillosa y sparry calcite cement, y su abundancia de aloquemos ^[13].

Comúnmente son utilizados términos como coquina, creta, marga y caliche como nombres informales para rocas carbonatadas. Una coquina es una roca de grano grueso compuesta por restos fósiles pobremente consolidada; coquinita es su equivalente consolidado. La creta es una caliza blanda, porosa y de textura fina, compuesta casi por completo de las partes duras de microorganismos marinos, tales como de los foraminíferos;

mientras que la marga es un término antiguo, impreciso, de una terregosa, pobremente consolidada mezcla de arcilla siliciclástica y carbonato de calcio.

2.9. Rocas Carbonatadas: Caliche

En el continente americano el término caliche o kaliche es utilizado comúnmente para describir a materiales formados recientemente en asociación de carbonato de calcio con potasio, yeso, y nitratos (en algunos casos) en los desiertos de México y Estados Unidos. En Europa y África, se les llama calcreta, que indica la composición con la que el suelo fue cementado.

El caliche se forma por agregados carbonatados autigénicos y neogénicos continentales que están espacialmente asociados a suelos y sedimentos terrígenos. Sus ambientes de formación no son únicamente en regímenes áridos influenciados por las aguas subterráneas y de la zona vadosa, sino que es posible que su formación ocurra en regímenes semiáridos e inclusive en zonas tropicales. Por lo que, se le llama caliche a las costras carbonatadas y carbono-silicatadas (*hardpans*), incrustaciones y envolturas carbonatadas (*nari*, *pendents*), formaciones sedimentarias terrígenas cementadas con carbonatos (areniscas, aglomerados, limolitas, conglomerados, etc.) o carbonización dispersa, y *phytomorphs* (raíces y suelos vegetales reemplazados por carbonatos) ^[15].

La formación del caliche en desiertos debe cumplir con condiciones adecuadas, tales como: La presencia de algún tipo de roca carbonatada en su geología regional, la presencia de carbonatos de calcio en los suelos del área, regímenes áridos a semi-áridos, amplia actividad de capilaridad, y presencia de CO₂ en el ambiente. A su vez, al ser rocas de formación secundaria, sus contenidos químicos y procesos de formación no divergen demasiado del anteriormente explicado para las calizas. La Figura 2.6 muestra como el ácido carbónico juega un papel importante en la disolución de minerales carbonatados de calcio y magnesio, dando como resultado la formación de bicarbonato (HCO₃).

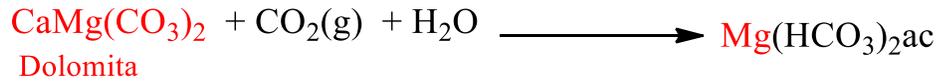
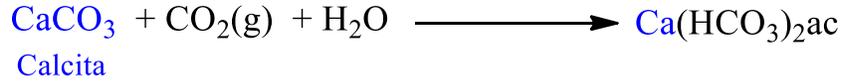


Figura 2.6 Disolución de Dolomita y calcita.

Entonces, la solución saturada se percola al subsuelo generalmente en suelos no consolidados o en materiales arcillosos, donde son depositados y posteriormente ascienden a la superficie debido al efecto de la capilaridad y evaporación durante las temporadas áridas y semi-áridas. Debido a estas condiciones ambientales, el CO_2 y el H_2O contenidos en la solución son evaporados y removidos de la solución saturada de bicarbonato de calcio estancada precipitando minerales más estables tales como la calcita.

En el caso particular de México, numerosos autores han enfocado sus esfuerzos en proveer información referente al caliche en esta parte del mundo; Siderenko (1956, 1958) demostró que las costras carbonatadas encontradas en la parte norte de la Mesa Central que tienen espesores de 2.5 a 3 metros, se forman a profundidades de 0.5m del subsuelo como se esquematiza en la Figura 2.6. Los caliches formados en los desiertos y aquellos formados en ambientes húmedos y árido-húmedo difieren uno entre otro en sus asociaciones características de rocas, así como en sus tipos de morfología y génesis. Sin embargo, en ambos casos los caliches están asociadas a procesos de edafogénesis ^[16].

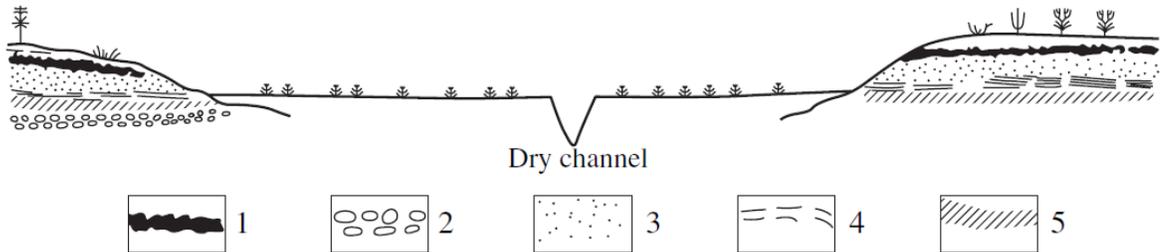


Figura 2.7. Posición y estructura de las costras carbonatadas (hardpan) en los desiertos mexicanos ^[16]. (1) Areniscas cementadas con una dura costra de carbonatos; (2) Aglomerado; (3) Cemento carbonatado fino; (4) Marga lenticular; (5) Nivel del agua subterránea.

3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

3.1. Análisis Petrográfico

La técnica de microscopía óptica o análisis por PLM (por sus siglas en inglés *Polarized Light Microscope*) es una técnica básica utilizada en el reconocimiento y caracterización de rocas. Esta técnica se caracteriza por la rapidez con la que pueden ser identificadas las fases y texturas de una roca, además de ser de bajos costos. A continuación, se detallan algunos aspectos importantes de la técnica.

3.1.1. Identificación mineral y propiedades ópticas

Los minerales por definición son sólidos homogéneos, inorgánicos y de origen natural, con composición química definida y disposición atómica ordenada, que presentan características representativas de cada especie mineral tales como el hábito, exfoliación y maclado. Estas propiedades son las relativas a la interacción de la luz visible con las sustancias y están determinadas, principalmente, por la composición química y por la estructura cristalina.

Gran parte de los minerales son anisótropos (propiedades varían con la dirección en la cual son analizadas) lo que causa que la propagación de la luz en los cristales varíe fuertemente según su posición, aunado a eso, la luz, como otras radiaciones electromagnéticas, presentan un movimiento ondulatorio en el que las ondas vibran perpendicularmente a la dirección de propagación, pero en diferentes planos, por lo que es determinante la dirección u orientación de la luz, y de la interacción de los cristales con la luz. Por lo tanto, se utilizan microscopios de luz polarizada como el que se muestra en la Figura 3.1. La luz polarizada es aquella que

vibra en un único plano mediante un filtro polarizado (polarizer) y una platina giratoria que permita orientar los minerales, como elementos esenciales en el microscopio. Otros de sus elementos a destacar son un segundo filtro polarizado colocado por encima de platina denominado analizador, y un lente auxiliar llamado lente de Bertrand. El microscopio polarizado cuenta con distintos lentes de aumento que permite cubrir un campo de 40X hasta 400X que es el adecuado para la determinación óptica de los cristales [17].

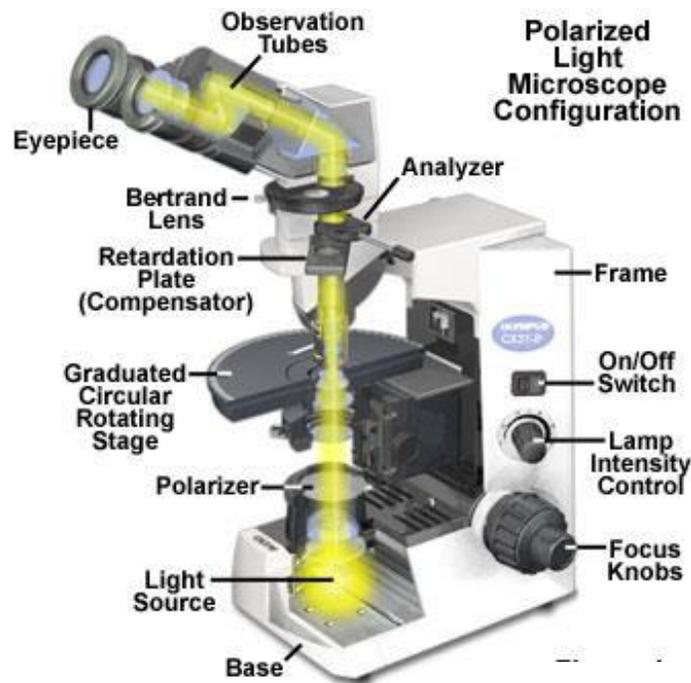


Figura 3.1. Partes del microscopio de luz polarizada [18].

Para observar los minerales con luz transmitida haciendo uso del equipo anteriormente mencionado, se requiere de muestras lo suficientemente delgadas que permitan el paso de la luz con un bajo grado de absorción. Así que, son preparadas las muestras mediante procedimientos abrasivos, en “láminas delgadas” con un espesor estándar de 0.03 mm para el cual la mayoría de los minerales son transparentes. Jiménez y Velilla (2004) definen las propiedades ópticas utilizadas en la identificación de minerales bajo microscopía de luz transmitida; las cuales se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Propiedades empleadas para la identificación de minerales empleando luz transmitida ^[17].

Técnica de Análisis			
Propiedades	Con un solo polarizador	Visión Ortoscópica.	Visión Conoscópica
		Obtenida al tener el polarizador y el analizador cruzados a 90° y con iluminación paralela	Obtenida al tener cruzado el polarizador y el analizador a 90°, el condensador de la luz (para obtener iluminación convergente) y el lente de Bertrand.
	Índice de Refracción	Birrefringencia	Figura de interferencia
	Propiedad que relaciona la velocidad de propagación de la luz en un cristal respecto a la del vacío.	Diferencia entre los valores de los índices de refracción mayor y menor que presenta un cristal anisótropo	Formado por procesos complejos de interferencia de ondas en el cristal. Permite distinguir el tipo óptico de un cristal (clasificado como uniaxial o biaxial) y determinar su signo óptico, que se define según las diferencias entre los valores de los índices de refracción principales del cristal.
	Color	Ángulo de extinción	Ángulo 2V
	Ocurre debido a la absorción selectiva del cristal de determinadas longitudes de onda de luz blanca.	Ángulo formado en un mineral en determinadas direcciones cristalográficas (caras, exfoliación y maclas) con sus direcciones ópticas de vibración.	Ángulo que forman los dos ejes ópticos en cristales biaxiales; pudiendo variar en algunas sustancias de modo significativo con la longitud de onda de la luz incidente (dispersión).
Pleocroismo	Signo de elongación		
Variación de tonalidad o intensidad de color que puede experimentar un cristal al girar la platina del microscopio.	Relación entre las diferentes direcciones de índices de refracción de un mineral con su alargamiento morfológico.		
	Color de interferencia		
	Color que presenta un cristal anisótropo, entre polarizadores cruzados, como consecuencia de la interferencia y transmisión por el analizador de las dos ondas luminosas en que divide el cristal a la onda incidente.		

Sin embargo, hay minerales opacos aún en secciones muy delgadas, tales como los sulfuros y óxidos principalmente, siendo necesario para su identificación el microscopio mineragráfico ^[17]. Este incide luz polarizada perpendicularmente reflejándose sobre la superficie de los minerales en muestras con un pulido espejo; haciendo uso de las propiedades principales tales como: la reflectancia, que es el porcentaje de la luz incidente que es reflejada por la superficie pulida del mineral; color de reflexión y pleocroísmo de reflexión que es la variación del color al girar la platina sin el analizador colocado; anisotropía, que es la existencia y variación de color con los polarizadores cruzados; dureza al pulido, observado en la existencia de relieve; y presencia de reflexiones internas en el cristal, observadas como manchas difusas por minerales que no son completamente opacos y en los que la luz penetra por debajo de la superficie y es luego reflejada.

3.1.2. Preparación de láminas delgadas

Las muestras utilizadas en la elaboración de las láminas delgadas son cortadas en forma de rectángulo con dimensiones aproximadas de 2.5 x 4.5 cm, utilizando cortadoras de disco con polvo de diamante. Posteriormente, son unidas con un pegamento especial a un porta objetos como se observa en la Figura 3.2; una vez pegadas, es usada una cortadora compacta que permite reducir el grosor de la muestra a uno más sencillo para su pulido; después, pasando por otro equipo con una lija en disco que permite disminuir el espesor de la muestra lo más posible. Finalmente, la lámina delgada pasa por un proceso manual de devastación haciendo uso de abrasivos de mallas elevadas, donde en este caso por ser un material blando, utilizando un abrasivo del número 1000, hasta darle a la lámina delgada un espesor suficiente para que pueda pasar la luz de forma adecuada permitiendo la identificación de minerales al microscopio polarizado.



Figura 3.2 Ejemplo de lámina delgada empleadas en el análisis petrográfico [19].

3.2. DRX

La difracción de Rayos X es una técnica con importantes aplicaciones en el campo de la mineralogía y de los materiales sólidos, debido a que hace posible identificar el sistema cristalino y composición del material estudiado; permitiendo la caracterización de las rocas sin importar su génesis, ya que cada mineral presenta una estructura cristalográfica propia, produciendo un patrón único. Esta técnica hace posible el conocer la composición mineralógica de una roca que se encuentre en concentraciones mayores al 1% en peso, proporcionando información adicional a la observada en los análisis petrográficos [20].

El equipo utiliza la radiación X que tiene su banda de frecuencias entre la radiación ultravioleta y la de los rayos γ ; esta se produce cuando una partícula de masa pequeña, pero con elevada energía cinética incide en un material, esta colisión produce perturbación en la materia causando que parte de la energía produzca radiación X.

Por definición, la difracción ocurre cuando la radiación interactúa con una estructura regular cuya repetición en distancias es casi la misma que la longitud de onda de la radiación incidente; por lo que los minerales al ser materiales sólidos cristalinos con estructuras atómicas que se repiten constantemente pueden difractar a los rayos X (véase Figura 3.3).

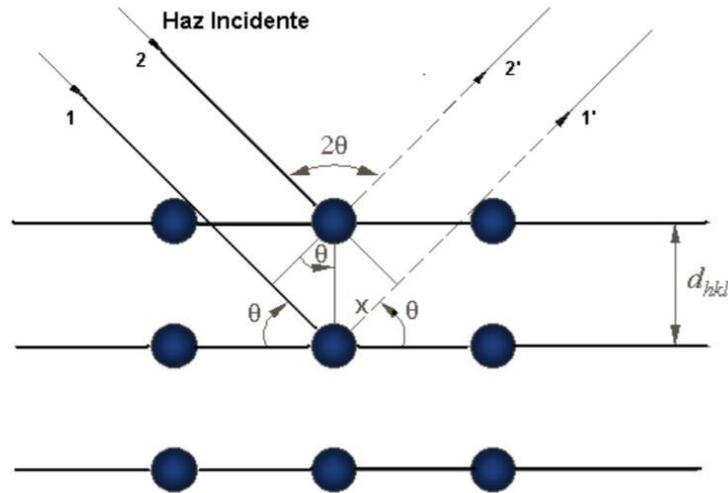


Figura 3.3. Reflexión de un haz de rayos X por los planos (d_{hkl}) de un cristal [20].

Cuando el haz de rayos X es difractado en un sólido cristalino cumpliendo con ciertas condiciones geométricas, puede presentar interferencia constructiva, representándose como picos máximos en los difractogramas. La técnica se basa en los estudios de Bragg sobre la difracción de los rayos X, quien señaló los siguientes factores:

1. La distancia similar entre planos en un material cristalino es la distancia interplanar (d), medida en Angstrom (Å).
2. El ángulo de difracción θ es medido en grados. Por razones prácticas, el ángulo del haz difractado no se mide respecto al plano de la muestra, sino con respecto al haz transmitido por lo que el eje x que es en realidad 2θ .
3. La longitud de onda de la radiación X incidente, representada por λ ; que para el caso de un blanco de cobre es igual a 1.54 Å .

Bragg señaló que la difracción de rayos X puede ser vista como un proceso similar a la reflexión de planos de átomos en un cristal; los cristales son iluminados en un ángulo θ y los rayos X son desviados con un ángulo también igual a θ ; cumpliéndose la Ecuación 3.1 donde λ es la longitud del rayo X y d_{hkl} distancia interplanar.

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2d_{hkl}} \text{-----(3.1)}$$

Por lo que, la ley de Bragg supone los siguientes principios:

- 1) La desviación del rayo $=2\theta$
- 2) La diferencia de la trayectoria es $2x = 2d_{hkl} \sin \theta$
- 3) La condición para que ocurra interferencia constructiva es $n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$

Para este análisis es necesario que la muestra se encuentre pulverizadas, para esto es utilizado un mortero de porcelana para las muestras duras y posteriormente un mortero de pequeño tamaño de ágata cuando se encuentre el polvo más fino, en este mortero se le debe dar un acabado homogéneo de granulometría parecida al talco. Las muestras deben cumplir con esta característica para poder realizar un análisis confiable.

3.3. Microscopía Electrónica de Barrido/ Espectroscopia de Dispersión de Rayos X (SEM/EDS)

La técnica de Microscopia electrónica de barrido o SEM (por sus siglas en inglés *Scanning Electron Microscope*) permite el análisis superficial de las muestras orgánicas o inorgánicas, proporcionando información sobre las características y morfología del material. La implementación de este equipo en la caracterización de los materiales ha permitido una mayor comprensión de los mismos, levantando las limitaciones ópticas de los microscopios de luz polarizada ya que utiliza otras radiaciones diferentes a la luz visible para formar la imagen, permitiendo mayores aumentos.

El microscopio electrónico de barrido (véase Figura 3.4) emite un haz electrónico de alta energía que atraviesa la columna y llega a la muestra, donde un generador de barrido realiza un desplazamiento del haz de punto a punto (scanning) barriendo la superficie deseada a observar. El resultado de esta interacción entre los electrones incidentes con los átomos que componen la muestra se generan señales, que son captadas por detectores correspondientes a

cada una de ellas. De igual manera, los electrones secundarios de baja energía (<50 eV) emitidos de la superficie de la muestra son utilizados para generar un tipo de imagen; es necesario para los materiales poco o no conductores, que sean recubiertos con una pequeña capa de oro que facilite esta emisión de electrones ^[21].

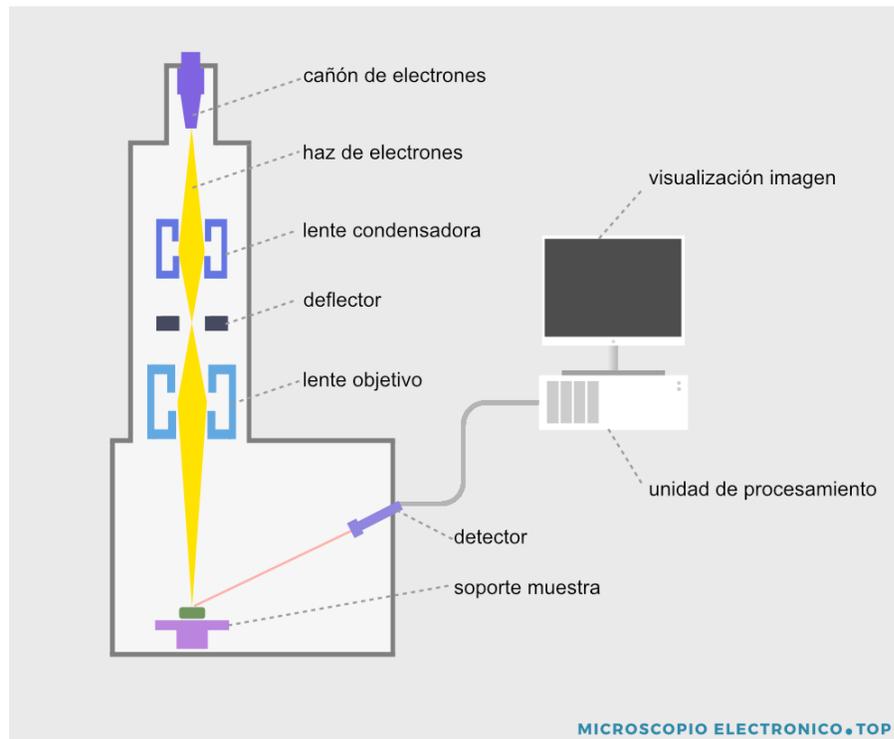


Figura 3.4. Partes del microscopio electrónico de barrido ^[21].

La generación de la imagen observable en el microscopio electrónico de barrido es esencialmente distinta a la observable en el microscopio de luz polarizada; entonces, la técnica de SEM no forma una imagen real del objeto, sino que construye una imagen virtual a partir de alguna de las señales emitidas por la muestra, ya que esta es visualizada en un tubo de rayos catódicos donde bobinas de deflexión del haz están sincronizadas con el barrido del haz de electrones en el microscopio, que modulando la intensidad del haz del tubo de rayos catódicos es obtenido un registro de punto a punto en la pantalla, generando una imagen electrónica y finalmente visualizada en un monitor.

La Figura 3.4 muestra las imágenes observadas para una muestra de roca calcárea proveniente del estuco de Calakmul, Campecha México ^[22]. La Figura 3.4a muestra la micrografía obtenida por luz transmitida y polarizada, donde se observa la matriz calcárea consistente de la micrita (identificada como 2 y microesparita (identificada como 1). La Figura 3.4b muestra la misma muestra observada por SEM; donde se puede apreciar a detalle la morfología de las fases; la matriz se distingue como partículas de forma romboidal que corresponden a la microesparita (fase 1) mientras que otras formas sin patrón y de cantos angulosos podrían ser líticas muy finos (fase 2) que no son apreciados en la micrografía de luz transmitida y polarizada ^[22].

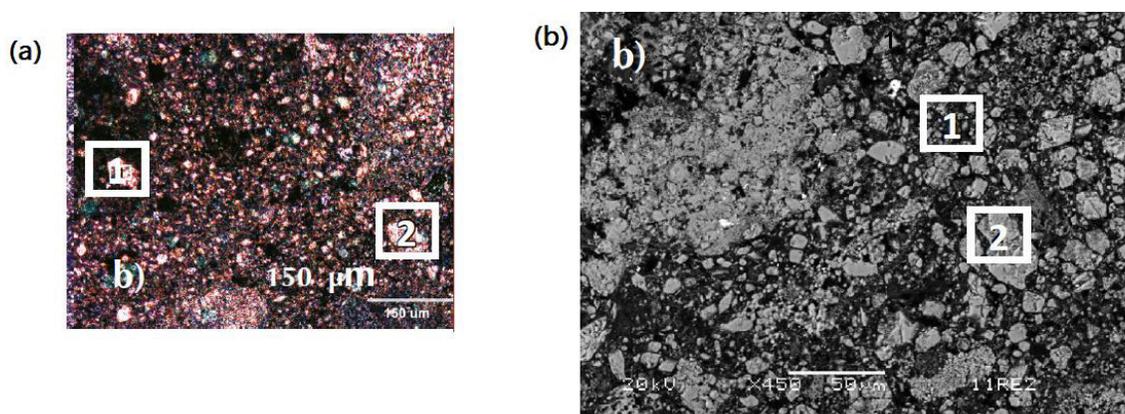


Figura 3.5 Diferencia entre micrografías de matriz de una matriz calcárea (a) microscopía óptica (b) SEM ^[22].

Las muestras a analizar por SEM requieren un recubrimiento delgado de un material que les ayude a mejorar su conductividad como anteriormente se ha indicado. Posteriormente, es tomada una pequeña porción de la muestra recubierta, pudiendo ser polvo o un fragmento pequeño de la misma que se sujeta al porta objetos que es colocado dentro del equipo, esto para evitar que el vacío que es producido por el equipo mueva la muestra colocada.

3.4. Espectroscopía de Fluorescencia de rayos X

La técnica de Espectroscopía de Fluorescencia es un método analítico que permite hacer mediciones cuantitativas de los contenidos moleculares de sustancias minerales, y de otros productos; esto permite conocer los valores de composición de una roca y presentado también

otra gran variedad de usos que van desde la determinación de metales traza en el ambiente a mediciones de pH en células completas bajo condiciones fisiológicas. Esta técnica es ampliamente utilizada debido a su alto nivel de sensibilidad que puede llegar hasta las partes por billón.

Por definición la fluorescencia es un proceso en el cual radiación electromagnética es emitida a las moléculas, excitándolas y relajándolas a su estado fundamental, liberando su exceso de energía en forma de fotones (véase Figura 3.5). Al proceso de excitación con otra radiación X se le denomina excitación secundaria y la radiación X producida por excitación de otra radiación X se denomina radiación X secundaria o radiación de fluorescencia. Es la radiación X secundaria característica la que se utiliza para el análisis químico en los espectrómetros de fluorescencia de rayos X [23].

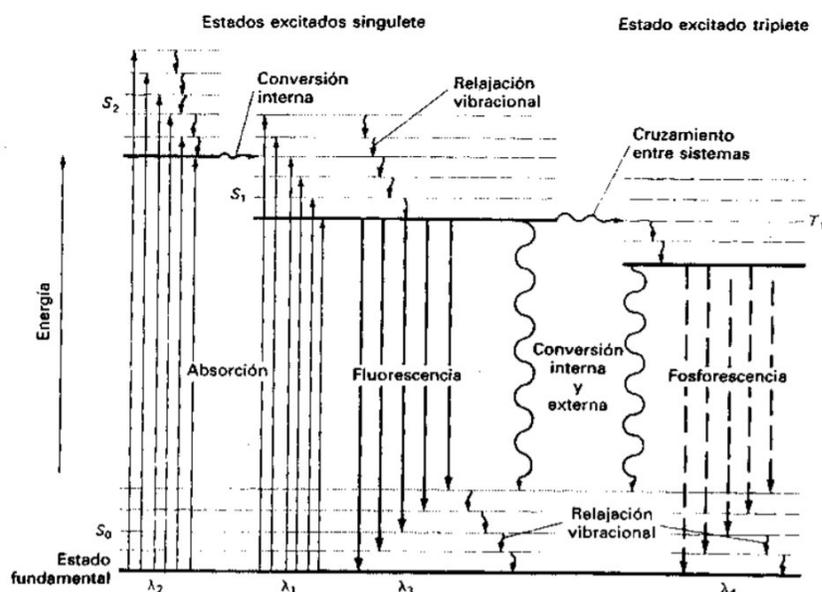


Figura 3.6. Diagrama parcial de energía para un sistema fotoluminiscente. Tomada de un seminario impartido por la Universidad de Granada.

Entonces, cuando una molécula se encuentra en estado fundamental o basal y es excitada por radiación; los electrones internos saltan a un estado excitado y regresan a estados de energía diferente al basal inicial; debido a que liberan energía por procesos de relajación a través de dos importantes mecanismos que son la relajación no radiante y la conversión interna.

La primera ocurre durante las colisiones entre moléculas excitadas y las moléculas del disolvente, debido a que el exceso de energía vibracional es transferido a las moléculas del disolvente en etapas, causando un ligero aumento de la temperatura del medio y el segundo puede ocurrir entre el nivel vibracional inferior de un estado electrónico excitado y el nivel vibracional superior de otro estado electrónico ^[23].

Otro proceso de relajación es la fluorescencia, esta ocurre al liberarse bandas de radiación producidas cuando las moléculas fluorescen debido a que las moléculas electrónicamente excitadas se pueden relajar a cualquiera de los estados vibracionales del estado electrónico fundamental. Sin embargo, la fotoluminiscencia no ocurre en todos los sistemas con ciertas características estructurales y ambientales.

Las bandas de fluorescencia molecular se forman principalmente de longitudes de onda mayores que la banda de radiación responsable de su excitación (desplazamiento de Stokes). Sin embargo, en los casos en que la radiación absorbida es emitida sin cambio de longitud de onda (radiación de resonancia o resonancia fluorescente), el espectro de excitación, y el espectro de emisión (fluorescencia) de un compuesto frecuentemente aparece como una imagen especular de uno a otro con una sobreposición que ocurre en la línea de resonancia ^[23].

A diferencia de la difracción de rayos X, la espectroscopía de fluorescencia de rayos X no se basa en medir el valor del ángulo 2θ al que se difracta cada una de las radiaciones que constituyen el espectro emitido por la muestra, sino más bien, en el análisis de la medida de la intensidad de las longitudes de onda, proporcionándonos la composición cuantitativa del material. Por lo que, el espectrofotómetro de fluorescencia presenta el arreglo indicado en la Figura 3.6; que consta de un generador de rayos X que son incididos sobre la muestra. En esta técnica no se registra el patrón de difracción observado en los rayos X; sino más bien la energía liberada por la emisión de fluorescencia de los electrones internos.

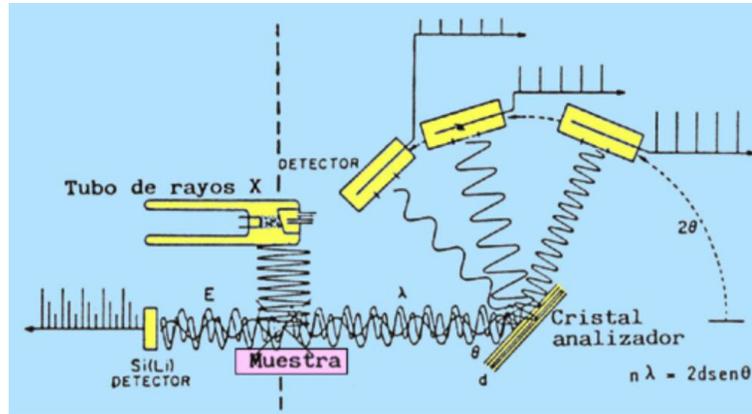


Figura 3.7. Esquema de un espectrómetro de fluorescencia de rayos X clásico o espectrómetro de rayos X de dispersión de longitudes de onda ^[24].

Entonces, debido a que la energía para excitar los electrones internos de cada elemento es única; la medición de esta energía representa una huella digital que permite la identificación y cuantificación de cada elemento presente en la muestra. La Figura 3.7 muestra ejemplos de espectros de fluorescencia observados para diferentes minerales; donde cada pico observado a una energía específica (KeV) corresponde a la excitación de un elemento específico; por ejemplo, el calcio requiere 3.8 KeV.

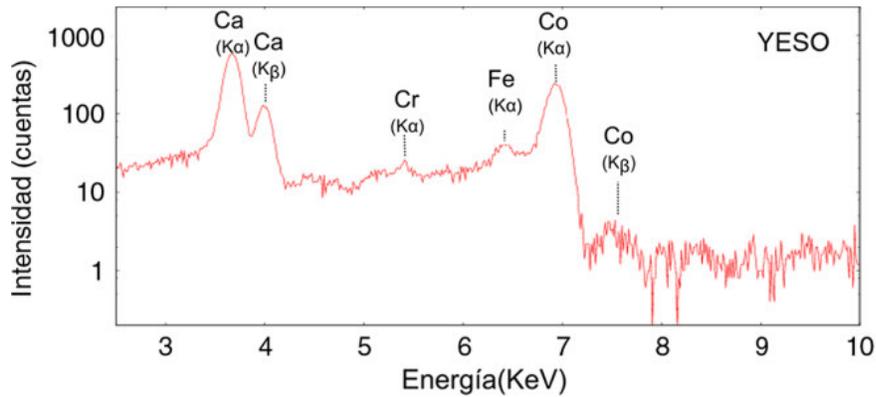


Figura 3.8. Fluorescencia de rayos X de minerales hidratados. donde señalan que las señales de Co se deben a la fuente de rayos X y no a que este elemento esté presente en las muestras ^[24b].

Existen ciertas condiciones que pueden afectar a la fluorescencia, las cuales se listan a continuación:

1. El rendimiento cuántico; el cuál se define como la relación entre el número de moléculas que emiten fluorescencia respecto al número total de moléculas excitadas.
2. La estructura; los compuestas que contienen grupos funcionales aromáticos, estructuras alifáticas y alicíclicas de carbonilo o estructuras de doble enlace muy conjugados son aquellos que presentan fluorescencia.
3. La rigidez estructural favorece a la fluorescencia.
4. La temperatura y disolvente; la eficiencia cuántica disminuye con el aumento de la temperatura y una disminución en la viscosidad del disolvente.
5. El efecto del pH en la muestra; la fluorescencia de un compuesto aromático con sustituyentes ácidos o básicos en el anillo depende normalmente del pH.
6. El efecto de la concentración; esta se relaciona con la potencia de la radiación fluorescente y la eficacia cuántica del proceso de fluorescencia.

El proceso de preparación de la muestra es igual al descrito para la difracción de rayos X, requiere una pequeña porción de muestra molida a mallas 100 de forma homogénea, esto en búsqueda de un resultado confiable del método.

4. PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas son la respuesta física que tiene un material cuando es expuesto a cargas externas. Entonces, estas propiedades son el resultado de ensayos simples que idealizan las posibles formas en cómo puede actuar una carga o fuerza en el material. Para entender, estas propiedades primero definiremos dos conceptos básicos que son: Esfuerzo y Deformación.

El Esfuerzo promedio es la capacidad que tiene un material para distribuir la fuerza aplicada en un área específica (véase Figura 4.1a) propiedad que es cuantificada y se determina de acuerdo con la Ecuación 4.1; donde σ es el esfuerzo, F la fuerza aplicada y A el área. Por su parte la deformación promedio unitaria (véase Figura 4.1b) refiere al cambio de longitud generada en el material cuando se le aplica una carga; al cambio de longitud se le conoce como desplazamiento (δ) y este se refiere con respecto a la longitud inicial del elemento sin carga. La deformación se cuantifica con la Ecuación 4.2; donde ϵ denota deformación, L_0 longitud inicial, L_f longitud final.

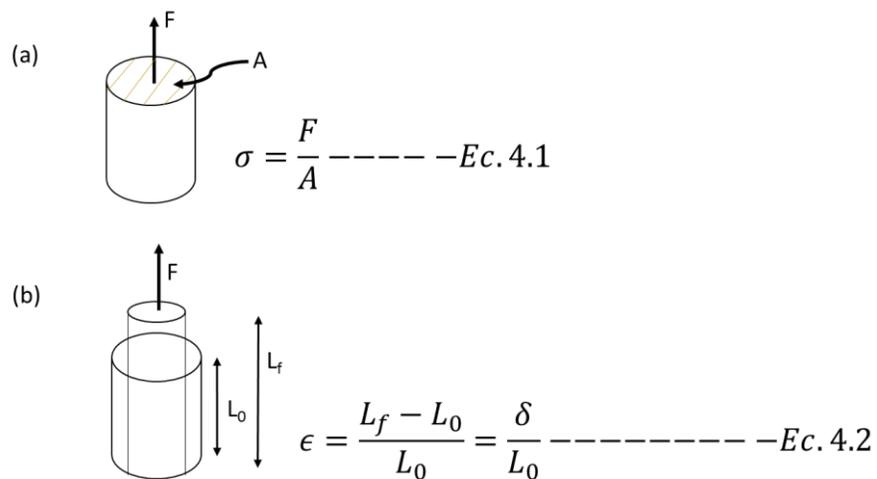


Figura 4.1 (a) Esfuerzo promedio (b) Deformación promedio unitaria.

Entonces, las propiedades mecánicas de un material se determinan de acuerdo a como actúa la fuerza sobre el material; por lo que se generan diferentes tipos de ensayos, los cuales se resumen en la Tabla 4.1. Los procedimientos realizados para cada tipo de ensayo son variados y por ello deben ser realizados bajo normas establecidas por organismos internacionales como son la ASTM (por sus siglas en inglés *American Society for testing and Materials*) [25].

Tabla 4.1. Tipos de ensayos y normas ASTM correspondientes [25].

Tipo de Ensayo	Norma ASTM
Tracción en superficies de concreto	C135
Tracción, materiales metálicos	E8M
Tracción, compuestos de matriz metálica	D3552
Tracción, compuestos matriz polimérica	D4762
Tracción, fibras textiles sencillas	D3822
Compresión, metales	E209
Compresión, cerámicas de fibra reforzada	WK3484
Compresión, concreto	C116
Compresión, compuestos	D3410
Ensayo de plegado, cerámicas	C1421
Dureza Brinell	E10
Dureza Rockwell	E18
Fluencia, cerámica	C1291
Fractura de fluencia, metales	E139
Crecimiento de grieta por fluencia, metales	E1457
Impacto Izod, plásticos mellados	D256
Impacto Charpy, plásticos mellados	D6110
Prueba de fatiga en materiales homogéneos	E606

4.1. Ensayo de Fuerza Normal: Tracción y Compresión

Entre los ensayos mecánicos, los de tracción y compresión son aquellos que permiten determinar una gran variedad de propiedades de los materiales. Estas pruebas se realizan en una máquina universal (véase Figura 4.2a) la cual es un dispositivo con controles, que para cada desplazamiento registrado se mide la fuerza interna generada en el material de prueba; esto se realiza hasta que el material sea roto. Los ensayos de tracción y compresión son ensayos donde la fuerza actúa perpendicular a el área, es decir se genera un esfuerzo normal (Figura 4.2b) la diferencia entre ellos es el sentido en el que actúa ésta; para tracción la Fuerza sale del elemento; mientras que en compresión ésta entra.

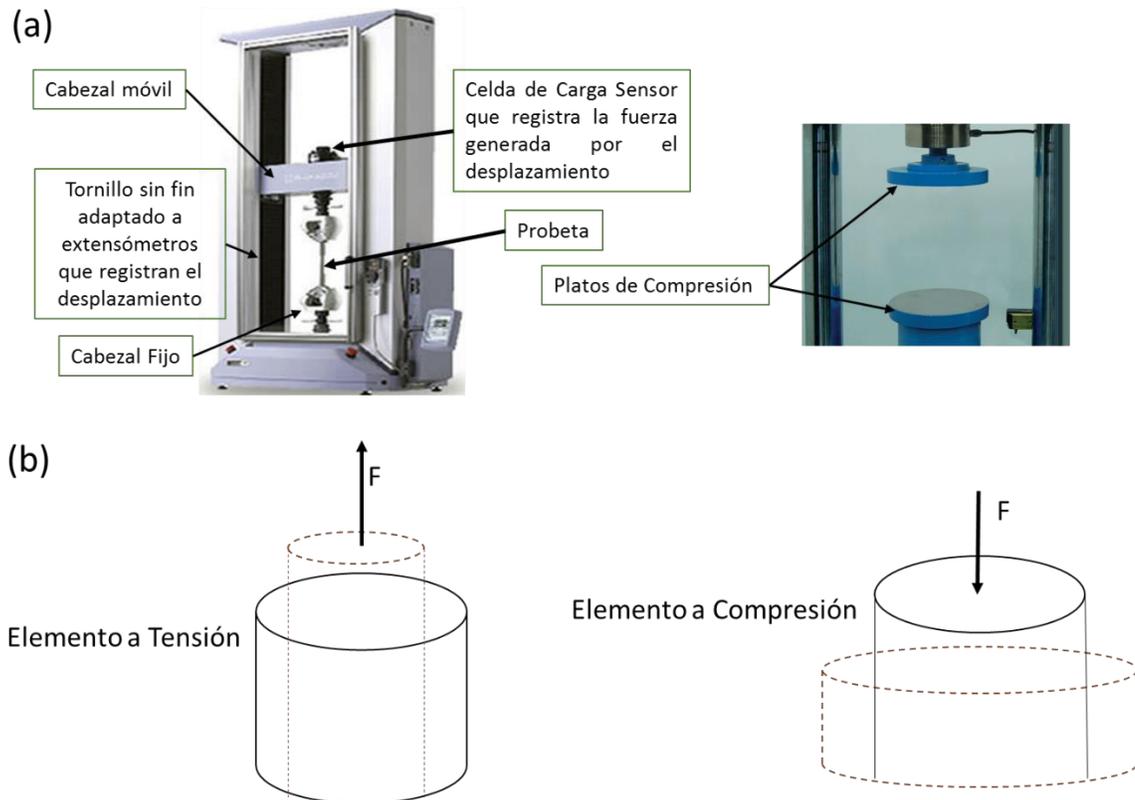


Figura 4.2 Ensayos de Fuerza normal (a) Máquina Universal (b) Polaridad de Fuerza.

En estos ensayos, el material se asegura entre un par abrazaderas (tenazas para tensión y platos en compresión) entonces, la abrazadera superior es móvil y se conecta a la celda de carga; quien es el sensor que registra la fuerza generada por el desplazamiento. Los resultados

obtenidos son un registro de fuerza y desplazamiento con los que se calcula el esfuerzo promedio normal (Ec. 4.1) y la deformación unitaria promedio (Ec. 4.2) que son graficados en la curva esfuerzo-deformación.

La Figura 4.3a muestra un ejemplo de la curva esfuerzo-deformación; la cual se divide en dos zonas: La primera (señalada con color verde) se conoce como zona de deformación elástica y en ella la deformación no es permanente, por lo que al liberar la carga que ocasiona la deformación el material recupera sus dimensiones iniciales. En esta zona el material se comporta obedeciendo la ley de Hooke (Ec. 4.3) la cual indica que el esfuerzo aplicado es proporcional a la deformación; siendo la constante de proporcionalidad el módulo de Hooke o también conocido como módulo elástico, E. Dicho módulo se refiere a la rigidez de un material; a mayor valor de E se tienen materiales más rígidos [27].

$$\sigma = E\varepsilon \text{ --- Ec. 4.3}$$

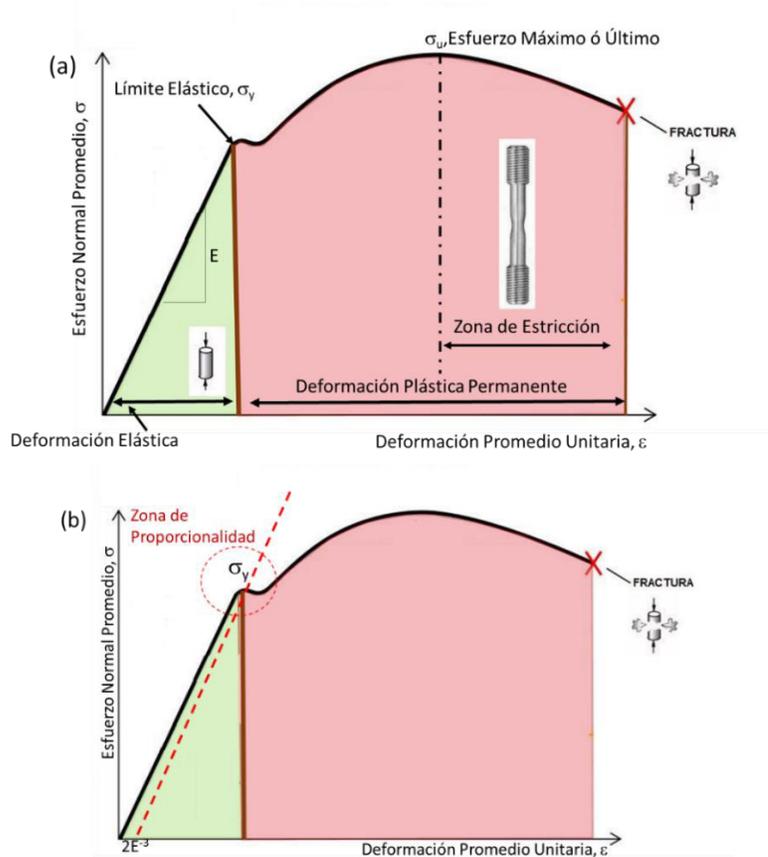


Figura 4.3 (a) Curva Esfuerzo-Deformación (b) Determinación del límite elástico.

En la segunda zona el material presenta deformación plástica o permanente; el cambio del comportamiento elástico a plástico es determinado por el esfuerzo de cedencia, también conocido como fluencia y/o límite elástico (σ_y). El cambio de comportamiento no sucede en un punto específico; si no en una zona que es conocida como zona de proporcionalidad (Figura 4.3b, remarcada con círculo rojo) entonces, para definir esta propiedad con un solo valor (propiedad puntual) el σ_y se mide como el esfuerzo observado a un $\% \epsilon$ de 0.2 ($\epsilon=2E^{-3}$) con la misma pendiente observada para la zona elástica (línea punteada roja de la Figura 4.3b) [27].

El límite elástico es la propiedad mecánica más importantes de los materiales ya que establece el punto donde el material comienza a presentar deformación plástica; entonces, para poder grabar una forma específica en un material (proceso de manufactura) es necesario que este se trabaje con valores de esfuerzos superiores al σ_y . La zona de deformación plástica se divide en dos comportamientos diferentes, que son identificados con el esfuerzo máximo del material o esfuerzo último (σ_u). El σ_u es el punto de falla del material, es decir refiere a la resistencia máxima del material y después de este valor los materiales comienzan el proceso de fractura.

Así bien, los materiales dúctiles comienzan a romperse lentamente generando la zona de estricción; ésta también se le conoce como zona de formación de cuello de botella. El cual se forma debido a una reducción drástica en el diámetro de la probeta; ocasionado por la deformación plástica, lo anterior va ocurriendo hasta alcanzar la fractura total del material. Sin embargo, como puede observarse en la Figura 4.4 existen materiales que presentan comportamiento elástico-plástico pero cuya fractura es frágil ya que no presentan capacidad para formar zona de estricción; estos son los plásticos frágiles. Por otra parte, los cerámicos son materiales frágiles que no pueden deformarse plásticamente; entonces, ellos rompen al alcanzar su resistencia máxima que es el límite elástico ($\sigma_y=\sigma_u$).

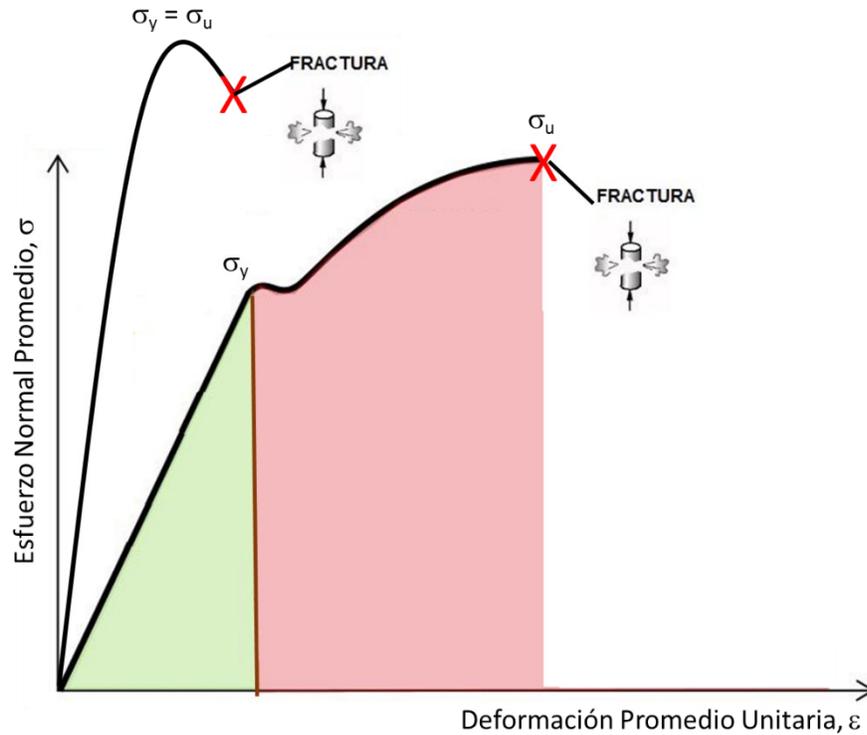
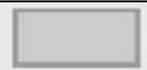


Figura 4.4 Curva esfuerzo-deformación para materiales frágiles.

4.2. Deformaciones en Compresión

En particular, en el ensayo de compresión la deformación observada en los materiales se ve modificada de acuerdo con la geometría de la probeta y la ductilidad de ésta. La Tabla 4.2 indica los tipos de deformación; los cuales dependen del valor de relación de compresión que para probetas cilíndricas es la relación de la longitud con el diámetro (L/D). Para observar una compresión homogénea en materiales dúctiles como los metales se requiere una relación de compresión de 2; mientras que una compresión curvada, una $L/D > 5$. En esta deformación ocurre en la probeta tanto compresión como flexión, es por ello que el material se dobla durante el proceso de compresión.

Tabla 4.2. Tipos de deformación en compresión ^[25].

Modo de Deformación	Forma Resultante	Relación de Compresión
Curveada		$L/D < 5$
De corte		$2.5 < L/D < 5$
De doble barril		Hay fricción al contacto con la superficie; $L/D > 2$
De barril		Hay fricción al contacto con la superficie; $L/D < 2$
Compresión homogénea		$L/D < 2$
Inestabilidad de compresión		

Entonces, se considera como una buena relación de compresión el valor de $L/D=2$, ya que con ella se promueve la compresión homogénea en el material. Sin embargo, de acuerdo con el comportamiento del mismo se pueden observar dos tipos de fractura principalmente, véase Figura 4.5. La fractura frágil es observada en vidrios, cementos, hormigón, materiales pétreos, entre otros; en este proceso la carga se aplica en el material hasta alcanzar un máximo de esfuerzo normal que genera una ruptura o desgarres provocando la falla del material. Entonces, la curva esfuerzo-deformación en compresión es la misma que la observada para este tipo de materiales en tensión, el material rompe a una resistencia máxima que es $\sigma_u = \sigma_y$ (Figura 4.5a). Sin embargo, el valor de la resistencia es muy diferente, los cerámicos presentan una elevada resistencia a la compresión y muy baja resistencia a la tensión.

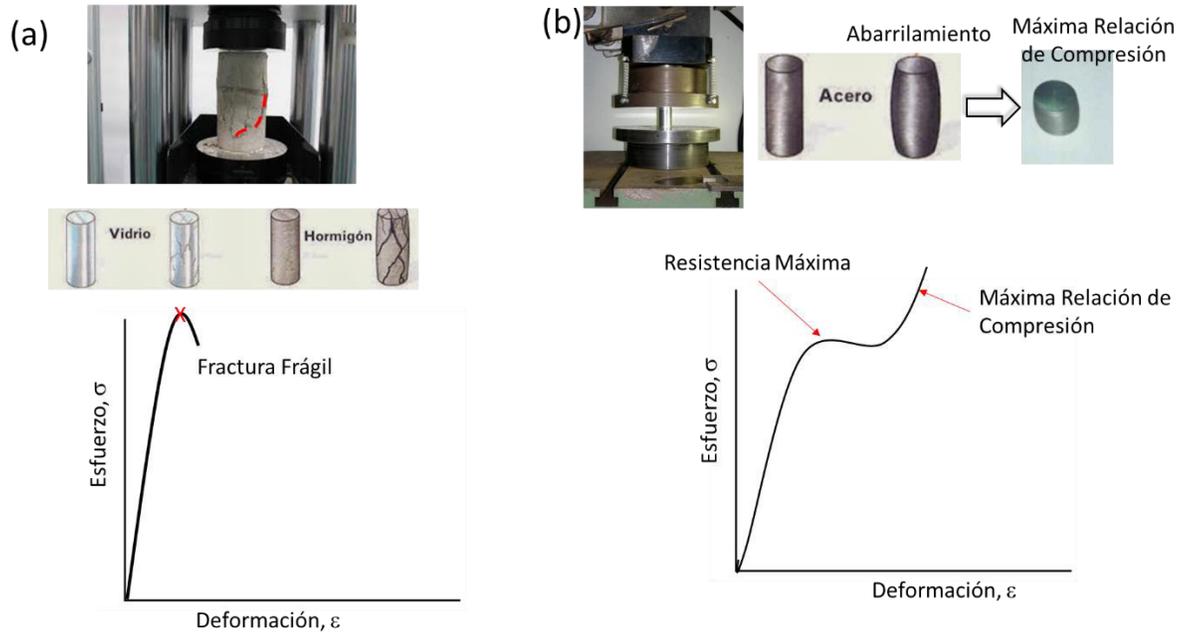


Figura 4.5 Tipos de fractura en compresión (a) material frágil (b) material dúctil.

El otro tipo de falla corresponde a la fractura o falla dúctil; ésta se observa en los metales y en ella se genera la deformación tipo barril, entonces conforme se incrementa el esfuerzo interno el material se abarrila hasta alcanzar una resistencia máxima y después truena; o bien, si es un material muy dúctil como los metales, el metal sigue comprimiéndose hasta lograr una relación máxima de compresión (formar una moneda); sin embargo, este esfuerzo no se considera como la resistencia a la compresión ya que en ella solo se está promoviendo la deformación por abarrilamiento.

4.3. Ensayo de Dureza

La dureza es la resistencia de la superficie de un material a la penetración de un objeto duro y se relaciona con la resistencia al desgaste de los materiales. Entonces, el ensayo se realiza en equipos conocidos como durómetro universal (Figura 4.6a) el cual imprime el indentador en la superficie de la muestra con una carga predeterminada. La dureza se mide de acuerdo al tamaño o marca que deja el indentador; para la dureza Vickers el indentador es prismático dejando como huella una marca romboédrica (Figura 4.6b). Este ensayo se realiza

de acuerdo con la norma ASTM E92-82; entonces, dicha norma establece que el cálculo de la dureza Vickers (VH) se realiza de acuerdo con la Ecuación 4.4, donde P denota la carga en kg_f, y d se calcula como el promedio de las diagonales de la marca (Ecuación 4.5). Las cargas recomendadas para aplicar en este ensayo varían entre 1 kg_f hasta 120 kg_f por periodos de 10 a 15 s [28].

$$HV = \frac{2P \sin(\alpha/2)}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2} \text{-----Ec. 4.4}$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{-----Ec. 4.5}$$

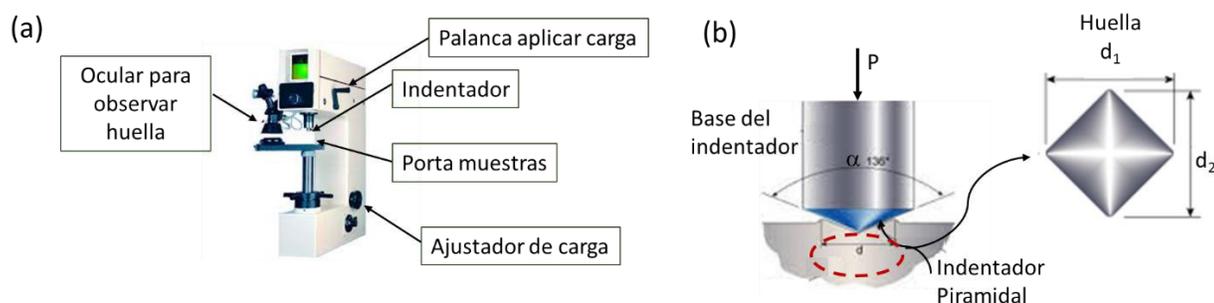


Figura 4.6. Ensayo de dureza (a) Durómetro Universal (b) Huella Vickers.

El ensayo Vickers es uno de los más empleados para caracterizar los materiales ya que puede medirse en materiales con dureza elevada hasta materiales muy blandos. La Tabla 4.3 indica los tipos de dureza Vickers que existen; las cuales se clasifican en función de la carga aplicada que va desde los 100 kg_f como máxima hasta 1 kg_f.

Tabla 4.3 Tipo de Durezas Vickers.

	Intervalo de HV	Carga Aplicada, (kg_f)
Macro Dureza	5 < HV < 100	49-989
Baja Dureza	0.2 < VH < 5	1.96-49
Microdureza	0.2 < HV	<1.96

4.4. Nanoindentación: Microdureza

La Nanoindentación (NIIT) es una técnica de caracterización que se aplica para determinar propiedades mecánicas de los materiales a escala de las submicras. El principio de esta técnica es similar al de la dureza; la diferencia radica en que en la dureza se mide la deformación (huella impresa) generada por una carga aplicada; mientras que la NIIT implica un registro continuo del desplazamiento del indentador (profundidad) y de la carga aplicada (véase Figura 4.7a) ^[29].

La NIIT se mide con cargas muy bajas que van en el orden de los μN ; entonces, bajo estas condiciones los materiales van a actuar con un comportamiento totalmente elástico; por lo que la Ecuación 4.4, que supone que las diagonales después de la impresión (eliminación de la carga) permanecen constantes. Este supuesto no puede ser cumplido; ya que la profundidad o desplazamiento máximo alcanzado con una carga P , se ve modificado durante la descarga debido a la recuperación elástica; por lo que, durante el ensayo se registran los desplazamientos obtenidos durante un ciclo de carga-descarga (Figura 4.7b). Por lo tanto, la huella observada después del análisis es similar a la de una huella Vickers (Figura 4.7c) cuando el indentador usado es un prisma ^[29]. Los indentadores que son usados en NIIT tienen las mismas geometrías que los empleados en las escalas de macrodureza; estos pueden ser: esféricos, cilíndricos y piramidales.

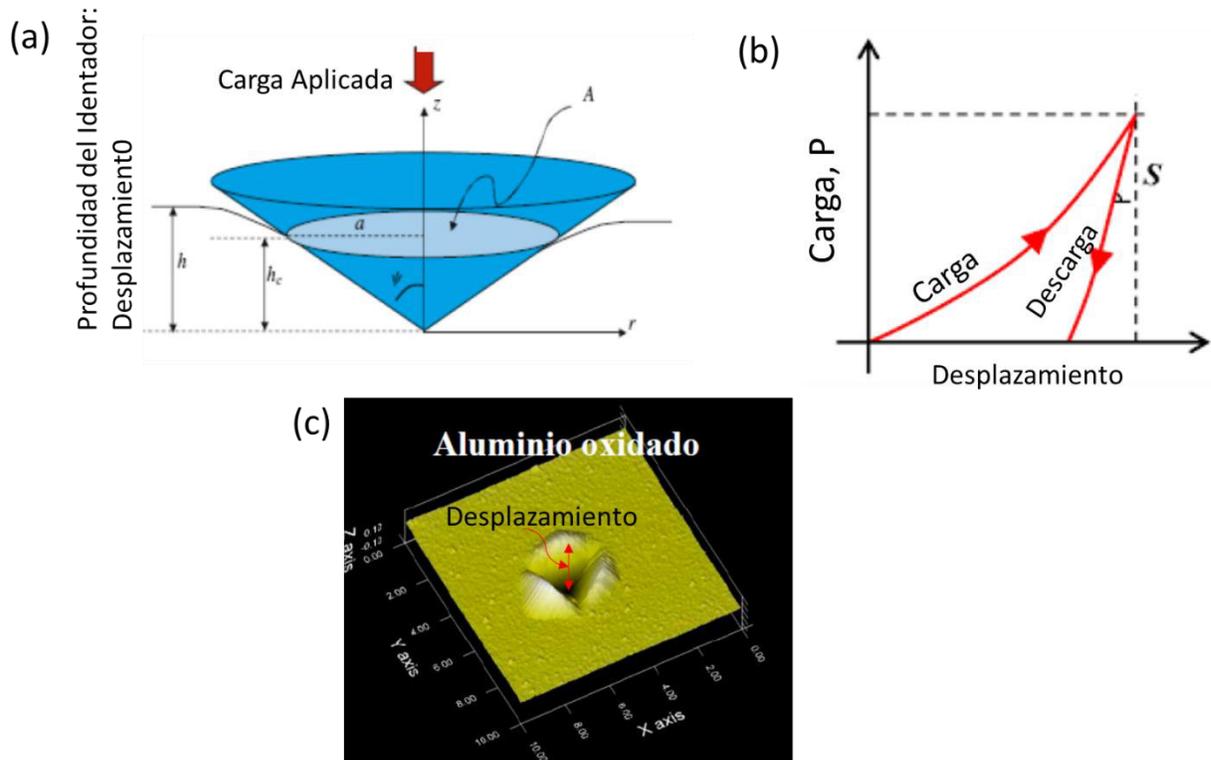


Figura 4.7. NIIT (a) Principio de Carga, formación de la huella (b) Curva Carga-Desplazamiento (c) Huella de NIIT ^[29].

En la nanoindentación se registra el desplazamiento del indentador (h) generado por una carga P conocida, ya que debido a que la carga es muy pequeña la huella generada también lo es y por ello medir diagonales o diámetros de huella resulta ser una tarea muy difícil que exige herramientas de microscopía fina. Esto provocó que si bien la técnica fue desarrollada afines de los 70s por Frohlich ^[30], no fue hasta 1992 cuando la NIIT fue popularizada a través del método de interpretación de datos que propusieron Oliver y Pahr ^[31].

El método de Oliver-Pahr permite determinar a través de la curva P - H propiedades de los materiales como son: La dureza, módulo de Young, resistencia máxima, entre otras. Este método supone que el indentador es cargado con una fuerza P desplazándose al interior del material (h) de manera que alcanza un valor máximo h_c ; después al eliminar la carga, éste se desplaza a una profundidad h_e (Figura 4.8 a) lo anterior debido a la recuperación elástica. Este fenómeno se traduce en gráficas Carga-Desplazamiento (P - h ; Figura 4.8b); donde se observa

que a P_{max} se registra un desplazamiento máximo (h_{max}) y al descargar se registrará un desplazamiento, h_f .

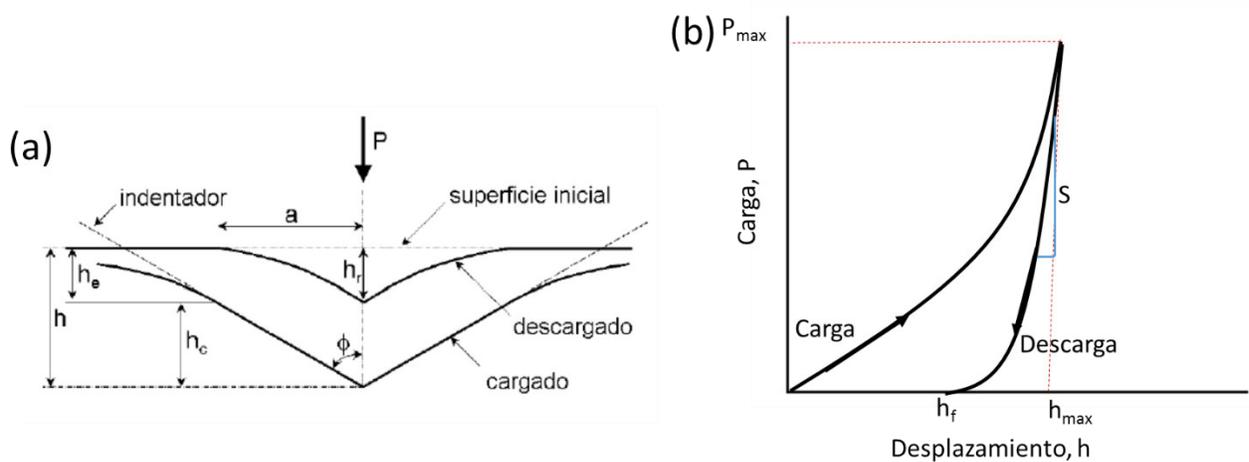


Figura 4.8 NIIT (a) proceso de indentación (b) Curva P-h [29].

Entonces, la profundidad de contacto (h_c) se determina de acuerdo con la Ecuación 4.6; donde ϵ es una constante que depende de la geometría del indentador; para punta prismática (Berkovich) o esférica es de 0.75 y para puntas cónica de 0.72 [32]. La variable S es la rigidez del material y se calcula con la Ecuación 4.7.

$$h_c = h_{max} - \epsilon \frac{P_{max}}{S} \text{ ----- Ec. 4.6}$$

$$S = \left(\frac{dP}{dh} \right)_{h=h_{max}} \text{ ----- Ec. 4.7}$$

Ahora bien, debido a que la dureza (H) se puede definir como la presión media que el material soporta durante la carga; esta propiedad se determina con la Ecuación 4.8; donde $A(h_c)$ es el área de contacto proyectada a carga máxima. El área de contacto, es determinada a través de una función polinomial (Ec. 4.9); donde C_i son constantes de cada material y se determinan de forma experimental.

$$H = \frac{P_{max}}{A(h_c)} \text{ ----- Ec. 4.8}$$

$$A(h) = \sum_{i=0}^8 C_{i-1} h^{2^{1-i}} = C_0 h^2 + C_1 h + C_2 h^{1/2} + \dots + C_8 h^{\frac{1}{128}} \text{ --- Ec. 4.9}$$

Otra de las propiedades que son determinados con el ensayo de NIIT, es el módulo elástico E; el cual se conoce como módulo elástico efectivo (E_{eff}) ya que durante el ensayo el comportamiento del material es elastoplástico (coexisten comportamiento elástico y plástico). Este módulo se determina con la Ecuación 4.10, donde β es una constante que depende de la geometría del indentador. Por otra parte, el E_{eff} también puede ser determinado a partir de propiedades del material y del indentador (Ecuación 4.11) donde E_i y ν_i son el módulo de Young y relación de Poisson para el indentador; mientras que E y ν corresponden al material de prueba.

$$E_{eff} = \frac{1}{\beta} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A(h_c)}} \text{ --- Ec. 4.10}$$

$$E_{eff} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \text{ --- Ec. 4.11}$$

5. METODOLOGÍA

El estudio realizado en este proyecto se elaboró en tres etapas, las cuales se indican en la Figura 5.1. Durante la primera etapa se realizó un muestreo representativo del sitio arqueológico y un afloramiento de material buscando conocer sus similitudes en sus propiedades para posible uso restaurativo y a la vez conocer si el material constructivo del sitio pudiese provenir de dicho afloramiento externo al sitio; la segunda etapa constó de la caracterización de las propiedades físicas, mecánicas, mineralógicas y químicas del material, donde se realizaron pruebas físicas para conocer la densidad y porosidad del material, pruebas mecánicas tales como ensayos de compresión y nanoindentación, técnicas petrográficas haciendo uso de láminas delgadas para identificación mineralógica, y técnicas químicas para conocer composición y morfología tales como Espectroscopia de Infrarrojo, Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS por sus siglas en inglés). En la tercera etapa se realizó la interpretación de los resultados obtenidos desarrollando el modelo de correlación entre propiedades mecánicas y composición química.

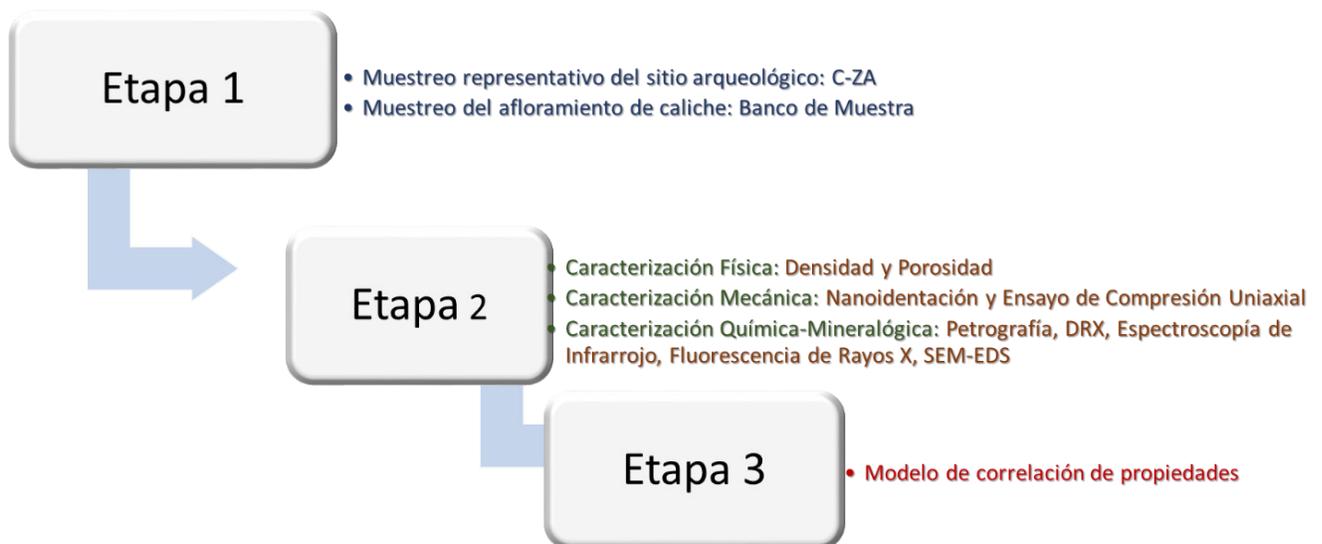


Figura 5.1. Metodología general empleada en el desarrollo del proyecto.

5.1. Toma de muestras en Sitio Arqueológico y afloramiento:

Se realizaron dos visitas al sitio arqueológico El Cerro de los Remedios en Comonfort, donde acompañados de los arqueólogos encargados del proyecto, se identificaron los sitios de interés a muestrear. Se tomaron muestras representativas de suficiente tamaño para la obtención de probetas y cubos a utilizar en las pruebas de caracterización, en total fueron tomadas 9 muestras de 5 ubicaciones distintas (véase Tabla 5.1). En una posterior visita, fue identificado un posible afloramiento de caliche ubicado en la comunidad de La Merced al sureste del sitio arqueológico. En la zona se encuentra un perfil estratigráfico expuesto gracias a una mina a tajo abierto abandonada donde se extraían materiales pétreos antiguamente; después de un recorrido de la zona, fueron identificados afloramientos de costras cementadas de carbonato de calcio, identificadas gracias a la reacción con el ácido clorhídrico (Figura 5.2), de esta zona se tomaron 20 muestras en total que fueron denominadas como Muestras Banco (véase tabla 5.1) de las cuales 3 resultaron de interés.

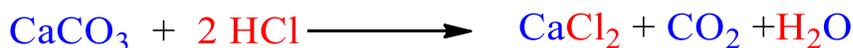


Figura 5.2. Prueba de Carbonato con Ácido Clorhídrico.

Tabla 5.1. Nomenclatura empleada para identificación de muestras.

Clave Muestras Sitio Arqueológico	Descripción (INAH)	Clave Muestras Banco de Material
C-ZA-1	CRA/E1/Alineamiento del Altar (IIIA)	MB-1
C-ZA-2	CRA/E1/Alineamiento Circular (III)	MB-2
C-ZA-3	CRA/E1/Plataforma Oriente (superficie)	MB-3
C-ZA-4	CRA/E1/ Plataforma Poniente (IIIA)	MB-4
C-ZA-5	CRA/E1/ Plataforma Poniente (IIIA)	MB-5
C-ZA-6-L	CRA/E2/Superficie Lajas	MB-6
C-ZA-7-L		MB-7
C-ZA-8-L		MB-8
C-ZA-9-L		MB-9
		MB-10

5.2. Caracterización Física: Densidad

Las pruebas de densidad fueron llevadas a cabo en 17 muestras, tomado como referencia la Norma European Standard UNE-EN 1936 (2006) ^[33]. Los especímenes utilizados en las pruebas tenían una forma prismática con dimensiones de 3cm x 3cm x 5cm. Las muestras fueron pesadas húmedas, saturadas y secas, y se calculó su volumen como el volumen desplazado. La densidad se calculó usando la relación entre la masa y el volumen de las muestras de acuerdo con la Ecuación 5.1. Donde m es la masa del espécimen seco en gramos; V_d es el volumen del líquido desplazado por la masa; prh es la densidad del agua en kilogramos por centímetro cúbico.

$$\rho = \frac{m}{V_d} (prh) \quad (\text{Ec. 5.1})$$

5.3. Caracterización Física: Absorción de Agua

Con los datos obtenidos en el cálculo de densidad se calculó el porcentaje de absorción de agua del caliche utilizando la relación entre el peso saturado ($P_{sat.}$) y el peso seco (P_{seco}) de la muestra, de acuerdo a la Ecuación 5.2; este ensayo se realizó de acuerdo con las recomendaciones de la norma AST C158-13 para la adsorción de agua en concreto hidráulico ^[34].

$$\%A = \left(\frac{P_{sat.} - P_{seco}}{P_{seco}} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

5.4. Caracterización Mecánica: Ensayo de Compresión Uniaxial

Los ensayos a la compresión simple fueron realizados para conocer el valor máximo de esfuerzo que puede resistir el material antes de fallar. Los ensayos fueron realizados en un total de 17 muestras haciendo por duplicado cada ensayo y estos fueron realizados de acuerdo con las recomendaciones de la Norma European Standard UNE-EN 1926 (2006) ^[35]. Las muestras utilizadas en los ensayos tenían una forma cúbica con dimensiones de 2cm x 2cm x 2cm, 3cm x 3cm x 3cm, 4 cm x 4cm x 4cm y 5cm x 5cm x 5cm, esto debido a la limitante de cantidad de muestras posibles a extraer del sitio arqueológico. Antes de ser ensayados, se midieron y pesaron los cubos haciendo uso de un vernier y báscula digital. El equipo empleado

fue una máquina universal SHIMADZU serie AGS-X (Figura 5.3) con un límite de carga de 300 kN; los ensayos se realizaron empleando una velocidad de desplazamiento de 5 mm/min hasta llegar al punto de falla del material.



Figura 5.3 Máquina Universal Shimadzu AGD-X.

5.5. Caracterización Mecánica: Nanoindentación

La nanoindentación fue realizada para conocer la microdureza del material, buscando analizar la resistencia mecánica de cada fase mineral presente en el caliche; para ello fueron utilizadas las láminas delgadas elaboradas para el análisis petrográfico. Los ensayos fueron realizados en 4 láminas delgadas correspondientes a las muestras del sitio arqueológico (C-ZA) y 2 correspondientes a las muestras de banco. Los ensayos se realizaron en el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional en un equipo CSM (Figura 5.4) que cuenta con 3 puntas de indentación disponibles, de las cuales fue utilizada la Vickers con un índice de penetración de 10 Hz. La carga aplicada lineal máxima fue de 10 mN y 50 mN con un índice de carga de 20 mN/min con una pausa a los 10 segundos.



Figura 5.4. Instrumento CSM de ensayos de Nanoindentación.

5.6. Caracterización Química-Mineralógica: Petrográfica

Se fraccionaron las muestras haciendo uso de una maquina Tilematic Cortadora de Núcleo con un disco de diamante dentado de 12 pulgadas (véase figura 5.5) identificando las áreas de interés que deberían ser observadas al microscopio, aquellas porciones fueron las seleccionadas para realizar las láminas delgadas. Primero se cortaron las muestras a las dimensiones del porta objetos para después secarlas bajo el sol para retirar toda la humedad que pudieran contener las muestras como resultado del agua utilizada durante el corte, mientras se lijó con abrasivo de carbonato de malla 600 una de las caras del porta objetos para facilitar el pegado de la muestra al mismo. Después de haber retirado toda la humedad de ambas piezas, la cara lisa a observar de la muestra fue pegado en el porta objetos usando un pegamento epóxico marca Loctite de secado rápido con reacción con rayos UV, asegurando que no se hicieran burbujas o imperfecciones en el pegado, estas se dejaron reposar al sol por 15 minutos. Posteriormente, fueron utilizadas la cortadora para eliminar excesos de lámina delgada y la máquina para pulir ambas marca GMW, equipadas con discos de 7 pulgadas para reducir el espesor de la lámina, para finalmente ser lijadas con un abrasivo de carbonato malla 1000 hasta llegar a un espesor deseado de 0.03 mm aproximado. Se utilizó abrasivo de carbonato del 1000 debido a que las muestras se caracterizaron por ser blandas y heterogéneas, devastándose con facilidad y ocasionando oquedades en las láminas delgadas finales.

Se realizaron 8 láminas delgadas de las muestras tomadas del sitio arqueológico y 8 láminas delgadas de las muestras tomadas de la comunidad La Merced. Las láminas delgadas fueron observadas en un microscopio metalográfico-petrográfico Olympus BX41.



Figura 5.5. Maquina cortadora y pulidora GMW de láminas delgadas.

5.7. Caracterización Química-Mineralógica: DRX

Con la finalidad de conocer la naturaleza de los minerales con certeza, las muestras fueron analizadas con el Difractómetro Rigaku Miniflex 600 (Figura 5.6) en el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional. El equipo utilizó un eje de escaneo Gonio, con una posición inicial de $2^\circ 2\theta$ y final de $80^\circ 2\theta$, con un tamaño de intervalo de $0.02^\circ 2\theta$ e intervalo de tiempo de 1 segundo, utilizando una lámpara de $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda=1.54 \text{ \AA}$).



Figura 5.6. Equipo de Difracción de Rayos X del Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional.

5.8. Caracterización Química-Mineralógica: Espectroscopia de Infrarrojo

La técnica de Espectroscopía de Infrarrojo fue utilizada como un análisis químico preliminar a los siguientes para conocer de forma general la composición de las muestras. Los ensayos fueron realizados en Espectrómetro FT-IR Nicolet i 10 en el Instituto Politécnico Nacional campus Guanajuato, analizando las muestras del sitio arqueológico y las recolectadas del banco.

5.9. Caracterización Química-Mineralógica: Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X

Se realizaron ensayos de Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X con la finalidad de conocer las características cuantitativas del material estudiado. Se utilizó un equipo Rigaku NEX CG en el Laboratorio de Investigación y Caracterización de Minerales y Materiales (LICAMM) de la Universidad de Guanajuato, donde fueron analizadas 5 muestras para la búsqueda de 64 elementos, determinando sus concentraciones en ppm, el error estadístico, límite de detección y límite de cuantificación.

5.10. Caracterización Química-Mineralógica: SEM-EDS

Los aspectos morfológicos de las muestras de caliche fueron analizados haciendo uso de un Microscopio Electrónico de Barrido o SEM por sus siglas en inglés, sin el uso de un cubrimiento metálico. El análisis se realizó en el LABNAL de la Universidad de Guanajuato, donde el equipo Carl Zeiss SIGMA-HDVP Field Emission utilizado en el SEM fue configurado con el detector AsB y con un EHT de 21 kV. Se observaron las muestras a 500, 1000, 5000 y 10,000 aumentos cada una, haciendo uso del EDS al 5000X.



Figura 5.7. Equipo de Microscopía Electrónica de Barrido del LABNAL de la División de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad de Guanajuato.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Muestreo de Caliche

La Figura 6.1 muestra la ubicación del sitio arqueológico Cerro de los Remedios resaltado en color café, cuenta con una superficie de 136,390 m², se encuentra localizado en la cabecera municipal de Comonfort, Guanajuato; definido en las coordenadas 2,292,785.4 mN, 317,355.8 mE por el arqueólogo Cruces. Este fue edificado en la ladera sur del cerro del mismo nombre, que forma parte del complejo montañoso doble llamado Dos Cerros, esquematizado al oeste de la zona de estudio corre el río Laja que tuvo gran importancia en la edificación del complejo cívico ceremonial.

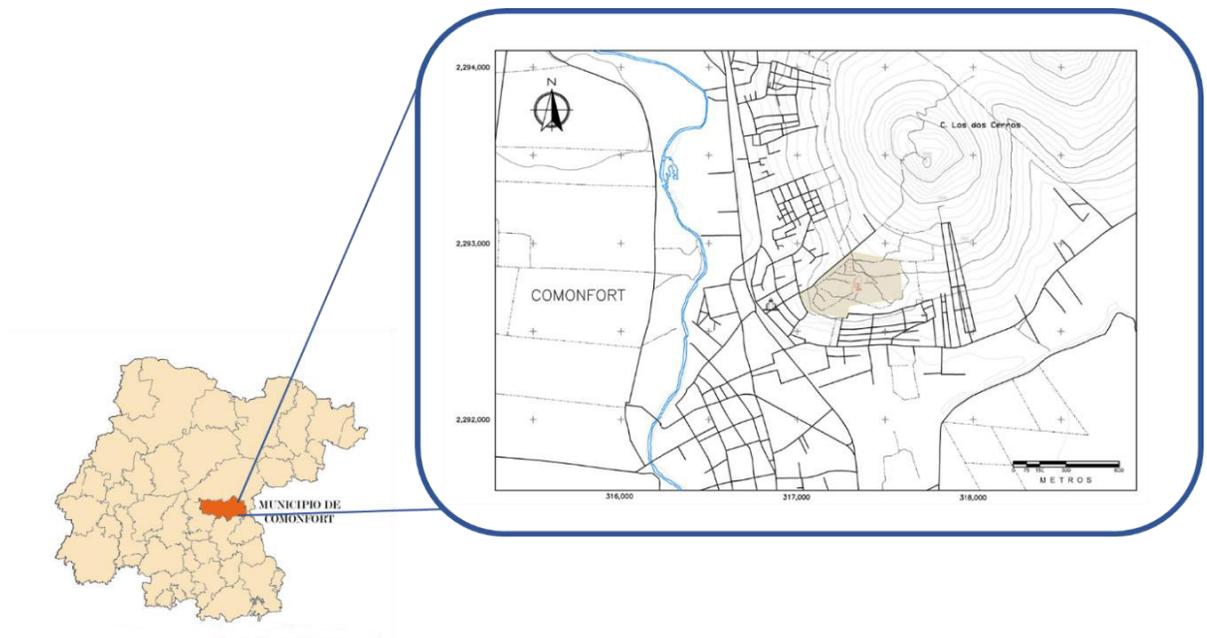


Figura 6.1 Ubicación del sitio arqueológico Cerro de los Remedios, Comonfort.

Se realizaron visitas guiadas por los arqueólogos encargados del sitio arqueológico, donde se observaron los 4 conjuntos arquitectónicos principales, y se seleccionaron las áreas

de interés. El material de construcción utilizado en el área de estudio fue variado, sin embargo, se identificaron estructuras donde se le dio uso al caliche como material de construcción. En el caso de las plataformas escalonadas, fue utilizado el método de piedra hundida, donde se utilizaron una variedad de rocas entre ellas el caliche, que se caracterizó por ser todas de distintas dimensiones y sin una forma en específico. El uso del caliche como material primario de construcción se observó en los basamentos piramidales ubicados en los patios hundidos, donde fueron utilizados fragmentos en forma de lajas de caliche para formar bases cuadrangulares.

Fueron muestreados, como señalado en la Figura 6.2, el patio hundido en excavación y el patio hundido en restauración ubicado al oeste del anterior. Las muestras tomadas fueron nombradas C-ZA, “C” de Caliche y “ZA” de Zona Arqueológica.

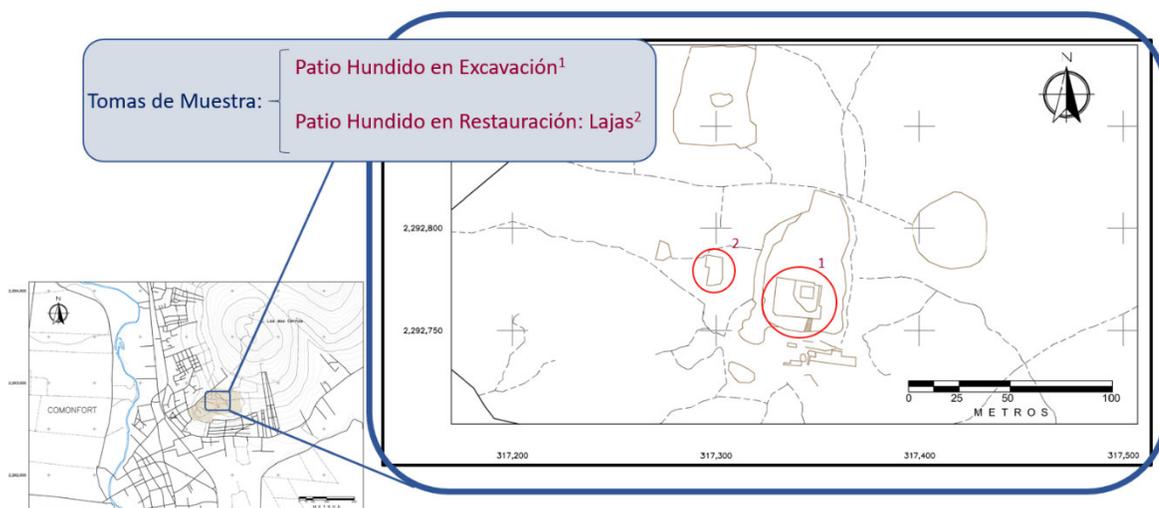


Figura 6.2. Mapa del sitio arqueológico Cerro de los Remedios, Comonfort. Se señala la ubicación de las dos áreas muestreadas donde fue utilizado el caliche como material de construcción.

Del patio hundido en etapa de excavación se tomaron 5 muestras (C-ZA 1 a 5), y del patio hundido en etapa de restauración se tomaron 4 muestras (C-ZA 6 a 9 L) del material recolectado y apilado por los arqueólogos como material utilizado en los trabajos de restauración. En la Figura 6.3 se señalan con círculos rojos los lugares de donde fueron tomadas las muestras.



Figura 6.3. Ubicación de tomas de muestra de caliche en el sitio arqueológico Cerro de los Remedios, Comonfort.

En búsqueda de material que pudiera ser utilizado para restauración o como se ha dicho, de la posible proveniencia del material constructivo del sitio, se identificó una zona con posible presencia de carbonatos a 4.3 km al SE del sitio arqueológico. Los lugareños señalaron que existía en la zona de la comunidad de la Merced un horno de cal para hacer cal viva, lo que confirmaba la presencia de carbonato de calcio en los alrededores del área. Se identificó un banco de material inactivo en la zona de interés, el cual fue muestreado en la búsqueda de material que presentara características químicas, físicas y mecánicas parecidas al material encontrado en el sitio arqueológico. Se tomaron 10 muestras (MB 1 a10) (Figura 6.4) en el banco de material y sus alrededores, donde fueron de interés únicamente resaltaron las muestras MB 1, 2 y 3; se definió el banco de material en las coordenadas 2,289,089 mN, 319,512 mE. Las muestras tomadas fueron nombradas MB, Muestra Banco.

La Figura 6.5 señala la ubicación de las zonas muestreadas y su geología mapeada a escala 1:50,000 por el SGM, donde se observa sus limitantes al ser gran escala y carecer del detalle requerido en el proyecto. El área de estudio cuenta con poco trabajo de investigación geológica a menores escalas, complicando la identificación de zonas con presencia de carbonatos.

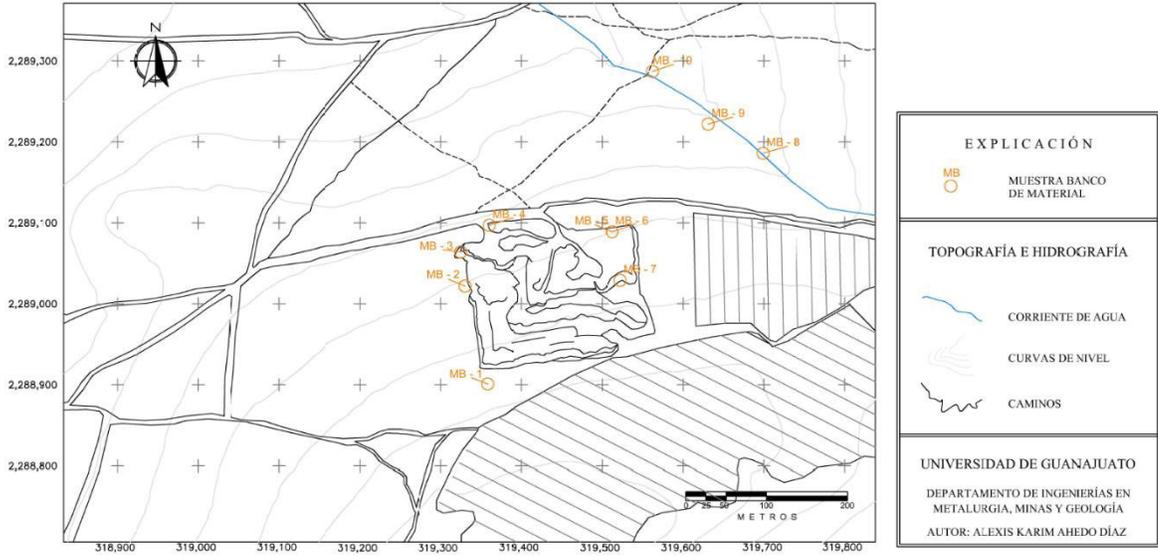


Figura 6.4. Muestreo realizado en el banco de material inactivo de la comunidad la Merced, Comonfort.

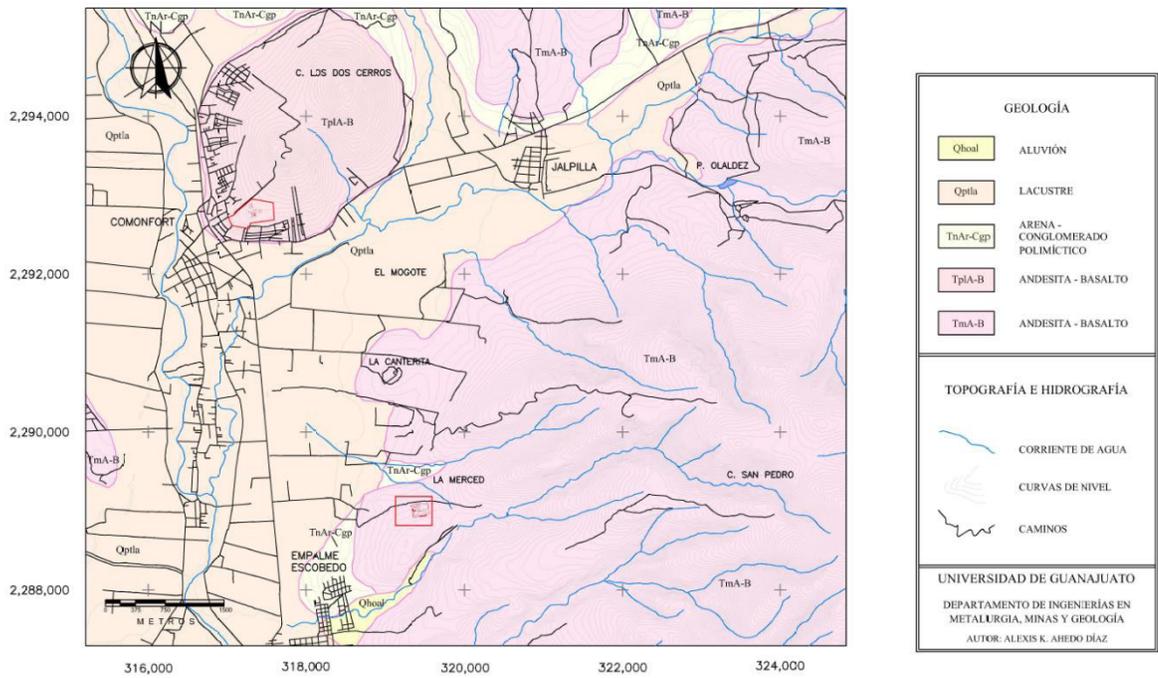


Figura 6.5. Mapa geológico de Comonfort. Se señala en rectángulos rojos las zonas de estudio muestreadas. Información tomada del SGM, cartas geológicas 1:50,000.

En las cotas de elevación superiores del banco de material se encontró una costra carbonatada cementando un paquete sedimentario de forma generalizada. Como se observa en la Figura 6.6, este estrato se caracterizaba por ser de poco espesor (8 cm aproximadamente), presentar bandeamiento y tener una capa exterior de color gris. La Tabla 6.1 resume las claves empleadas para la identificación de las muestras tomadas tanto en el sitio arqueológico como en el banco de carbonatos ubicado en la Comunidad de la Merced en Comonfort, Gto.

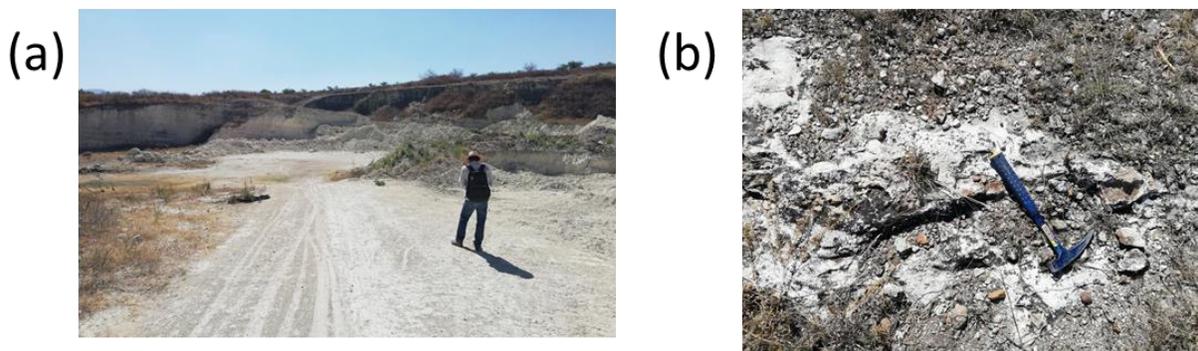


Figura 6.6. (a) Acceso al banco de material inactivo en la comunidad la Merced. (b) Afloramiento de caliche donde fue tomada la muestra MB 1.

Tabla 6.1. Muestras realizadas en zonas de estudio: Sitio arqueológico Cerro de los Remedios y Banco de Material en Comunidad la Merced, Comonfort, Gto.

Clave	Fotografía	Clave	Coordenadas UTM		
			X	Y	Z
C-ZA-1		MB-1	319,358	2,288,901	1884
C-ZA-2		MB-2	319,330	2,289,022	1870
C-ZA-3		MB-3	319,325	2,289,064	1865
C-ZA-4		MB-4	319,512	2,289,089	1857
C-ZA-5		MB-5	319,512	2,289,089	1857
C-ZA-6-L		MB-6	319,522	2,289,029	1858
C-ZA-7-L		MB-7	319,699	2,289,186	1849
C-ZA-8-L		MB-8	319,631	2,289,222	1848
C-ZA-9-L		MB-9	319,562	2,289,287	1837
		MB-10	318,995	2,288,970	1850

6.2. Caracterización Química-Mineralógica para las Muestras provenientes del Sitio Arqueológico

La primera prueba que se realizó a las muestras tanto del sitio arqueológico como del banco de material, fue la prueba de identificación de carbonatos; que consiste en la disolución del carbonato con ácido clorhídrico (Figura 6.7). Todas las muestras presentaron la formación de burbujas que identifican el CO₂ formado en la disolución, confirmando que la presencia de rocas carbonatadas.



Figura 6.7. Prueba de Carbonatos para muestras de caliche provenientes del sitio arqueológico de Comonfort, Gto y del Banco de Material de la Comunidad de la Merced.

La Figura 6.8 muestra el espectro de infrarrojo obtenido por ATR-IR de las muestras de caliche provenientes del sitio arqueológico; donde se observan diferente cantidad de agua adsorbida (banda ancha e intensa a 3369cm^{-1} , ν_s) y una cantidad despreciable de materia orgánica; la cual se identifica con las señales a 2865cm^{-1} que corresponde a la vibración de los grupos C-H. Por otra parte, de acuerdo a Vázquez y colaboradores se asignaron las

señales a 1393 cm^{-1} , 869 cm^{-1} y 712 cm^{-1} al carbonato presente en las muestras (vibraciones correspondientes al grupo carbonilo) [36]. De acuerdo con estos autores, la calcita es identificada con modos vibracionales a 1422 cm^{-1} , 873 cm^{-1} y 707 cm^{-1} .

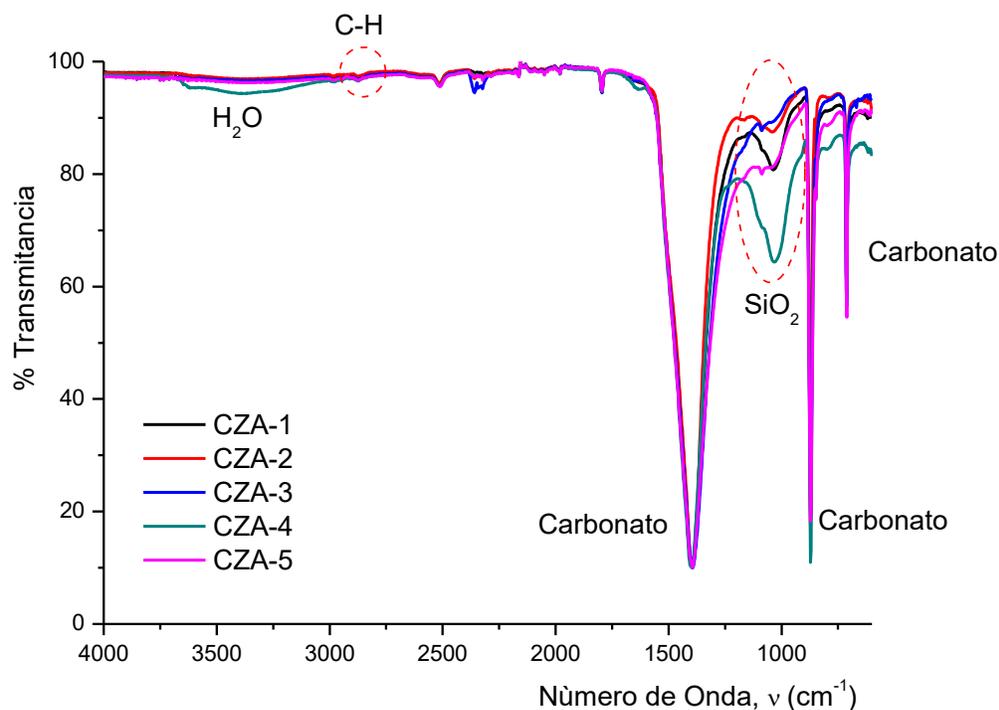


Figura 6.8 Espectros de Infrarrojo obtenido por ATR-IR para las muestras de caliche del sitio arqueológico provenientes del patio hundido en excavación.

Por otra parte, se identificó una banda ancha e intensa a 1028 cm^{-1} ; la cual fue asignada a la sílice que está presente como parte de la composición de la roca. La sílice puede presentarse como: sílice amorfa, silicatos, aluminosilicatos, cuarzo y diferentes tipos de arcillas. La intensidad de esta señal varía de acuerdo con la muestra de caliche. Entonces, para obtener una relación cualitativa de la cantidad de carbonato y silicatos presentes se realizó una relación del área bajo la curva de la señal correspondiente a carbonato (1393 cm^{-1}) y la banda a 1028 cm^{-1} ; determinando así una cantidad de materia silícica (%MS; Ecuación 6.1) que se reporta en la Tabla 6.2.

$$\%MS = \frac{\text{Carbonato}}{\text{Sílice}} \times 100 = \frac{\int \text{Señal a } 1393 \text{ cm}^{-1}}{\int \text{Señal a } 1028 \text{ cm}^{-1}} \text{ --- --- --- Ec. 6.1}$$

Tabla 6.2. Contenido de materia silícica en las muestras de caliche provenientes del patio hundido en excavación.

Muestra	% MS
CZA-1	7.29
CZA-2	4.47
CZA-3	1.05
CZA-4	21.26
CZA-5	2.81

Por su parte, las muestras de caliche obtenidas del material empleado para restaurar; al cual se le denomina como Lajas, presentaron el mismo comportamiento (Figura 6.9). Estas muestras contienen una cantidad despreciable de agua; no se observó la señal a 3369 cm^{-1} , lo anterior se puede explicar ya que estas muestras han sido apiladas para su almacenamiento contienen una cantidad despreciable de materia orgánica (2865 cm^{-1} ; C-H) presentaron las señales de calcita a 1393 cm^{-1} , 869 cm^{-1} y 712 cm^{-1} . Así mismo, contienen materia silícica identificada con la señal a 1028 cm^{-1} . Sin embargo, como se puede apreciar en la Tabla 6.3; la cantidad de MS es baja, ésta varío de 4.12% hasta 7.8%.

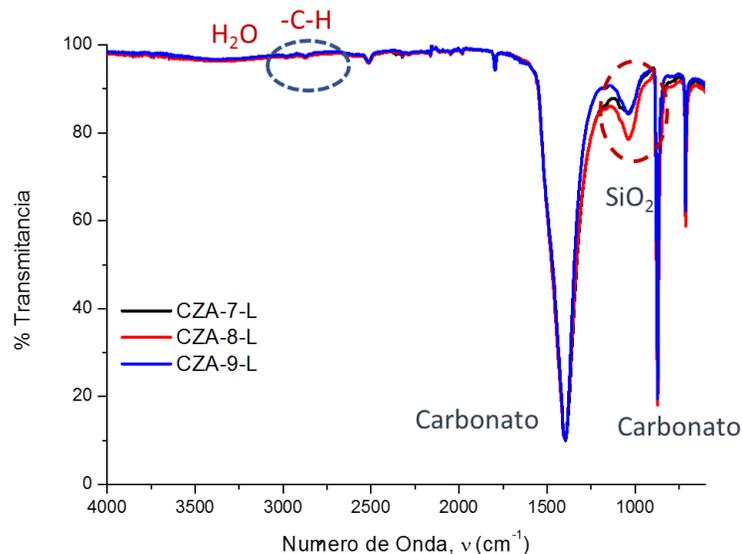


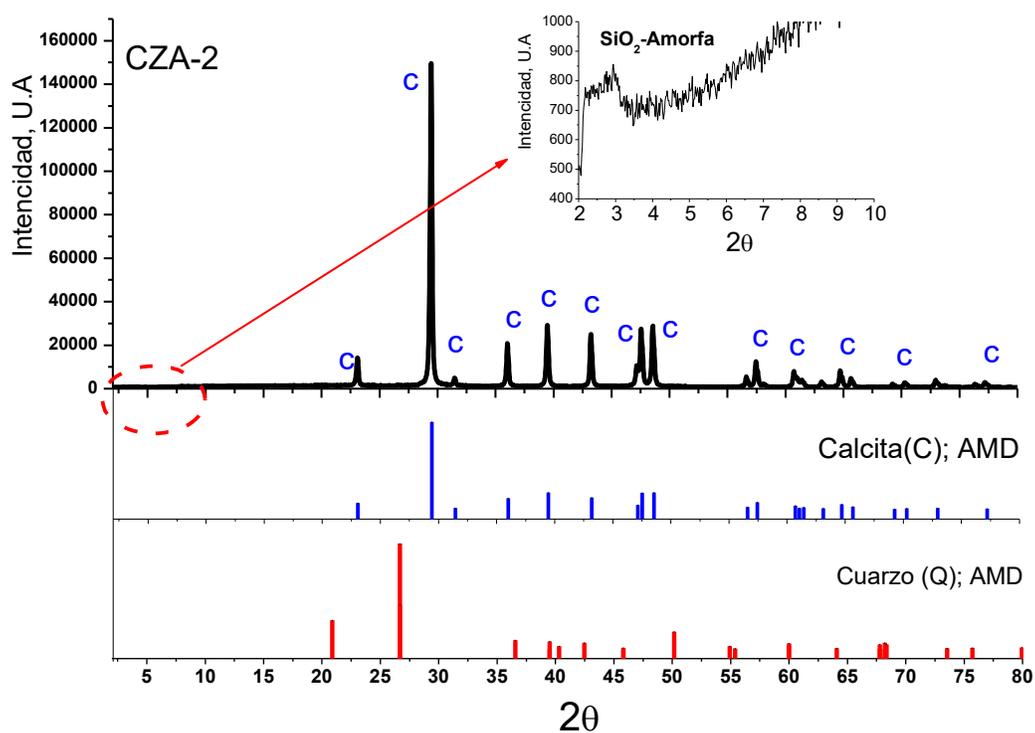
Figura 6.9 Espectros de Infrarrojo obtenido por ATR-IR para las muestras de caliche empleado para restaurar “Lajas” del sitio arqueológico.

Tabla 6.3. Contenido de materia silícica en las muestras de caliche empleado para restaurar “Lajas” del sitio arqueológico.

Muestra	% MS
CZA-7-L	4.18
CZA-8-L	7.82
CZA-9L	6.35

Si bien, la prueba de carbonatos y el análisis por espectroscopía de infrarrojo permitieron identificar las muestras como rocas con composición base carbonatos y sílice; es necesario conocer las fases mineralógicas que están presentes en dichos materiales, por lo que se obtuvieron los difractogramas para las muestras de caliche de la zona arqueológica (Figura 6.10). Para realizar la asignación de los picos se emplearon los datos cristalográficos de la *American Mineralogical Crystal Structure Database* (base de datos estructurales y cristalográficos de la Sociedad Mineralógica Americana) Los datos cristalográficos empleados para realizar el análisis por DRX de las muestras se puede consultar en el Apéndice 1 ^[37].

Entonces, de acuerdo con los difractogramas observados para las muestras del sitio arqueológico; se identifican como fase mineral principal la calcita y sílice amorfa en concentraciones muy pequeñas. Para la muestra CZA-9L se identificó cuarzo a través de los picos de difracción a 2θ en 21.05° y 26.73° . Los picos de calcita (CaCO_3) presentaron una elevada intensidad por lo que la presencia de la materia silícica, (MS: Sílice amorfa, cuarzo, arcillas o aluminosilicatos) no es clara. Entonces, se realizó el análisis elemental de las muestras por espectroscopía de fluorescencia de rayos X (FXR; *Fluorescence X-Ray*) la cual se muestra en la Figura 6.11.



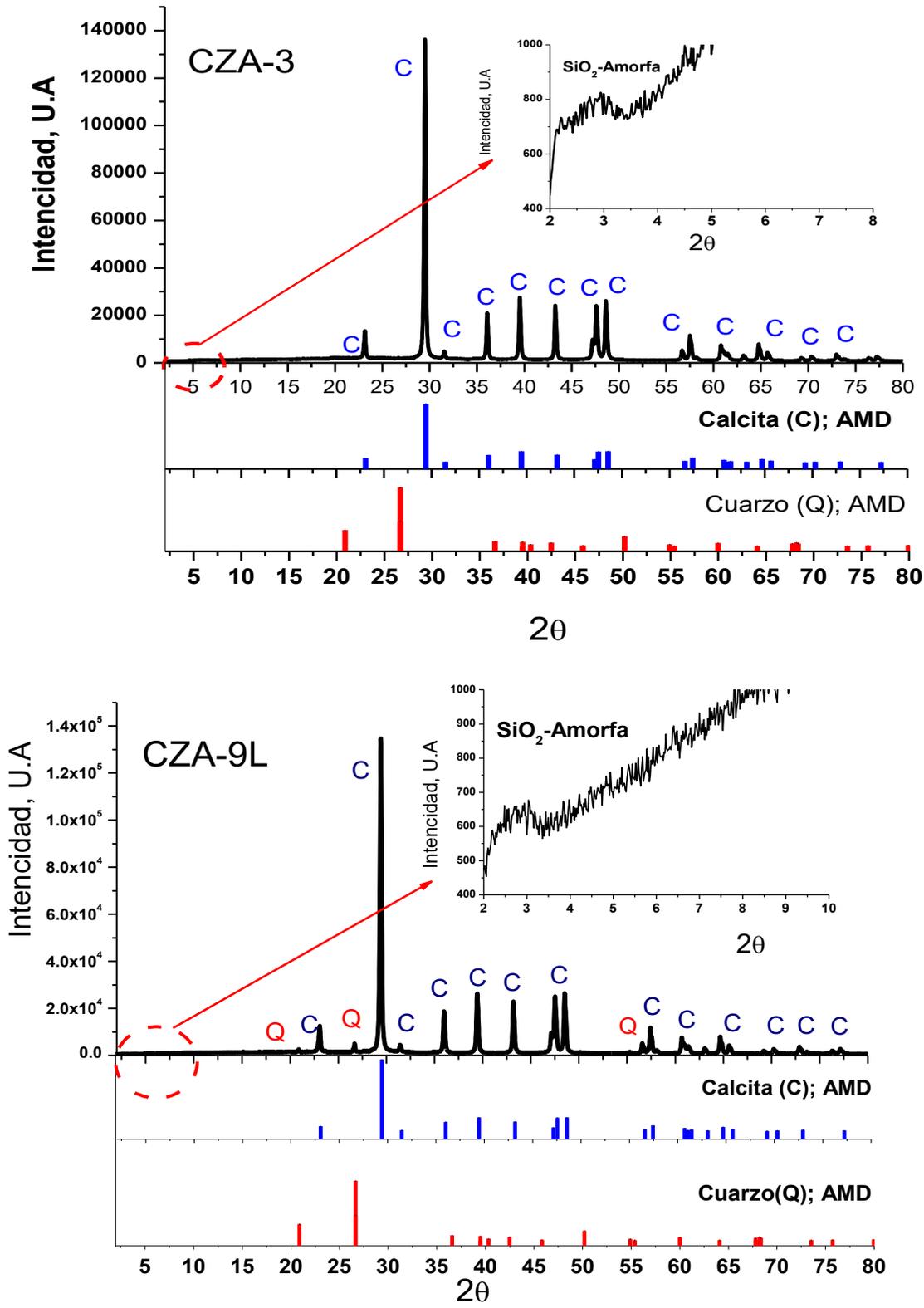


Figura 6.10. Difractogramas para muestras del sitio arqueológico patio hundido en excavación y restauración.

Los principales elementos que se identificaron en las muestras fueron calcio, oxígeno en una alta concentración mayor a 5×10^5 ppm; seguida de silicio con concentración mayor a 6×10^3 ppm, en concentraciones menores al 2×10^3 ppm se encuentran el azufre, magnesio, aluminio, potasio y hierro. Para la laja proveniente del material empleado para restaurar el sitio arqueológico (CZA-9L) se observó una concentración elevada de potasio de 6.8×10^3 ppm; lo que sugiere una mayor concentración de aluminosilicatos.

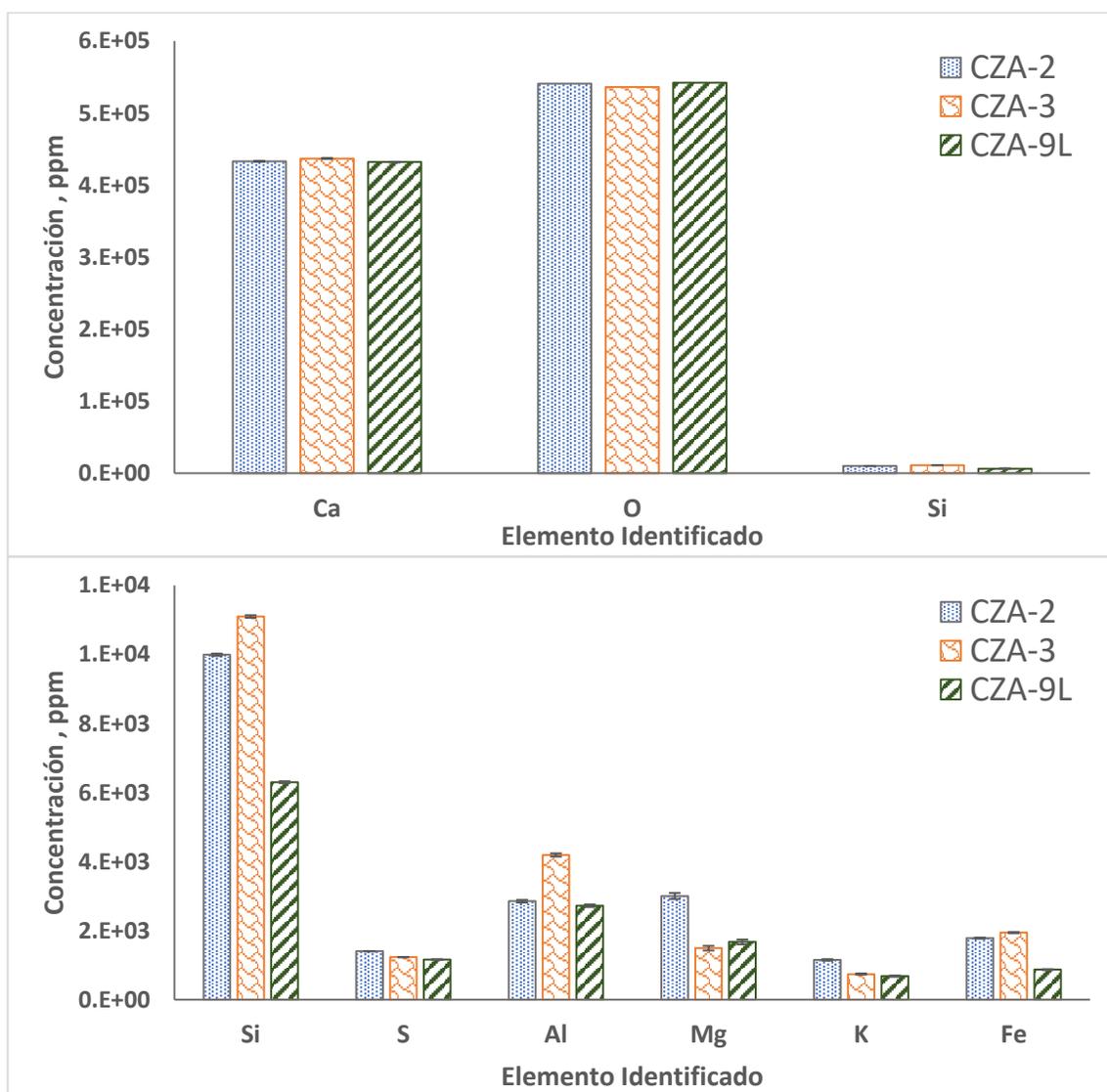


Figura 6.11. FXR para muestras de caliche proveniente del sitio arqueológico de Comonfort, Gto.

La FXR es una técnica cuantitativa que permite determinar el porcentaje en peso de cada elemento en las muestras de caliche; la Tabla 6.4 resume los porcentajes en peso calculados para cada elemento; donde se puede apreciar que el Ca y O suman el alrededor del 98% y el Si se encuentra en el orden del 1%; además, se reporta el porcentaje total de CaO presentes en las muestras ya que de acuerdo a la génesis de estos materiales, el CaCO₃ se encuentra depositado entre capas de aluminosilicatos que por su misma composición pueden contener calcio en su estructura; tal es el caso de las plagioclasas ((Na,Ca)(Si,Al)₃O₈).

Tabla 6.4. Análisis cuantitativo por FXR de los principales elementos presentes en las muestras de caliche provenientes del sitio arqueológico.

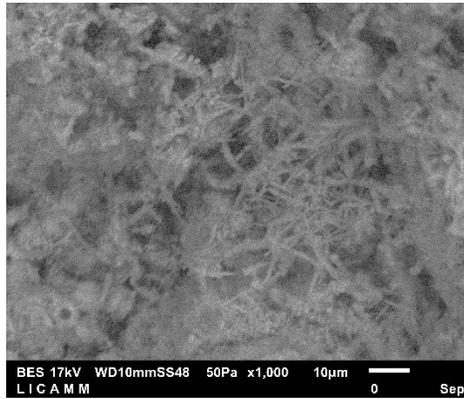
Elemento Cuantificado	% en Peso		
	CZA-2	CZA-3	CZA-9L
Ca	43.75	43.98	43.55
O	54.89	53.94	54.42
Si	1.01	1.12	0.64
S	0.14	0.12	0.12
Al	0.29	0.42	0.28
Mg	0.30	0.15	0.17
K	0.12	0.07	0.07
Fe	0.18	0.20	0.09
CaO	95.6	94.0	93.0

La Figura 6.12 muestra la MEB para las muestras de caliche proveniente del sitio arqueológico (patio hundido en excavación y material empleado para restaurar). Para las muestras CZA-3 y CZA-4 se observó la superficie del material; mientras que CZA-2, CZA-5, CZA-7L y CZA-9L se observó el interior de la roca (corte transversal). Las morfologías observadas fueron muy similares; se observan cristales prismáticos gruesos (CZA-3 y CZA-4) y cristales prismáticos muy finos en forma de agujas (CZA-2, CZA-7L

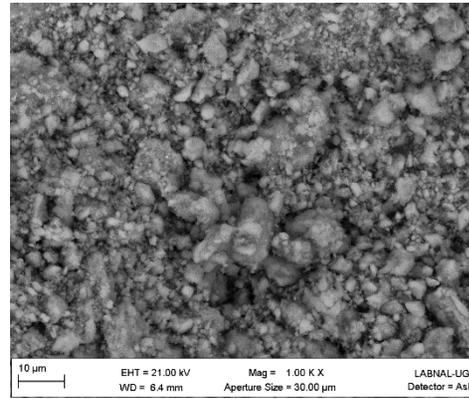
y CZA-9L). El Apéndice 2 muestra diferentes MEB obtenidas para las muestras de caliche a diferentes magnificaciones.

La Figura 6.13 muestra la distribución de elementos determinada por SEM-EDS; donde se observa una composición homogénea para las tres muestras; predominando la presencia de calcio, oxígeno y carbono (calcita, CaCO_3); además de identificarse el silicio, aluminio y potasio; estos elementos se encuentran en menor porcentaje (entre 0.1-0.5%) sin embargo, la distribución es homogénea en toda la superficie del mineral; por lo que se puede indicar que la materia silícica se encuentra mezclada con la costra de carbonato de acuerdo con el tipo de génesis que presentan estas rocas. Además, la MS podría estar presente como aluminosilicatos que contienen potasio y aluminio. La Tabla 6.5 resume los porcentajes en peso calculados para cada elemento por EDS; los cuales presentan el mismo comportamiento que los observados por fluorescencia de rayos X; con diferencia que el contenido de silicio es similar al de los otros metales (Al y K).

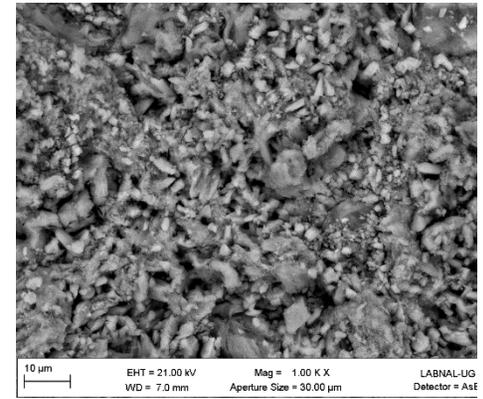
CZA-2



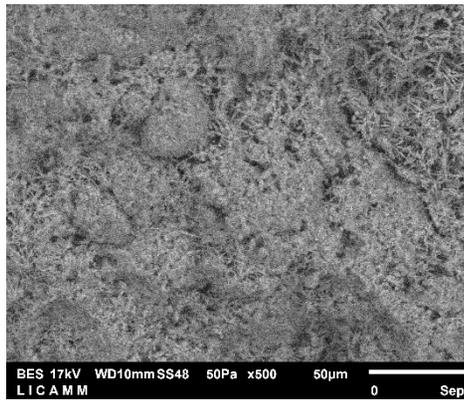
CZA-3



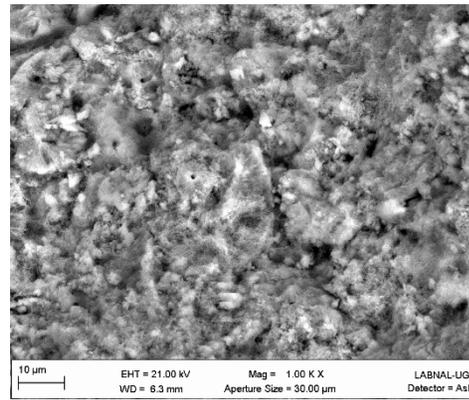
CZA-4



CZA-5



CZA-7L



CZA-9L

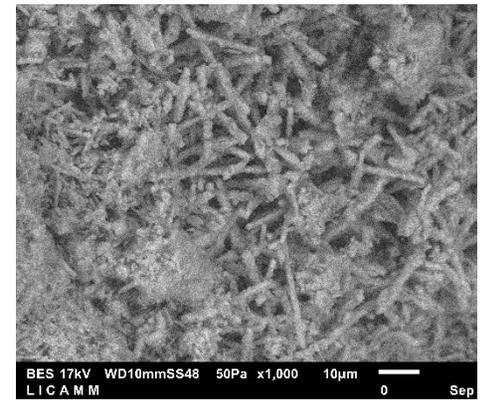
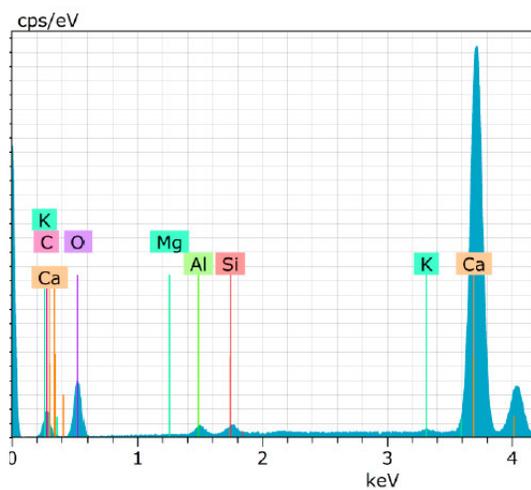
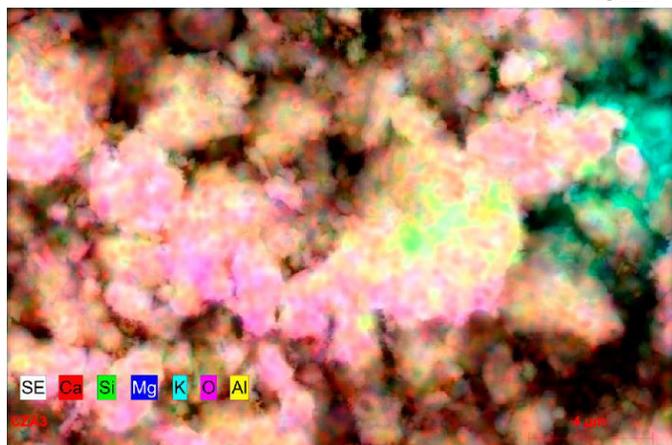
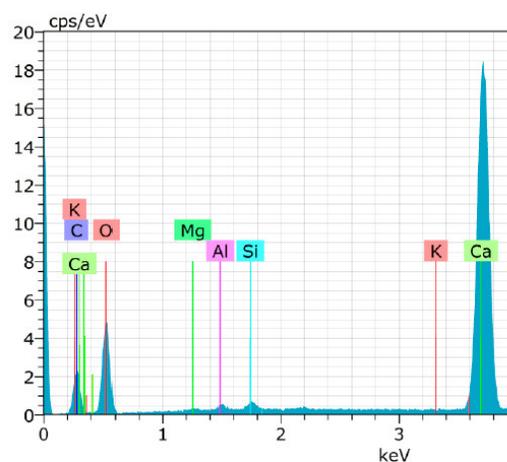
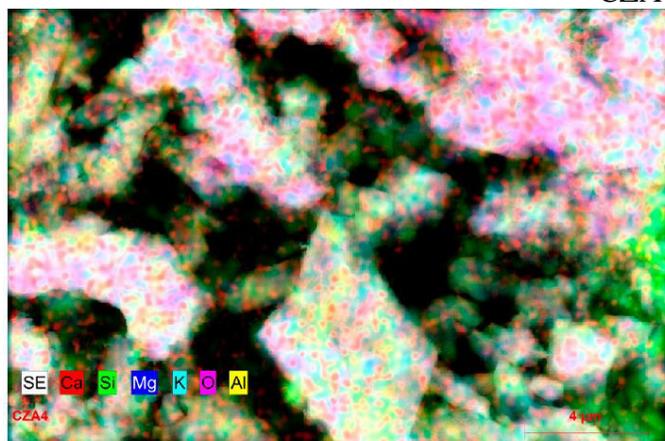


Figura 6.12. MEB para las muestras de caliche proveniente del sitio arqueológico.

CZA-2



CZA-3



CZA-9L

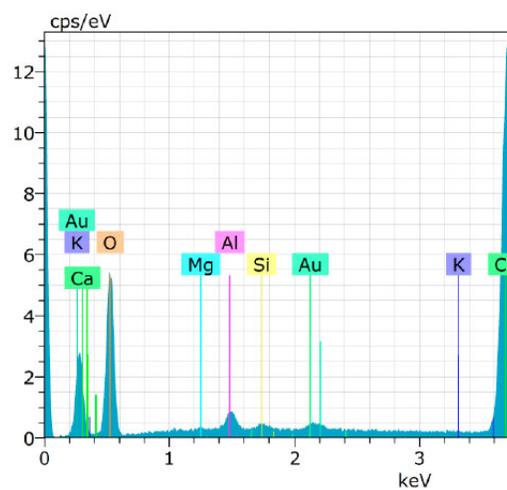
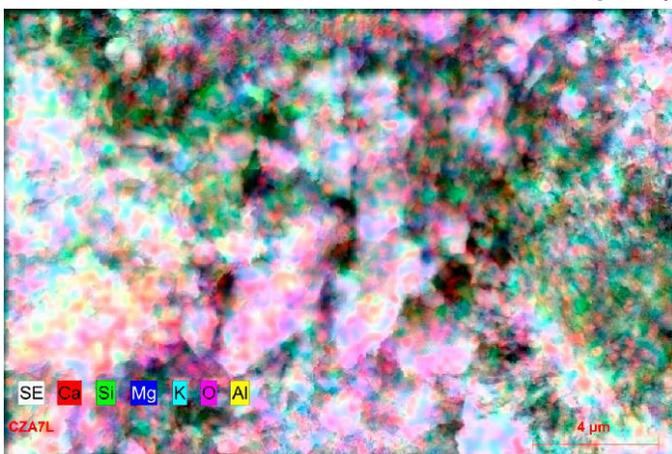


Figura 6.13. EDS análisis para las muestras de caliche proveniente del sitio arqueológico.

Tabla 6.5 Análisis cuantitativo por EDS de los principales elementos presentes en las muestras de caliche provenientes del sitio arqueológico.

Elemento Cuantificado	% en Peso		
	CZA-2	CZA-3	CZA-9L
Ca	48.07	35.35	35.35
O	43.29	63.33	63.33
C	8.0	---	--
Si	0.17	0.15	0.15
Al	0.23	0.98	0.98
Mg	0.07	0.14	0.14
K	0.17	0.04	0.04

Por otra parte, el análisis de petrografía en lámina delgada para estas muestras (Tabla 6.6) indicó una composición en fases mineralógicas muy reducida; se observaron micrita como matriz base de los caliches (M); calcita (C), cuarzo (Q) se identificó en algunas muestras, y mineral ferromagnesiano (Mg). Tunik y colaboradores realizaron un análisis para roca calcárea de las Chilcas, Chile ^[38]; donde observan la formación de material dendrítico (Figura 6.14a) que tiene similitud en morfología para las fases prismáticas tipo agujas (CZA-2, CZA-7L, CZA-9L). Por otra parte, en este tipo de materiales se forma una matriz de micrita inmersa en material silicoclásticos (Figura 6.14b) los cuales son similares a las matrices de cristales prismáticos observadas en las muestras CZA-2, CZA-3 y CZA-4.

Por lo que, de acuerdo con la composición química identificada por espectroscopía de fluorescencia, EDS, la DRX, así como del análisis petrográfico; se puede indicar que la roca del sitio arqueológico de Comonfort **es una roca carbonatada con principal fase mineralógica de calcita, una matriz micrítica y con porcentajes bajos de aluminosilicatos que se encuentran dispersos en toda la matriz de la roca debido a que el carbonato de calcio fue depositado y cementado sobre ellos por procesos de sedimentación.**

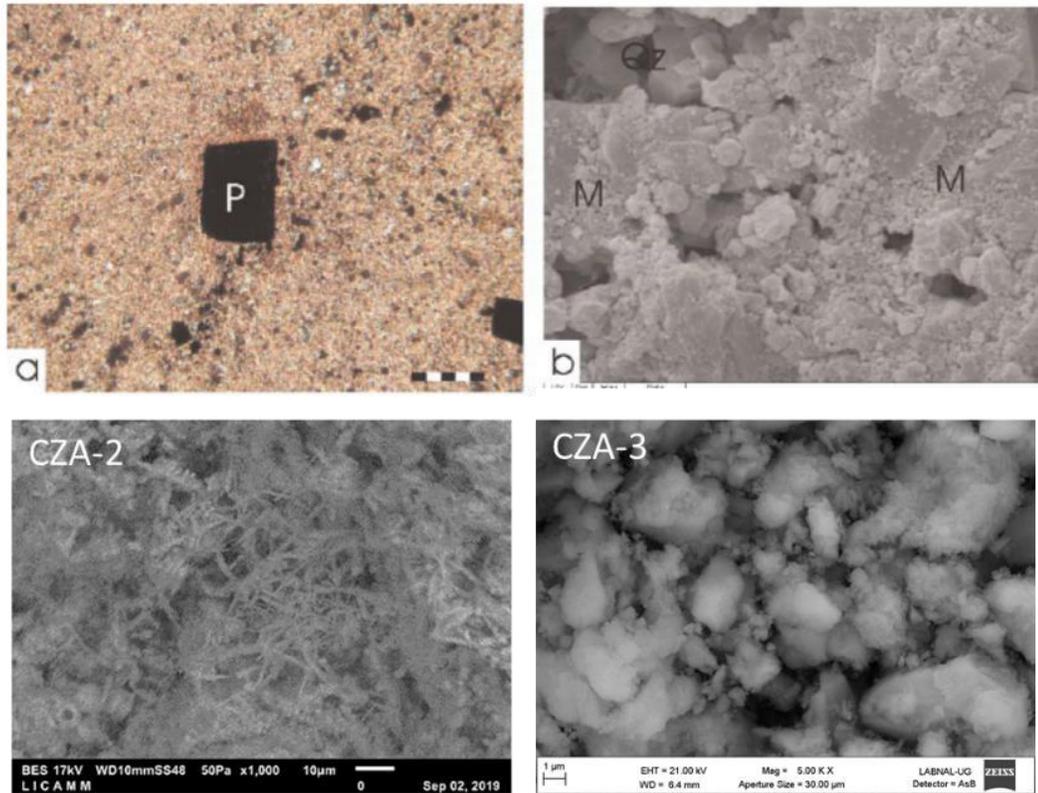
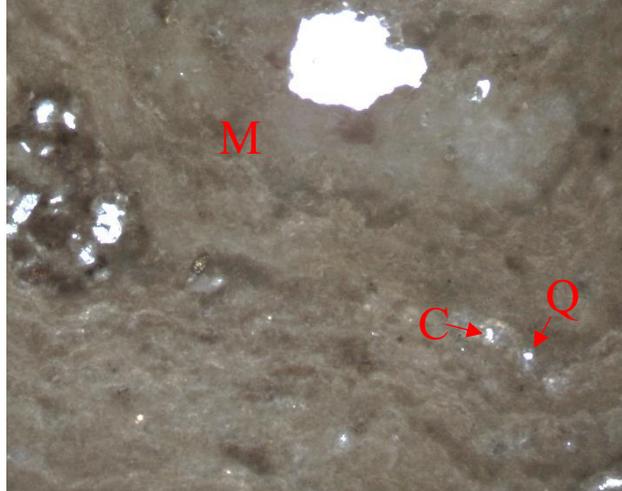
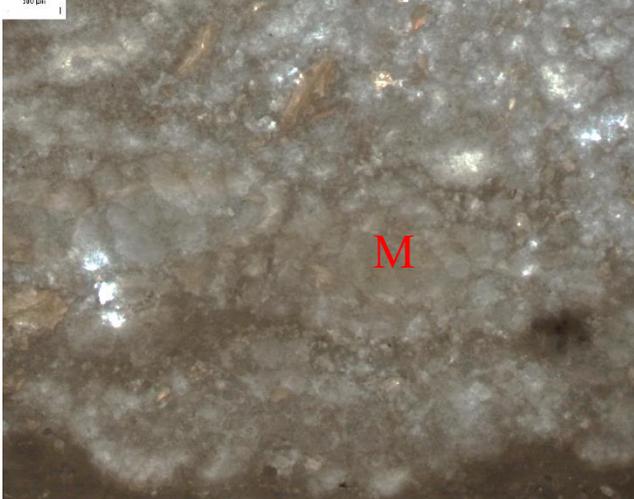
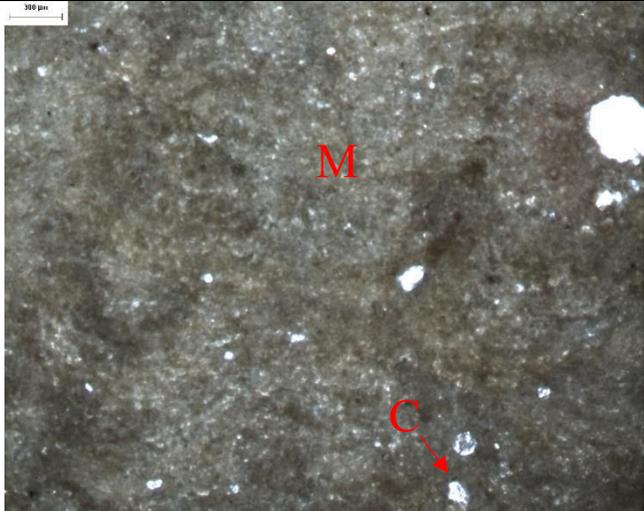
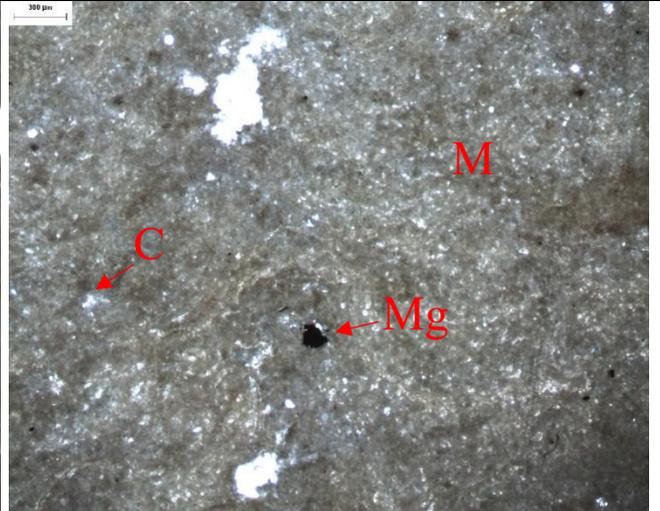
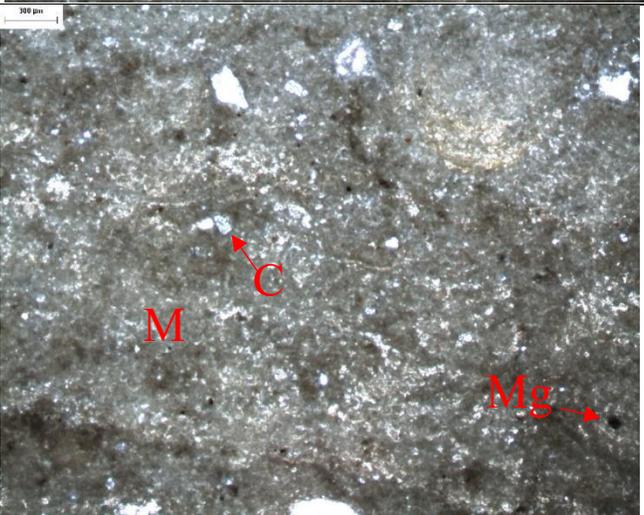


Figura 6.14. (a) Matriz dendrítica formada por procesos de sedimentación ocasionados por decantación^[38] (b) Matriz de micrita^[38] (c) CZA-2 observada a 1000x (d) CZA-3 observada a 5000X.

Tabla 6.6. Análisis por petrografía en nícoles paralelos para las muestras de caliche provenientes del sitio arqueológico.

Muestra de Caliche	Petrografía		Fases Identificadas
CZA-1			<p>Matriz Micrita: M Calcita: C Cuarzo: Q Mineral ferromagnesiano (Magnesita): Mg</p> <p>Textura: bandeada</p>
CZA-4			<p>Matriz Micrita: M</p> <p>Textura: bandeada</p>

CZA-7L			<p>Matriz Micrita: M Calcita: C Mineral ferromagnesian: Mg Textura: bandeada</p>
CZA-8L			<p>Matriz Micrita: M Calcita: C Mineral ferromagnesian: Mg Textura: bandeada</p>

Por lo tanto, de acuerdo a los resultados observados por DRX, fluorescencia de rayos X, SEM-EDS y la petrografía se propone el balance mineralógico que se indica en la Tabla 6.7; donde en la cantidad asignada para material carbonatado se consideró el porcentaje de CaO determinado por fluorescencia de rayos X; mientras que los porcentajes de aluminosilicatos y sílice (cuarzo y SiO₂-amorfa) fueron obtenidos de acuerdo con el porcentaje en peso de los metales identificados en el análisis elemental.

Tabla 6.7. Propuesta de análisis mineralógico para las muestras de caliche del sitio arqueológico.

Minerales	% en peso		
	CZA-2	CZA-3	CZA-9L
Micrita con Calcita (CaCO ₃)	95.6	94	93.0
Aluminosilicatos con K; Plagioclasa ((NaCa)SiAl ₃ O ₈ y biotita (K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OHF) ₂)	2.51	0.42	0.42
Aluminosilicatos con alto contenido de calcio	1.89	3.19	3.14
Cuarzo/ SiO ₂ -amorfa	---	2.39	3.43

6.3. Caracterización Química-Mineralógica para las Muestras provenientes del Banco de Material de la Comunidad de la Merced

En cuanto a las muestras provenientes del Banco de Material de la Comunidad de la Merced, no todas las muestras dieron positivas a la prueba de carbonatos. En la Tabla 6.8 se resumen los resultados observados; donde 2 de las muestras no contienen carbonato en su estructura. Este resultado se confirmó con la espectroscopía de infrarrojo (Figura 6.15) donde se puede observar; que las muestras MB-4 y MB-5 son rocas silíceas; mientras que en el resto de muestra contienen diferente porcentaje de carbonato. El %MS en las muestras de banco es resumida en la Tabla 6.9; donde se puede apreciar que se tienen rocas ricas o

con alto contenido de carbonato (89-53%); rocas pobres en carbonato (34.66-3.3%) y muestras sin presencia de carbonatos.

Tabla 6.8 Resultados de prueba de Carbonatos para las muestras provenientes de la Comunidad de la Merced.

$\text{CaCO}_3 + 2 \text{HCl} \longrightarrow \text{CaCl}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$		
	Positiva	Negativa
MB-1	Si	
MB-2	Si	
MB-3	Si	
MB-4		Si
MB-5		Si
MB-6	Si	
MB-7	Si	
MB-8	Si	
MB-9	Si	
MB-10		Si

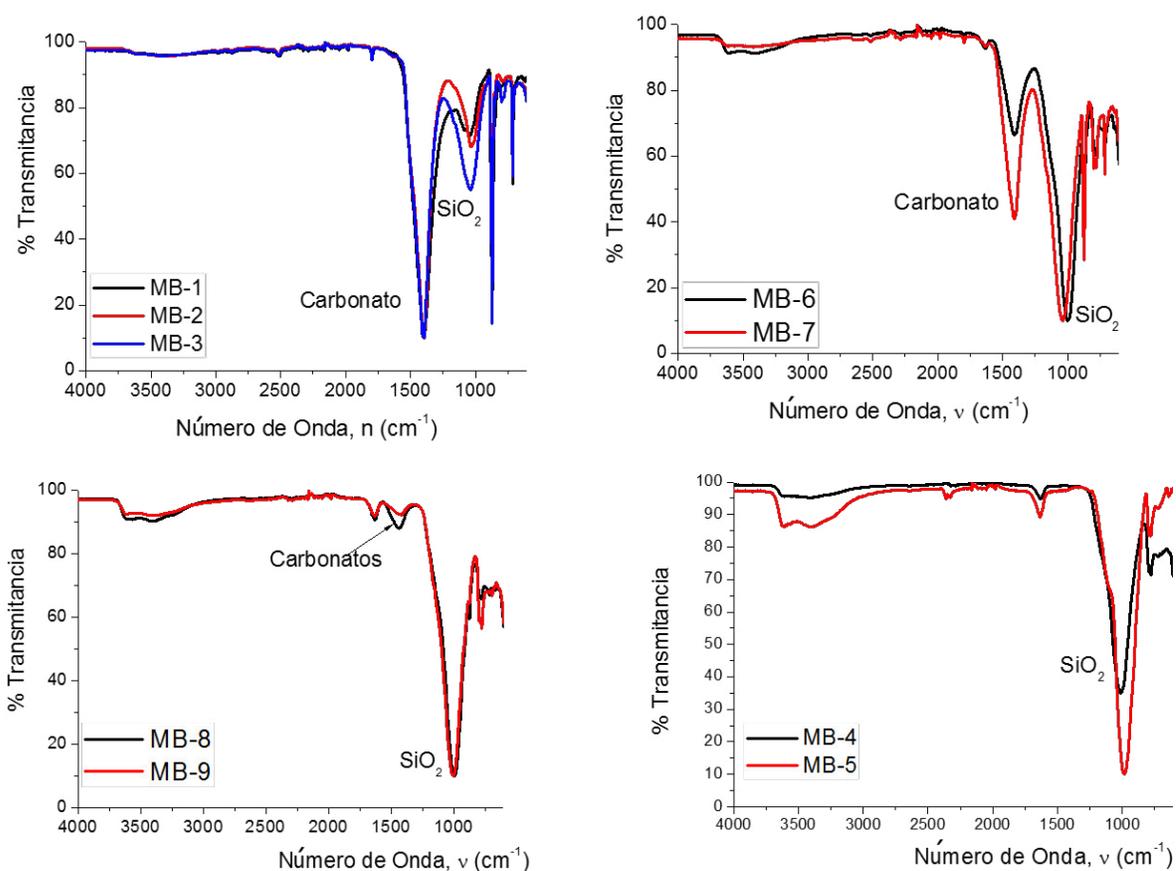


Figura 6.15. Espectros de Infrarrojo obtenido por ATR-IR para las muestras de la Comunidad de la Merced.

Tabla 6.9. Contenido de materia silícica en las muestras de la Comunidad de la Merced.

Muestra	%MS	Clasificación
MB-1	11.3	Carbonato
MB-2	19.41	Carbonato
MB-3	47.36	Carbonato
MB-4	0	Sílice
MB-5	0	Sílice
MB-6	--	Sílice
MB-7	34.67	Sílice
MB-8	8.5	Pobre Carbonato
MB-9	3.3	Pobre Carbonato
MB-10	---	Sílice

La comunidad de la Merced es una localidad cercana al sitio arqueológico; por lo que se seleccionó para realizar una inspección y tomar muestras para determinar su posible similitud en composición química y propiedades físicas al Caliche del sitio. Sin embargo, de acuerdo con la prueba de carbonatos y la espectroscopía de infrarrojo no todas las muestras tienen una composición rica en carbonatos. Por lo que el análisis de DRX, así como la caracterización química fue realizado sólo para las muestras de banco ricas en carbonatos MB-1 y MB-2. La Figura 6.16 muestra la caracterización por DRX; donde se identifica: calcita como fase predominante, cuarzo, sílice amorfa, moscovita y probablemente Leonhardita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) éste último es una zeolita que retiene la humedad ^[39] y su forma de cristalización es en agujas similar a la morfología observada para los caliches del sitio.

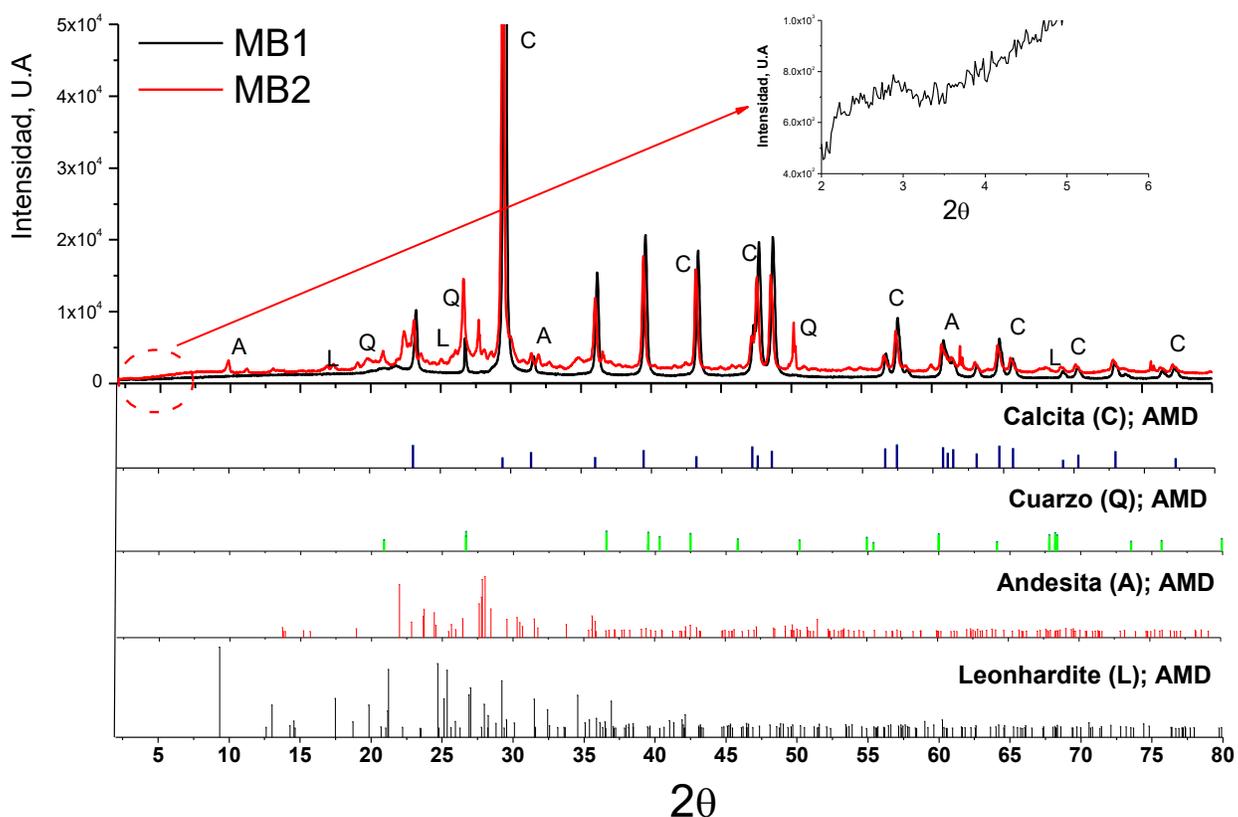


Figura 6.16. Análisis por DRX para las muestras de Banco de la Comunidad de la Merced ricas en carbonatos.

Por otra parte; en el análisis por espectroscopia de fluorescencia de rayos X (Figura 6.17) se observó un incremento considerable de la cantidad de silicio, aluminio y demás metales presentes en las muestras de Banco. El silicio alcanza concentraciones de 92.7×10^3 ppm; mientras que las muestras de caliche del sitio están en el orden de los 6×10^3 ppm. Entre los metales que incrementaron considerablemente su concentración con respecto a las muestras de caliche se encuentra el Fe con concentraciones de 14.4×10^3 ppm y el aluminio con 27×10^3 ppm.

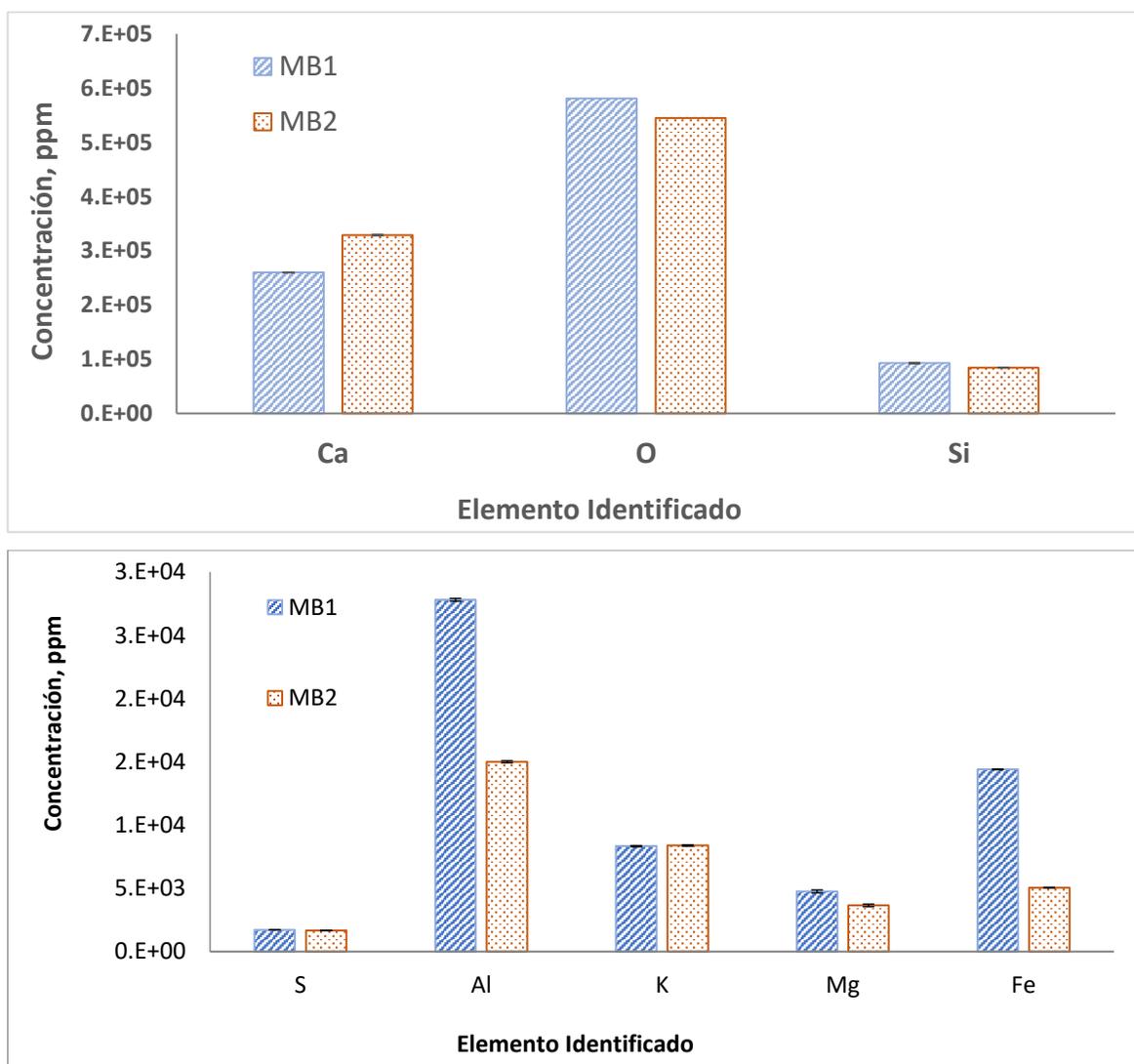


Figura 6.17. Cuantificación de elementos presentes en las muestras de Banco de la Comunidad de la Merced por XFR.

La Tabla 6.10 resume los porcentajes en peso de cada elemento determinados por FRX; estos se comparan con los determinados por EDS. Ambas técnicas indican que el componente principal de la roca es la calcita (CaCO_3); por análisis elemental se determinaron porcentajes que van desde 46.7- 74.7%. Por otra parte, se observó un incremento de la concentración de azufre, aluminio y magnesio; por lo que se puede proponer que el caliche se encuentra sedimentada en una base de material silíceo rico en aluminosilicatos que contienen K, Mg y Fe.

Tabla 6.10. Análisis cuantitativo de los principales elementos presentes en las muestras provenientes del Banco de la Merced.

Elemento Cuantificado	% en Peso; FRX		% en Peso; EDS	
	MB-1	MB-2	MB-1	MB-2
Ca	26.24	33.16	30.47	53.15
O	58.65	54.93	54.43	37.34
C	---	---	14.15	9.15
Si	9.36	8.52	0.28	---
S	0.17	0.17	---	---
Al	2.81	1.52	0.34	0.31
Mg	0.48	0.37	0.10	0.05
K	0.84	0.84	0.04	0.01
Fe	1.45	0.51	---	---
CaO	46.7	74.7	---	---

La Figura 6.18 muestra los resultados de la morfología observada para estos materiales y la distribución de los elementos en la superficie de las muestras; por lo que se puede indicar que en cuanto a la morfología las muestras del banco son similares a la de las muestras de caliche del sitio arqueológico; se identifica la calcita en forma de micrita (M), cuarzo (Q) y aluminosilicatos (Q_z); el cuarzo y los aluminosilicatos se encuentran embebidos en la matriz de micrita. En estas muestras de acuerdo con la distribución de elementos, se tiene una mayor concentración de la materia silíceo; los colores verde y combinación de verde amarillo (Si/Al) para dar un color claro; y en este sentido predominan más que en las muestras de caliche. Lo anterior confirma el incremento de MS observada por FRX (mayor concentración de Si, Al, Fe y Mg).

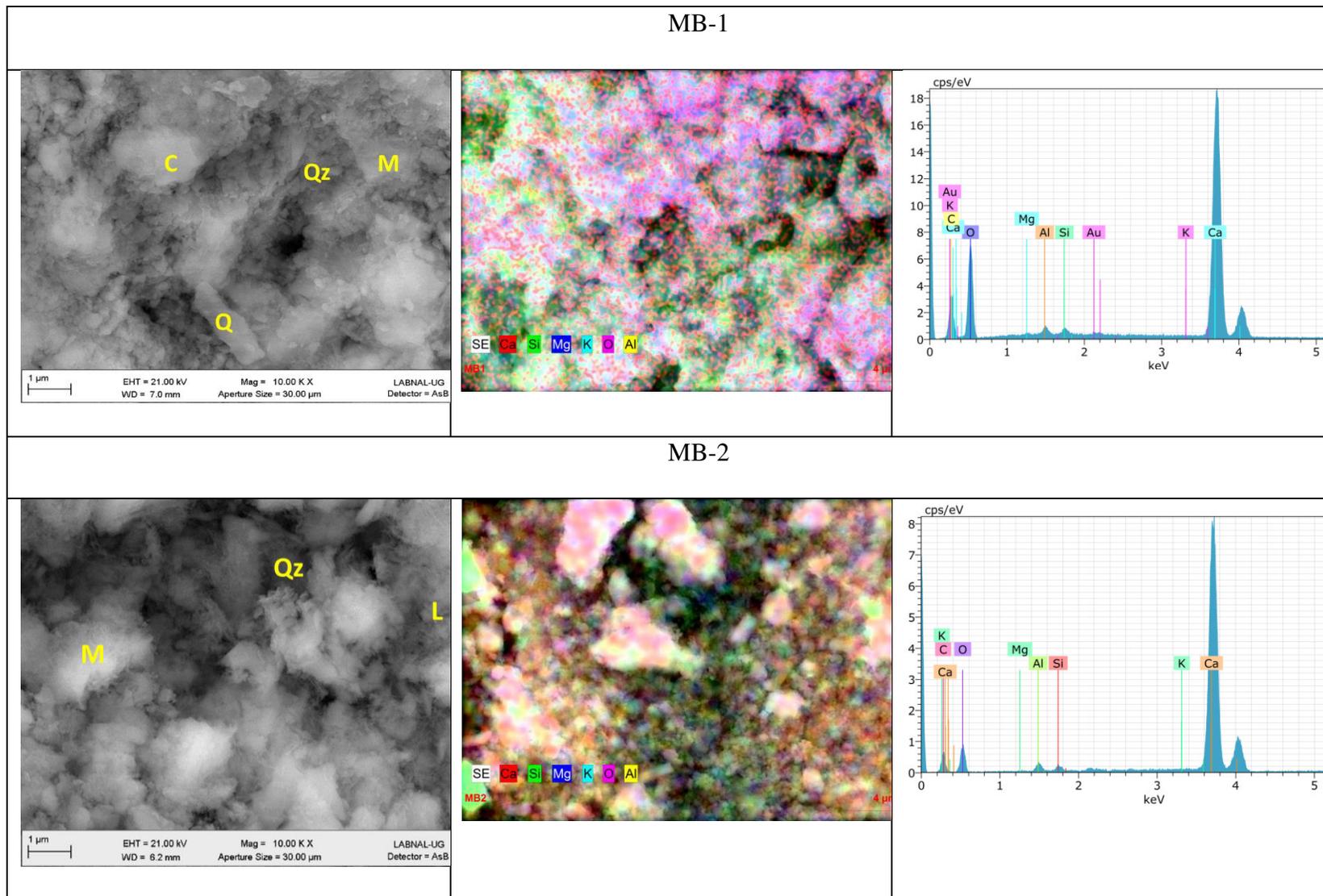


Figura 6.18. Resultados de MEB para las muestras de Banco provenientes de la comunidad de la Merced en Comonfort.

La fase cristalina en forma de agujas que son observadas tanto en las muestras de caliche de la zona arqueológica y en las muestras del banco es asignada a Leohandrita o Laumonita (L) es una zeolita con composición de $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$, que cristaliza en forma de agujas. Ghobarkar y colaboradores ^[40] investigaron las diferentes formas de cristalización de este mineral; teniendo que la formación de las agujas se debe a la cristalización de los planos $\{110, 1\bar{1}0, 1\bar{1}1, 111\}$, véase Figura 6.19. Es decir, de acuerdo con la morfología y la composición observada en los caliches del sitio y del banco es probable que parte del calcio presente en las muestras se encuentre en forma de Leohandrita.

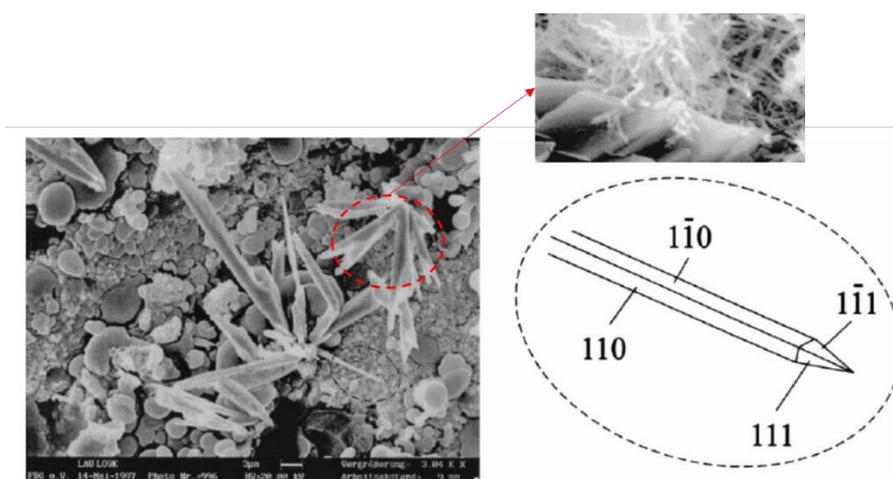
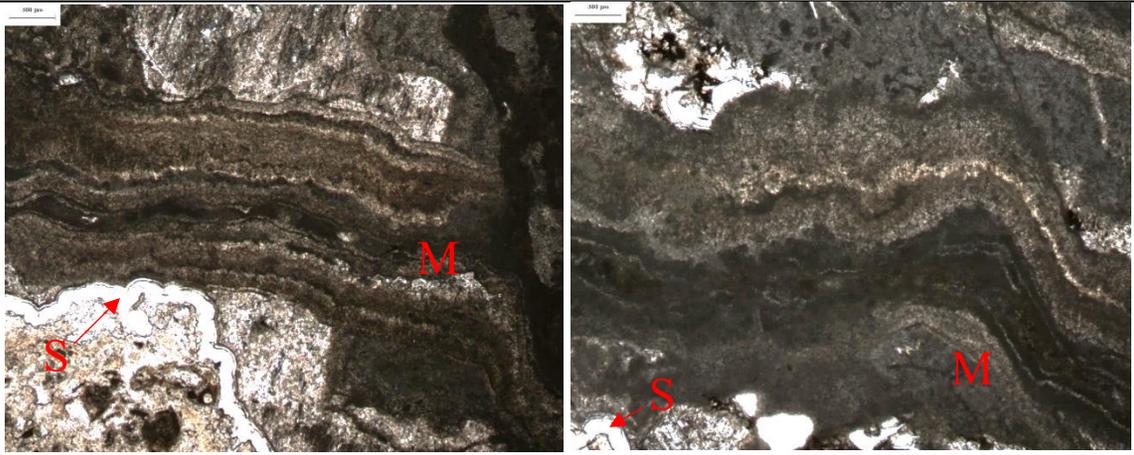
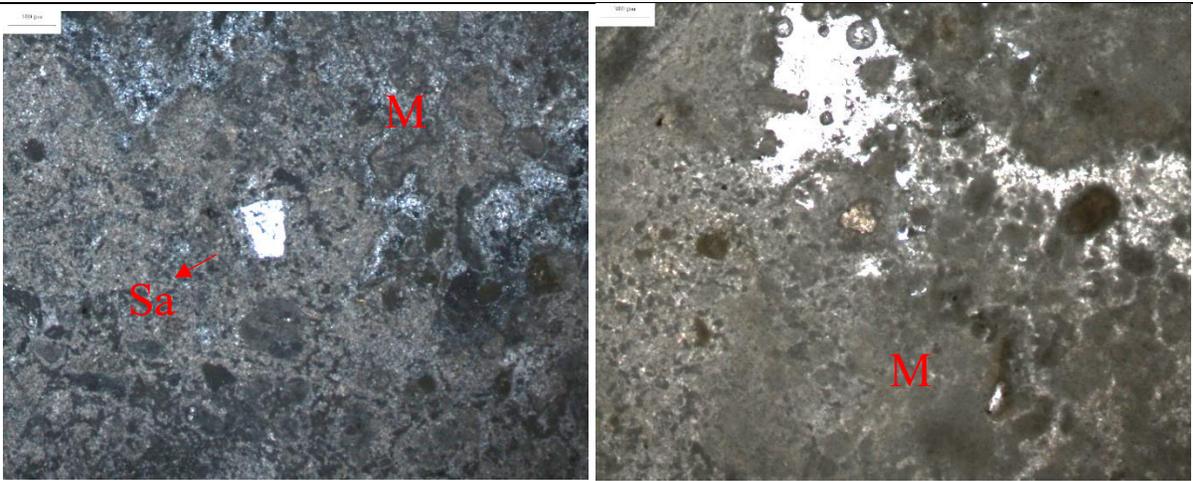


Figura 6.19. Morfología de acuerdo a los planos cristalizados de la Leohandrita o Laumonita ^[40].

La Tabla 6.11 muestra los resultados obtenidos del análisis petrográfico; donde se puede indicar que las muestras del banco en la Merced tienen un parecido mineralógico a las del caliche del sitio, ya que éstas presentaron una matriz de micrita con textura bandeada, y se diferencian por tener una pátina de sílice. También, se pudieron detectar cristales de cuarzo y sanidina en pequeñas proporciones.

Tabla 6.11. Análisis Petrográfico para las muestras proveniente del Banco de la comunidad de la Merced, Comonfort.

Muestra	Petrografía	Fases Identificadas
MB-1		<p>Matriz Micrita: M Sílice: S Textura: bandeada</p>
MB-2		<p>Matriz Micrita: M Sanidina: Sa Textura: bandeada</p>

De acuerdo con el análisis químico y mineralógico de las muestras provenientes del banco de la comunidad de la Merced; se realizó un mapa de distribución que se muestra en la Figura 6.21. El mapa tiene como objetivo señalar la distribución de contenido identificado (silicatos o carbonatos) en la zona muestreada. Donde se puede observar que entre las coordenadas 2,288,901 mN,319,358 mE (MB-1) y 2,289,022 mN, 319,330 mE (MB-2) se tomaron muestras de material con altos contenidos de carbonatos, que fueron detectados a lo largo de las cotas de elevación 1884 y 1870 msnm., hasta llegar al camino de terracería que conduce al banco de material.

Esta zona se caracterizó por presentar una costra de 8cm de espesor aproximadamente, donde se podía observar su textura bandeada (Figura 6.20). La muestra MB-3 también presentó altos contenidos de carbonatos, sin embargo, menores a las dos anteriores. Agrupando estas tres muestras, se sombrea de color verde la zona que podría ser de interés para la extracción de material para restauración para el sitio arqueológico o bien de posible origen del material constructivo del sitio. El resto del área de muestreo fue señalado con un sombreado color rojo, que se caracterizó por ser material volcanosedimentario con altos contenidos de silicatos, con una composición ajena a la de interés del proyecto.



Figura 6.20. Patina carbonatada bandeada presente en las muestras con altos contenidos de carbonatos.

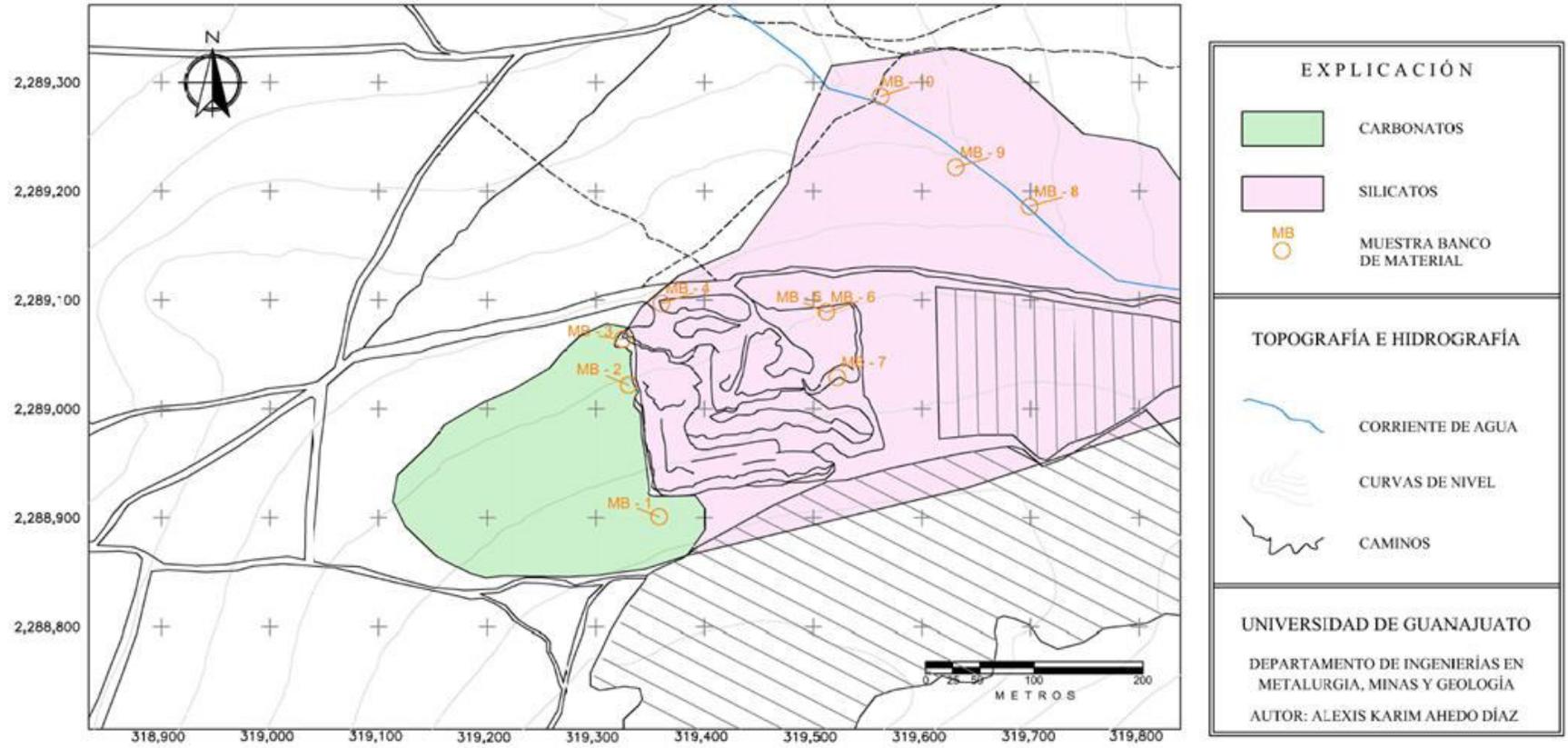


Figura 6.21. Distribución del tipo de roca presente en la Comunidad de la Merced, Comonfort, Gto.

De acuerdo con los análisis químicos y mineralógicos se permite proponer el balance de fases mineralógicas que se muestra en la Tabla 6.12; a diferencia de las muestras de caliche, las muestras de banco contienen menor cantidad de carbonato incrementando su porcentaje de aluminosilicatos y cuarzo.

Tabla 6.12. Balance mineralógico para las muestras provenientes del banco de la comunidad de la Merced.

Minerales	% Fases	
	MB-1	MB-2
Micrita con Calcita (CaCO_3)	46.7	74.7
Aluminosilicatos con K; Plagioclasa $((\text{NaCa})\text{SiAl}_3\text{O}_8$ y biotita $(\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OHF})_2$	14.02	11.7
Aluminosilicatos con alto contenido de calcio	31.77	9.6
Cuarzo/ SiO_2 -amorfa	7.51	3.99

6.4. Caracterización Física

Entre las propiedades físicas que se analizaron a los materiales fue la densidad. La densidad promedio reportada para el caliche débil (*softpand*) proveniente del Mediterráneo se encuentra entre 2.32 a 2.54 g/cm^3 [41]; de acuerdo con los resultados experimentales (Figura 6.22) La densidad de las muestras de caliche provenientes del sitio arqueológico tienen una densidad promedio de $2.197 \pm 0.169 \text{ g/cm}^3$; encontrándose en el rango del valor reportado para esta roca calcárea. Sin embargo, la densidad determinada para las muestras del banco presentó valores entre 31.3% y 39.38% menores a la de una caliza ya que la densidad de las muestras MB-1 y MB-2 (ricas en carbonato) su valor promedio fue de 1.87 ± 0.283 . La densidad promedio para las muestras de banco pobre en carbonato fue de 1.65 ± 0.417 y la densidad para las muestras ricas en silicatos fue de 1.795 ± 0.869 .

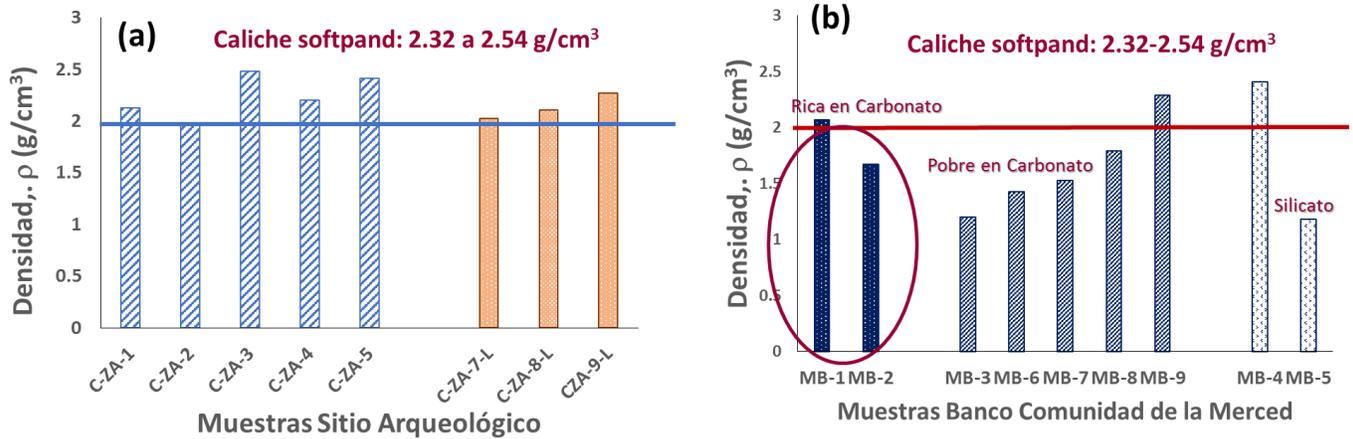


Figura 6.22. Densidad medida para las muestras (a) caliche proveniente del sitio arqueológico (b) Muestras de banco de la comunidad de la Merced.

La porosidad accesible al agua fue determinada para las muestras (Figura 6.23) teniendo que la porosidad reportada para caliche softpand se encuentra entre 16 a 34% [41]. Se determinaron dos valores de porosidad para el caliche del sitio; una de 7.19 ± 0.356 y otra de 27.68 ± 1.492 . Mientras que para las muestras del banco se determinaron valores de: 3.21 ± 0.943 (MB-ricas en carbonato), 17.72 ± 0.121 y 2.58 ± 0.095 para las muestras pobres en carbonatos y ricas silicatos.

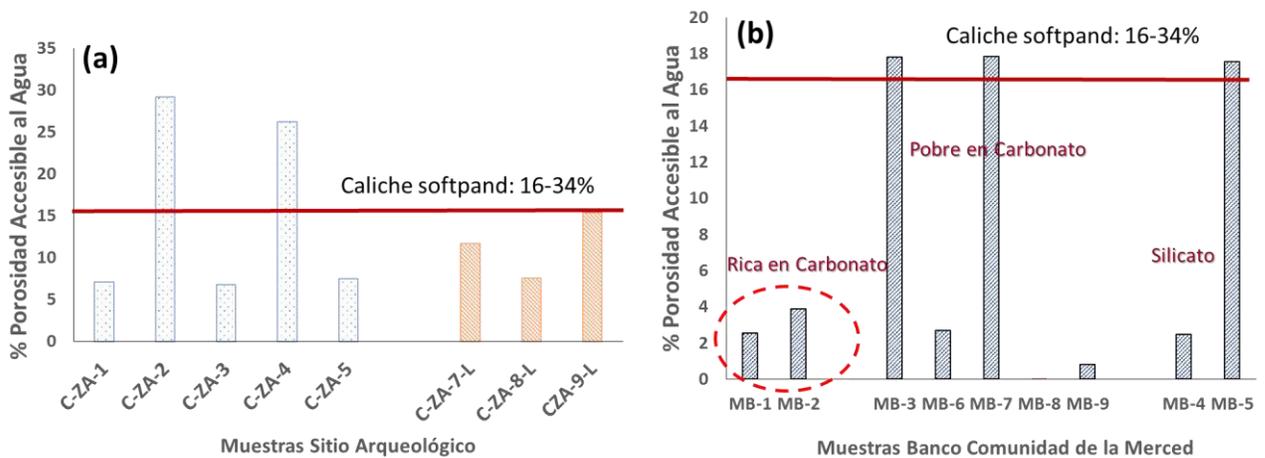


Figura 6.23. Porosidad accesible al agua medida para las muestras (a) caliche proveniente del sitio arqueológico (b) Muestras de banco de la comunidad de la Merced.

Cabe mencionar que, si bien el caliche es una roca con un alto contenido de CaCO_3 , la génesis de esta roca es diferente al de una caliza por lo que, algunas de sus propiedades físicas tienen similitud con las de una caliza como es la densidad, pero otras varían como son la porosidad accesible al agua ya que se determinaron porosidades con valores mayores al 20%; esta porosidad puede ser atribuida al contenido de zeolitas (Material silíceo) ya que éstas tienden a ser adsorbentes de grandes cantidades de agua y como se indicó anteriormente en la caracterización química y mineralógica; el CaCO_3 se encuentra cementando aluminosilicatos; teniendo una mayor concentración de éstos en las rocas proveniente de los Bancos.

6.5. Caracterización Mecánica: Resistencia a la Compresión

Entre las propiedades que deben ser determinadas en las muestras se encuentra la resistencia mecánica; esta se calculó mediante los ensayos de compresión uniaxial; las gráficas de esfuerzo-deformación para algunas de las muestras de caliche provenientes del sitio arqueológico pueden ser consultadas en el Apéndice 3. De dichas gráficas se determinó el esfuerzo máximo (σ_u) que indica la resistencia a la compresión de éstos materiales.

La Figura 6.24 muestra los valores calculados para las muestras de caliche del sitio; las muestras de caliche se dividen en tres zonas: Zona de resistencia baja con resistencia promedio de $6.62 \pm 3.05 \text{ MPa}$ (CZA-2 y CZA-4), de resistencia moderada en $17.05 \pm 4.58 \text{ MPa}$ (CZA-1, CZA-3 y CZA-6L) y de resistencia alta en $27.07 \pm 4.72 \text{ MPa}$ (CZA-5, CZA-7L y CZA-8L). Dincer y colaboradores han reportado que la resistencia a la compresión para muestras de caliche provenientes de Andana Turquía se encuentra entre 3 y 10.41 MPa; estos materiales presentaron como principales fases mineralógicas la calcita y cuarzo ^[42]. Por lo que se puede indicar que el caliche proveniente de la zona arqueológica tiene la resistencia mecánica promedio reportada para los depósitos de carbonato secundarios formados en zonas áridas.

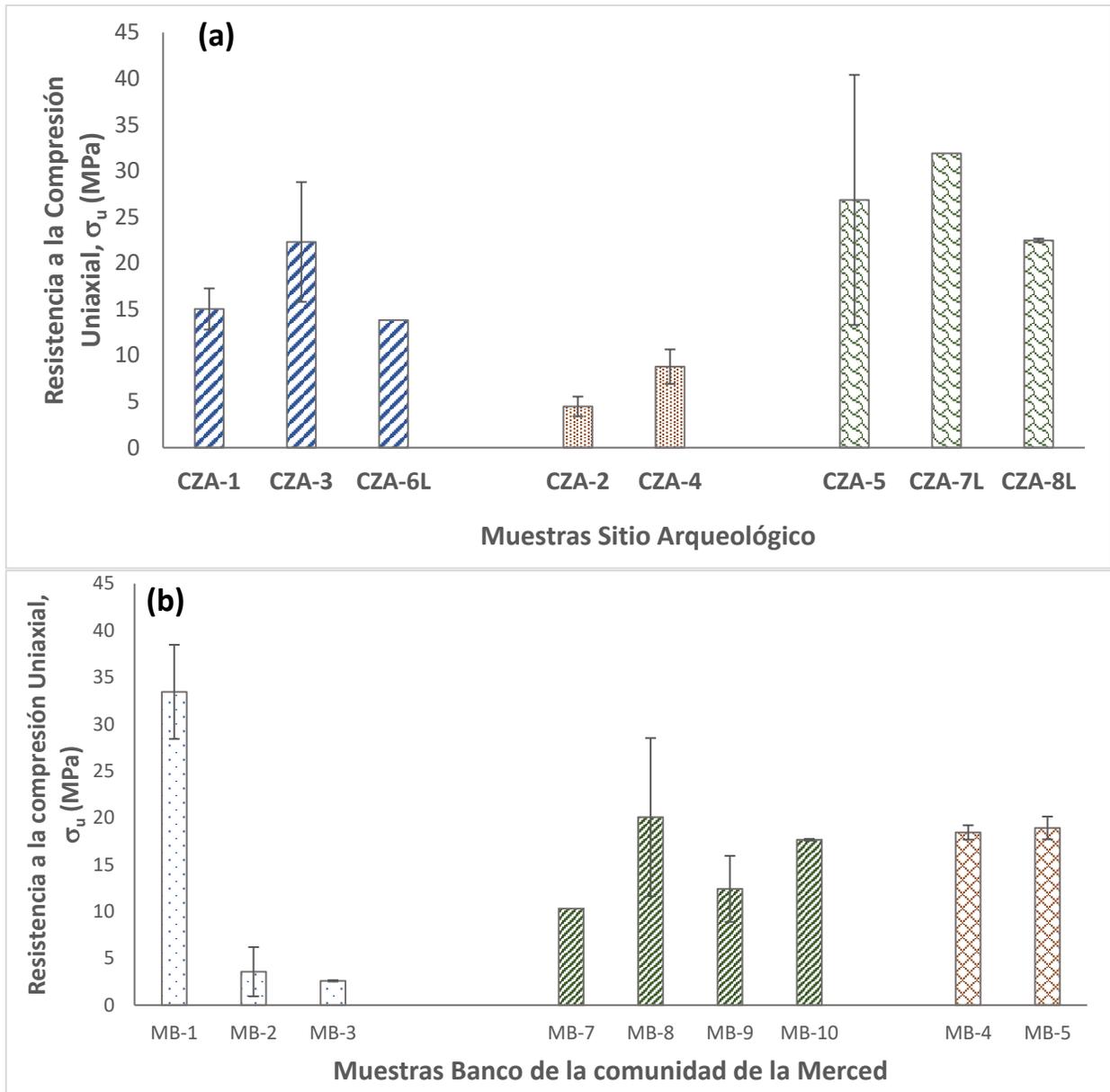


Figura 6.24. Resistencia a la compresión (a) caliche de zona arqueológica (b) muestras de banco de la comunidad de la Merced.

Por su parte, las muestras provenientes del banco de la comunidad de la Merced mostraron tener una resistencia mecánica variada; las muestras base silicato se encuentran en 18.67 ± 0.33 MPa (MB-4 y MB-5); mientras que las muestras pobres en carbonatos en 15.11 ± 4.52 MPa (MB-7, MB-8, MB-9 y MB-10). Las muestras ricas en carbonatos se dividieron en dos grupos: una de alta resistencia en 33.44 ± 5.022 MPa (MB-1) y la de baja resistencia en 3.08 ± 0.69 (MB-2 y MB-3). Kilic y colaboradores realizaron un estudio sobre

las propiedades mecánicas de diferentes tipos de rocas reportando que la resistencia a la compresión para diferentes tobas (volcanoclástica) se encuentra entre los 6 a 37 MPa; específicamente para la toba riolítica en 18 MPa [43].

En función de los datos obtenidos de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales se obtiene la distribución que se muestra en la Figura 6.25; donde se señala que las únicas muestras de banco que tienen similitud con las propiedades de los caliches fueron las muestras del Banco 1, 2 y 3. Por lo que se propone que las muestras MB2 y MB3 podrían ser empleadas como material de restauración para los caliches con resistencia mecánica de baja a moderada; mientras que la muestra MB-1 se puede emplear para restaurar el caliche con resistencia mecánica alta. Finalmente, se descarta la hipótesis de la posibilidad de que el material del sitio arqueológico provenga de dicha ubicación debido a las discrepancias indicadas en sus propiedades físicas, químicas y mecánicas; son parecidas mas no iguales.

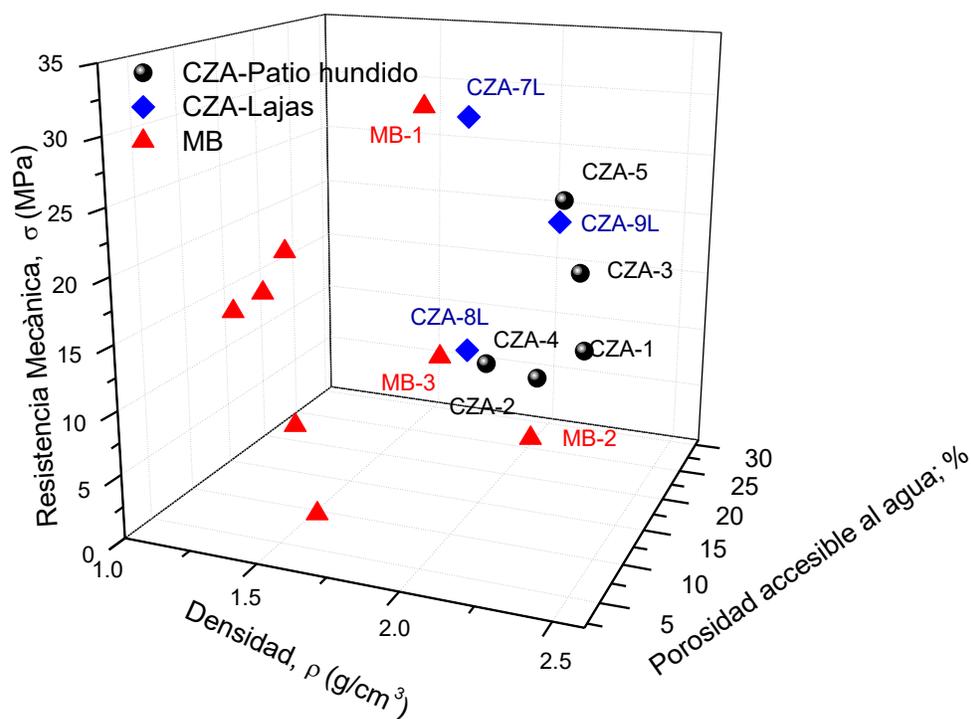


Figura 6.25. Distribución de muestras de acuerdo con propiedades físicas y mecánicas.

6.6. Caracterización Mecánica: NIIT

La Nanoidentación (NIIT) es una técnica que permite caracterizar de forma puntual las propiedades mecánicas de los materiales; es decir, si el material tiene una composición uniforme las curvas de Carga/Desplazamiento (P-h) medidas en diferentes posiciones deberán ser muy similares; sin embargo, si la composición es heterogénea se observará un cambio de desplazamiento en las curvas. Por lo tanto, para realizar esta caracterización se seleccionaron las muestras que se indican en la Tabla 6.13, considerando un muestreo de los caliches del sitio arqueológico que abarcaran comportamientos con baja resistencia mecánica, moderada y alta resistencia a la compresión.

Tabla 6.13. Muestras seleccionadas para la realización de NIIT.

Muestra	Resistencia Mecánica	Fases Identificadas
CZA-2	Baja	Micrita, Calcita, Cuarzo y Ferromagnesiano
CZA-3	Moderada	Micrita, Calcita, Cuarzo y Ferromagnesianos.
CZA-9L	Alta	Micrita, calcita

La Figura 6.26 muestra las curvas P-h obtenidas para las muestras de caliche; donde se observa que en cada muestra se identifican fases con diferente comportamiento mecánico (diferente capacidad de desplazamiento). Para los caliches con baja resistencia se identificaron 3 grupos; los cuales soportaron una carga máxima promedio de 9.98 ± 0.262 mN; pero con diferente capacidad de desplazamiento (1800 nm, 4000 nm y 6520 nm). Por su parte, para los caliches de resistencia moderada y alta se realizó el ensayó con valores de P_{max} en 10 mN y 50mN; para estos materiales también se observó diferente capacidad de desplazamiento.

La Tabla 6.14 resume la carga máxima y los desplazamientos (h_{max} y h_f) promedios registrados para los caliches; además, se indica el porcentaje de recuperación elástica

observada en las fases. La recuperación elástica se determinó de acuerdo a la diferencia medida entre el h_{max} y h_f . En todas las muestras analizadas se identificaron tres grupos con capacidad de recuperación elástica; las cuales se encuentran en el orden de: 3.52%, 10-16 % y recuperaciones mayores al 20%.

Tabla 6.14. Carga y desplazamientos registrados por NIIT para los caliches de la zona arqueológica.

		Carga máxima, P_{max} (mN)	Desplazamiento máximo, h_{max} (nm)	Desplazamiento después de la descarga, h_f (nm)	% Recuperación Elástica
CZA-2 Resistencia Baja	Grupo 1	9.903±0.394	1813.59±356.58	1588.58±331.71	12.44±3.72
	Grupo 2	10.02±0.156	3145.23±461.46	2826.07±413.15	10.09±2.59
	Grupo 3	9.937±0.047	6272.32±250	6049.11±174.11	3.52±1.07
CZA-3 Resistencia moderada	Grupo 1	10.04±0.023	943.39±206.57	761.71±212.55	20.16±4.6
	Grupo 2	10.03±0.07	1841.44±145.55	1605.59±154.39	12.88±2.98
	Grupo 3	49.88±0.17	2732.36±409.21	2331.06±368.36	14.74±2.84
CZA-8L Resistencia alta	Grupo 1	10.16±0.293	1155.77±415.96	989.58±410.025	16.01±6.45
	Grupo 2	50.026±0.12	1533.32±210.53	1145.23±153.29	24.906±8.42
	Grupo 3	50.17±0.104	3232.24±4.25	2784.48±9.34	13.96±0.401

Los ensayos se realizaron empleando dos cargas diferentes (10 mN y 50 mN) sin embargo, como se puede observar en la Tabla 6.15 que resume la resistencia mecánica, el módulo elástico y la dureza Vickers calculados por NIIT para las muestras de caliche se encontró similitud en el valor de la resistencia mecánica para las fases que muestran el mismo comportamiento de desplazamiento (% de recuperación elástica) lo que indica que son la misma fase mineralógica.

Entonces, se procedió a realizar la correlación entre las fases mineralógicas identificadas con el análisis químico y mineralógico (calcita y micrita, cuarzo, aluminosilicatos) con las diferentes resistencias mecánicas observadas por NIIT. La asociación fue realizada de acuerdo con la resistencia mecánica reportadas por Kilic y colaboradores para diferentes minerales; ellos reportaron una resistencia de 210 MPa para la cuarcita (roca metamórfica rica en cuarzo), para calcitas entre 163-112 MPa, tobas entre 37–6 MPa y Andesita en 56 MPa ^[43]. Por otra parte, varios autores han realizado estudios sobre las propiedades mecánicas de suelos tratados con carbonato de calcio; encontrando resistencias a la compresión bajas entre 0.66 a 1.2 MPa ^[44].

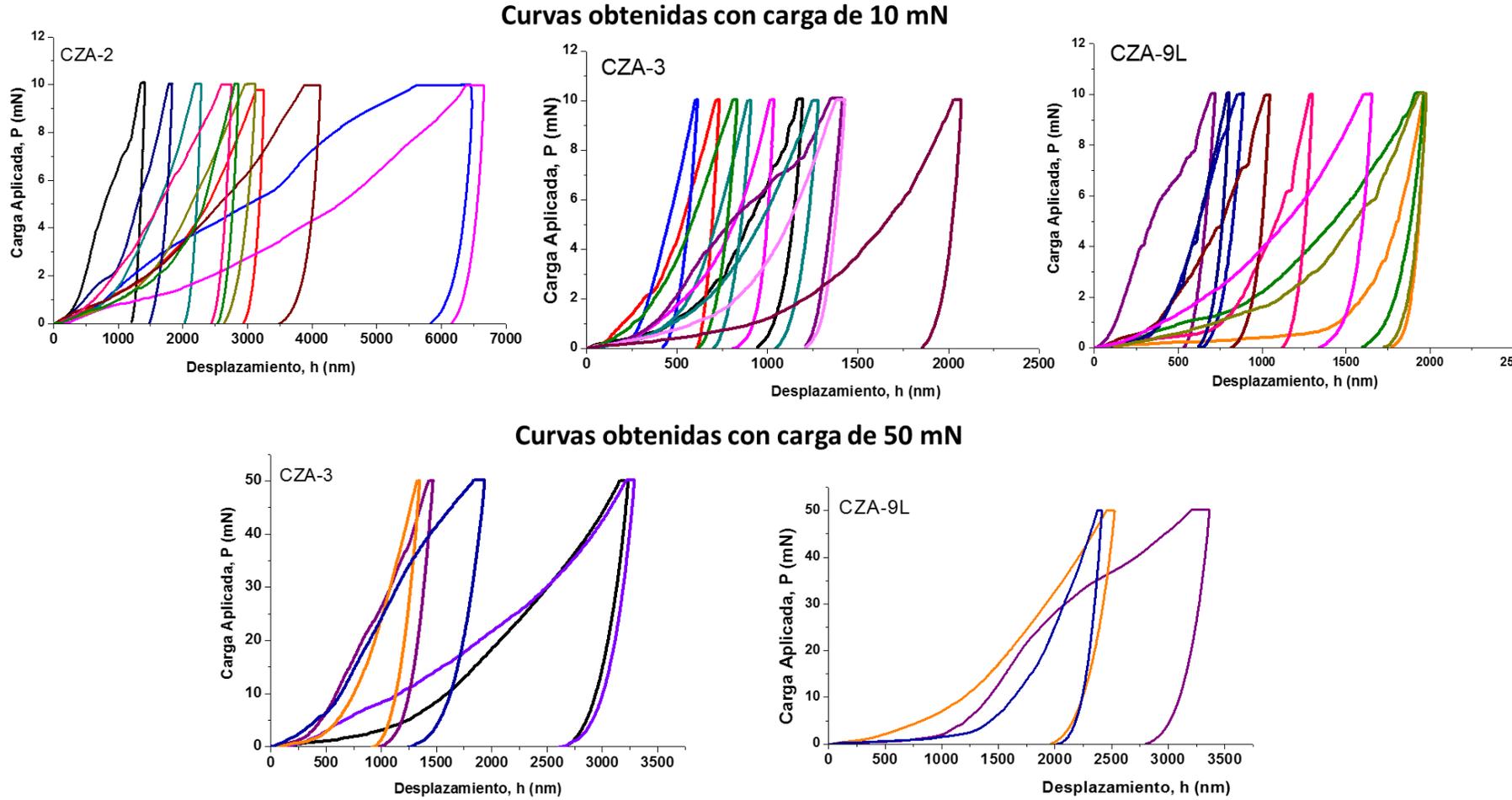


Figura 6.26. Curvas P-h para las muestras de caliche proveniente del sitio arqueológico.

Tabla 6.15. Propiedades mecánicas calculadas por NIIT para las muestras de caliche provenientes del sitio arqueológico.

		Resistencia Máxima O&P*, σ (MPa)	Módulo Elástico, E (GPa)	Dureza Vickers (HV)	Material Asociado ⁺
CZA-2 Resistencia Baja	Grupo 1	148.47±57.52	8.28±1.52	13.75±5.33	Aluminosilicatos
	Grupo 2	48.93±6.88	3.76±0.94	4.53±1.04	Feldespatos
	Grupo 3	9.80±0.30	1.40±0.06	0.908±0.03	Calcita; Micrita
CZA-3 Resistencia moderada	Grupo 1	312.30±117	20.30±3.6	28.9±10.8	Cuarzo/Sílice
	Grupo 2	125.56±21.18	10.41±1.93	11.63±1.96	Aluminosilicatos
	Grupo 3	325.07±	1.07±7.41	34.08±1.26	Cuarzo/Sílice
CZA-8L Resistencia alta	Grupo 1	368±13.61	17.38±5.6	30.10±6.97	Cuarzo/Sílice
	Grupo 2	209.97±6.24	12.14±0.39	19.45±0.58	Cuarzo/Sílice
	Grupo 3	122.57±15.47	36.22±2.92	113.51±14.24	Aluminosilicatos

*Cálculos realizados de acuerdo con el método de Oliver & Pharr [31].

6.7. Modelo de Predicción de Resistencia Mecánica

La Tabla 6.16 resume las propiedades mecánicas determinadas para las principales fases mineralógicas observadas en las muestras de caliche; estas se determinaron como un promedio de las observadas por NIIT (Tabla 6.15). Es decir, debido a que se conoce la composición de estas fases en el caliche, podría predecirse la resistencia mecánica de estos materiales de acuerdo con la Ecuación 6.1 (Método 1) donde x_i es la fracción masa de cada componente y σ_i la resistencia mecánica de éstos. Además; debido a que la principal fase en los caliches es el carbonato de calcio; la resistencia se podría predecir considerando al caliche como un material binario. Por lo tanto, la resistencia de estos materiales se determina de acuerdo con la Ecuación 6.2 (Método 2) donde x_1 y σ_1 denotan la fracción en masa y la resistencia mecánica para el CaCO_3 ; mientras que x_2 es calculada como $(1-x_1)$ y σ_2 corresponde a la resistencia de la fase que representa la diferencia entre los tres tipos de caliche; para los caliches con baja resistencia se considera los feldespatos, para los de moderada resistencia los aluminosilicatos y para los caliches con alta resistencia el cuarzo.

$$\sigma = \sum_{i=1}^n x_i \sigma_i \text{------(EC. 6.1)}$$

$$\sigma = x_1 \sigma_1 + x_2 \sigma_2 \text{------(EC. 6.2)}$$

Tabla 6.16. Propiedades mecánicas promedio para las principales fases mineralógicas presentes en las muestras de caliche.

	Resistencia Máxima, σ (MPa)	Módulo Elástico, E (GPa)	Dureza Vickers (HV)
Calcita/Micrita	9.8	1.4	0.908
Feldespatos	48.93	3.76	4.53
Cuarzo/Sílice	335.12±29.18	19.58±1.94	31.03±2.71
Aluminosilicatos	132.20±16.19	18.30±1.51	12.69±1.49

La Figura 6.27 compara los dos métodos propuestos para predecir la resistencia de los caliches con los datos experimentales determinados; donde se puede apreciar un mejor ajuste con el método 2. La inexactitud del Método 1 probablemente se deba a que si bien se puede realizar una reconstrucción mineralógica de los materiales las distribuciones de los componentes en la matriz no pueden ser determinadas. Entonces, el Método 1 considera una distribución homogénea de los componentes en la roca que debería generar un comportamiento isotrópico; lo anterior solo puede cumplirse en rocas con composición muy homogénea y sin estratificación que no es el caso para el material caliche.

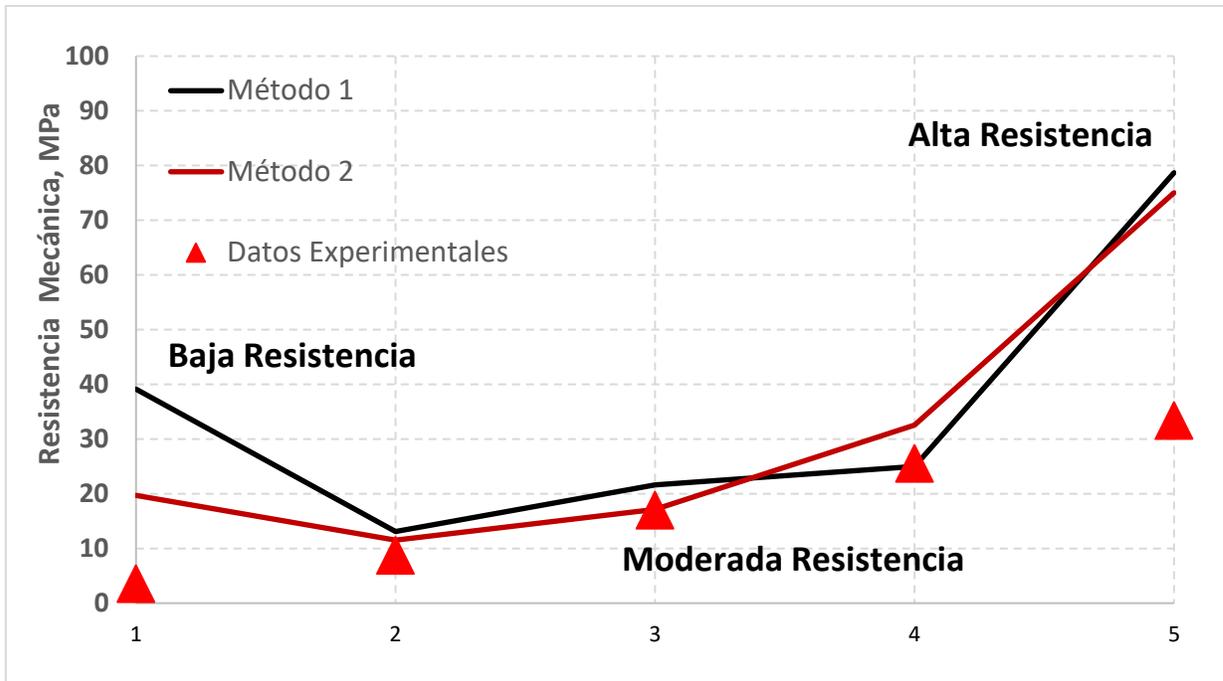


Figura 6.27. Resultados de predicción de la resistencia mecánica de acuerdo con la composición de los caliches

En los dos métodos se observa un comportamiento lineal de la resistencia con la composición del material (contenido de carbonato; véase Figura 6.28) determinando un mejor ajuste de los datos experimentales con el Método 2; de manera que la resistencia del material en MPa se puede predecir con la Ecuación 6.3; donde x denota la concentración de CaCO_3 en fracción masa. A mayor concentración de CaCO_3 predominará la resistencia mecánica de la micrita (0.66 a 9.8 MPa) y conforme disminuya la concentración de micrita se observarán resistencias de aluminosilicatos o cuarzo.

$$\sigma = -444.28x + 437.29 \text{ --- Ec. 6.3}$$

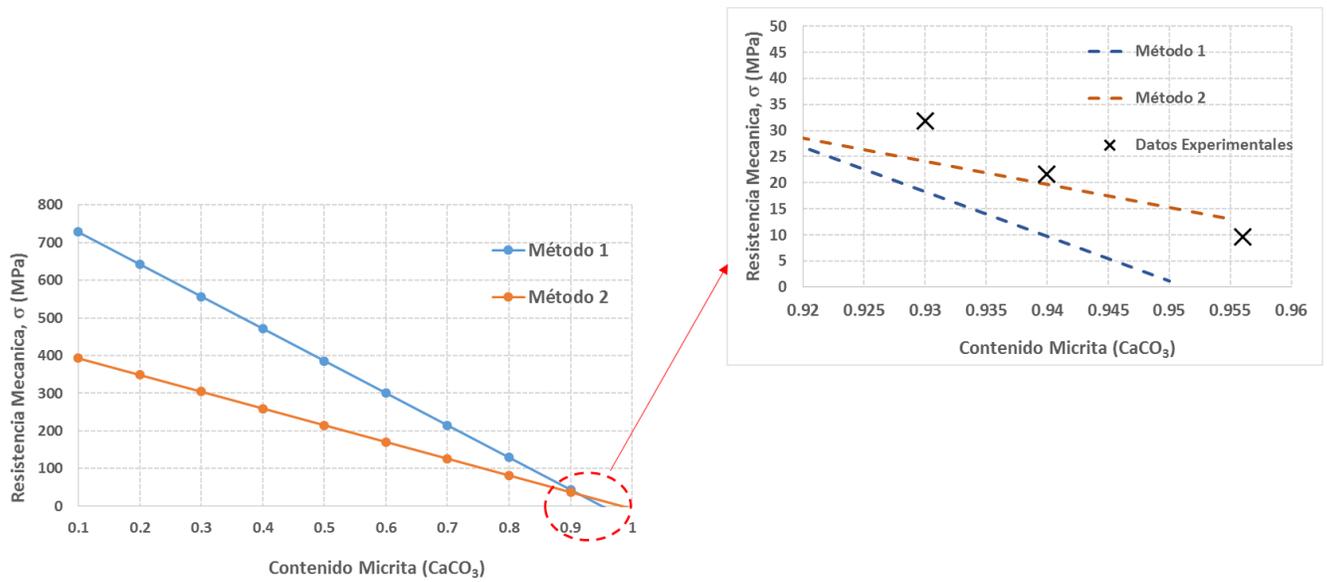


Figura 6.28 Comportamiento teórico de la resistencia mecánica de caliches con respecto al contenido de CaCO_3 .

Por otra parte, conociendo la resistencia mecánica del caliche se puede predecir otras propiedades mecánicas como son la dureza Vickers (HV) y el módulo de elasticidad (E). Las dos propiedades presentaron un comportamiento lineal con R^2 mayor a 0.90 como se puede observar en la Figura 6.29.

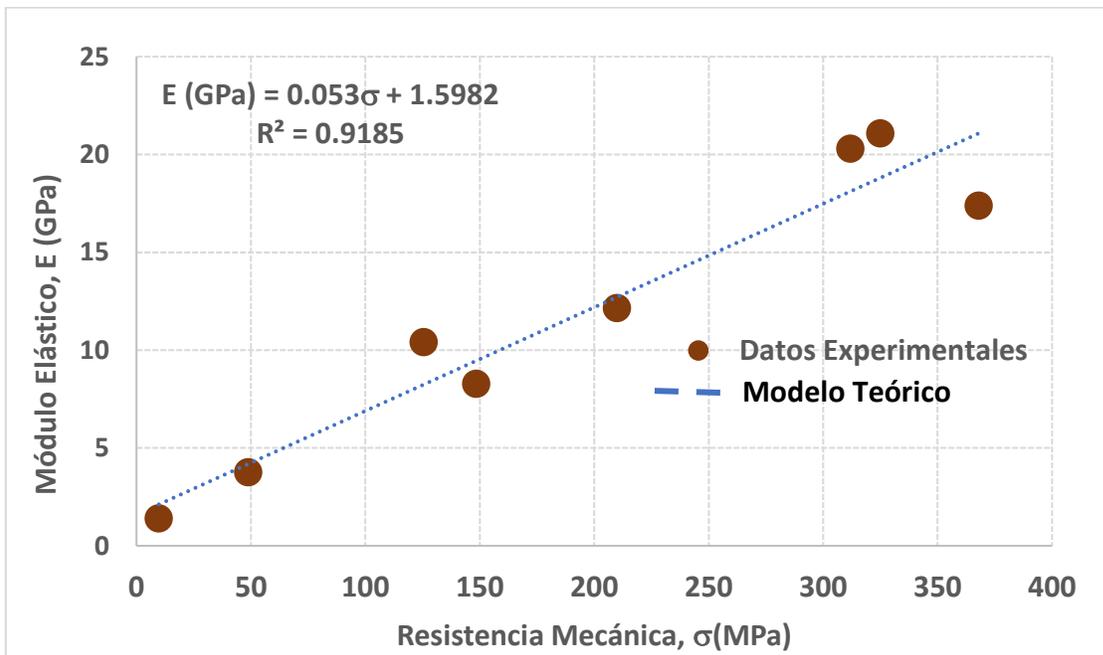
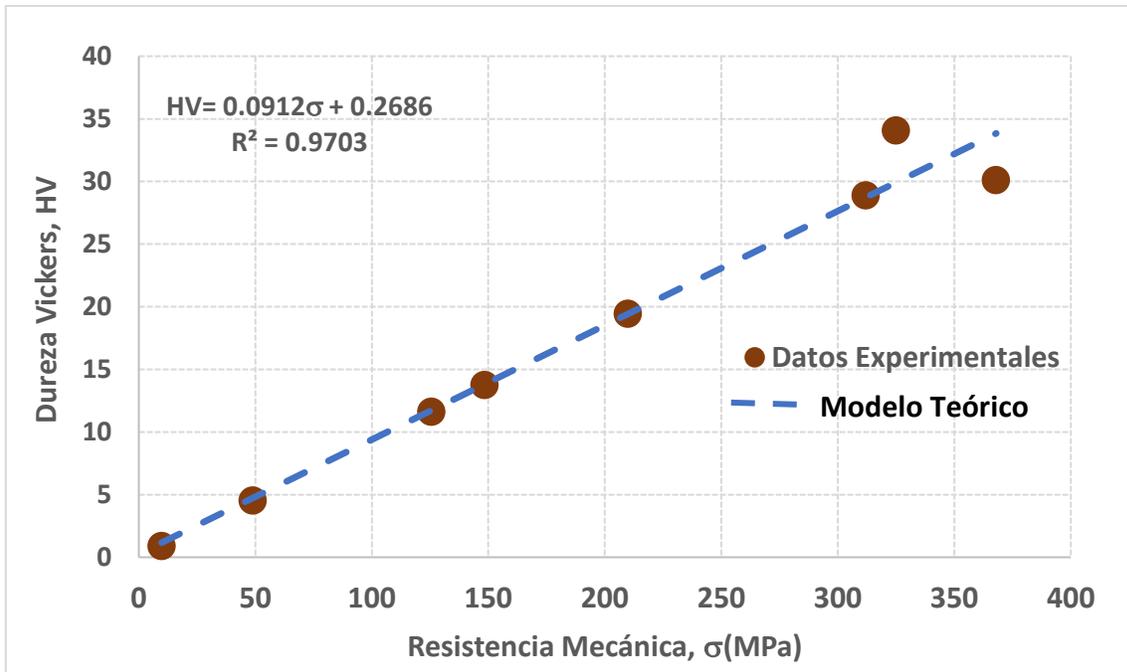


Figura 6.29. Comportamiento de HV y E de acuerdo con la resistencia del material

CONCLUSIONES

Los análisis químicos para las muestras de caliche del sitio arqueológico mostraron altos contenidos de CaCO_3 y se identificaron a la vez contenidos subordinados de Si, S, Al, Mg, K y Fe, elementos que se asocian a su contenido mineral observado en la petrografía, tales como la micrita, calcita, cuarzo (o sílice), aluminosilicatos y feldespatos cuya presencia fue confirmada por DRX. La MEB indicó que hay similitud cristalográfica entre las distintas muestras del sitio arqueológico identificando por EDS la distribución composicional de la red cristalina que señala que el carbonato de calcio se encuentra cementando la materia silícica presente en porcentajes muy bajos.

De acuerdo con el análisis químico y mineralógico (DRX y petrografía) las muestras del sitio arqueológico se caracterizaron por presentar altos contenidos de carbonato de calcio desde 93 hasta 96%; la petrografía y MEB indicaron que el CaCO_3 no se encuentra cristalizado como calcita; sino más bien se trata de una fase microcristalina, micrita; por ello la resistencia mecánica (6.62 MPa hasta 37.68 MPa) y las propiedades físicas de estos materiales se asemejan a los caliches del Mediterráneo tipo softpand (materiales blandos). Sin embargo, la resistencia mecánica incrementa acorde con las fases mineralógicas observadas; por ejemplo, los **caliches de alta resistencia** (CZA-9L con resistencia de 27 MPa) en DRX se identificaron la calcita, sílice amorfa y cuarzo; mientras que para los **caliches de resistencia baja y moderada** por DRX solo fue observada la calcita y sílice amorfa.

Respecto a las muestras del Banco de la Merced, sólo 3 resultaron de interés de acuerdo con el contenido de carbonato en las muestras, mismo que varió entre el 46.7 y 74.7%. La petrografía y la DRX de las muestras MB-1 y MB-2 señalaron a la calcita (micrita) como la fase predominante y cuarzo, sílice, feldespatos, aluminosilicatos y posiblemente leonhardita como minerales secundarios. De acuerdo con la composición y propiedades físicas y mecánicas de estas muestras (Figura 6.25) la muestras MB-1 puede emplearse como banco de material para los caliches de alta resistencia y las muestras de MB-2 y MB-3 para los caliches de baja y moderada resistencia. Se descarta la hipótesis inicial de la posibilidad de que el banco de material en la Merced pudiera ser el sitio de proveniencia del material constructivo

del sitio arqueológico, esto debido a sus diferencias en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y mineralógicas, a pesar de su cercanía con el sitio arqueológico.

Finalmente, conociendo las propiedades químicas, físicas y mecánicas del caliche es posible generar modelos que permitan predecir la resistencia del material en función de la composición del mismo tal y como se mostró con la Ecuación 6.3 y Figura 6.29; donde se observó un comportamiento lineal entre la resistencia del material y el contenido de carbonato en la roca.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Zamora Ayala V. (2004). Asentamientos prehispánicos en el Estado de Guanajuato, *Acta Universitaria*. 14(2) 25-44.
- [2] Darras V, Brigitte F. (2008). La cerámica de la cultura de Chupícuaro, *Arqueología Mexicana*. 92, 64-69.
- [3] Aboites V, Wilson M. (2013). Mediciones acústicas en sitios arqueológicos del estado de Guanajuato. *Acta Universitaria*. 23(2) 5-15.
- [4] Castañeda López C, García Moreno G.Z, Cárdenas García E, Torreblanca Padilla C.A (2007) Zonas arqueológicas en Guanajuato; cuatro casos: Plazuelas, Cañada de la Virgen, Peralta y El Cóporo. Fideicomiso de Administración e Inversión para la Realización de las Actividades de Rescate Conservación de Sitios Arqueológicos en el Estado de Guanajuato. Guanajuato. México.
- [5] (a) García Moreno G.Z. Cañada de la Virgen, Allende. (2005). Guanajuato: La casa de los trece cielos. *Arqueología Mexicana*. 13(73) 56-59.
(b) Torreblanca Padilla C.A. (2008). El Cóporo, Guanajuato. *Arqueología Mexicana*. 16(92) 60-63.
- [6] Secretaría de Cultura-INAH. (2018). Sistema de información Cultural. Zonas arqueológicas: *Arroyo Seco*. México.
https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=zona_arqueologica&table_id=219.
- [7] Instituto Estatal de Cultura. GTO: *Arroyo Seco*. México.
<http://cultura.guanajuato.gob.mx/index.php/arroyo-seco/>.
- [8] Cruces Cervantes, O. (2014). Cerro de los Remedios, emplazamiento Laja-Bajío. *Relacione interregionales en el centro norte de Mesoamérica*. Editado por Carlos Castañeda López. INAH-Coordinación Nacional de Arqueología. México.
- [9] *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. (2009). Clave Geoestadística 11007. INEGI.
http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/11/11007.pdf.

- [10] Aranda García M, Hernández Romano U, Ortega González V, Miranda Canseco E, Mora Oropeza G. (2010). Provincias Geológicas de México. PEMEX Exploración y Producción.
- [11] Alaniz-Álvarez S.A, Nieto-Samaniego A.F, Reyes-Zaragoza M.A, Orozco-Esquivel M.T, Ojeda-García A.C, Vassallo L.F. (2001). Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 129-148.
- [12] García, J, Castillo, F. (2002) Inventario físico de los recursos minerales del municipio Comonfort, Gto. Consejo de recursos minerales. Dirección de minas de Guanajuato. México.
- [13] Boggs S. (2009). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. 4ª Edición. Ed. Cambridge. New York; USA. Pp. 3, 159-160, 169-183, 188-190.
- [14] Folk, R.L., (1959). Practical petrographic classification of limestones. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 43: 1–38.
- [15] Kholodov V.N. (2007). Caliches: A newly-formed boundary carbonate materials in soils. *Lithology and Mineral Resources*. 42 (39) 246–256.
- [16] Sidorenko, A.V. (1958). Caliche: Limestone Accumulations in Mexican Deserts, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geogr.* 1, 15–23.
- [17] Jimenez J, Velilla N. (2004). Óptica mineral: una herramienta informática para el estudio de los minerales en el microscopio petrográfico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. 12(1) 57-61.
- [18] CX31-P Polarized Light Microscope Configuration. OLYMPUS.
<https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/techniques/polarized/cx31polconfiguration/>
- [19] Prince C.M, Ehrlich R. Analysis of Spatial Order in Sandstones. I. Basic Principles. *Mathematical Geology* (1990) 22(3) 333-359
- [20] Manual de operación del difractor de rayos X D8 ADVANCE, BRUKER AXS.
<http://www.linan-ipicyt.mx/Manual%20XRD.pdf>
- [21] Microscopios electrónicos de barrido (SEM).
<http://www.linan-ipicyt.mx/Microscopio de Barrido.html>

- [22] García Solís G.A, Mendoza Anaya D, Quintana Owen P. (2016). La escultura arquitectónica modelada en estuco de Calakmul, Campeche, México: la transformación material en el proceso tecnológico. *Intervención*. 7(14) 16-30.
- [23] Simabuco S.M, Nascimento Filho V.F. (1994). Quantitative analysis by energy dispersive X-ray fluorescence by the transmission method applied to geological samples. *Sci. Agric. Piracicaba* 51(82) 197-206.
- [24] (a) Espectrometría de fluorescencia de rayos x.
<https://www2.uned.es/cristamine/mineral/metodos/xrfs.htm>
- (b) Gázquez F, Rull F, Calaforra J.M, Venegas G, Manrique J.A, Sanz A, Medina J, Catalá-Espí A, Sansano A, Navarro R, Forti P, De Waele J, Martínez.-Frías J. (2014). Mineralogical and geochemical characterization of hydrated minerals from subterranean environments: implications for planetary exploration. *Geological studies*. 70(2) e009.
- [25] Newell J. (2010). Medición de las propiedades Mecánicas. *Ciencia de Materiales Aplicaciones en Ingeniería*. Ed. Afaomega. 67-80.
- [26] Universal tensile tester.
<https://www.shimadzu.com/an/test/universal/ags-x/ags-x.html>
- [27] Hibbeler R.C. (2012). Propiedades mecánicas de los materiales. *Mecánica de Materiales*. 8ª Edición. Pearson Editorial. México. 85-107
- [28] Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. ASTM E92-82 (reapproved 2003).
- [29] (a) Guillonneau Gaylord. (2012). Determination of mechanical properties by nanoindentation independently of indentation depth measurement. *Journal material Research*. 27(19)2551-2560.
- (b) Suarez M.P, Frontini P.M. (2016). Caracterización de materiales mediante nanoindentación y microscopia de barrido por sonda combinada. *Acta Microscopica*. 25.
- [30] Pharr G.M, Bolshakov A. (2002). Understanding nanoindentation unloading curves, *Journal Materials Reseach*. (17810) 2660-2671.
- [31] Pharr G.M, Oliver W.C. (1992). Measurement of Thin Film Mechanical Properties Using Nanoindentation. *MRS Bulletin*. 17(7) 28-33.

- [32] (a) Chattaraj S, Pant P, Nanavati H. (2018). Inter-relationships between mechanical properties of glassy polymers from nanoindentation and uniaxial compression. *Polymer*. 144, 128-141
- (b) Bei H, Lu Z.P, Shim S, Chen G, George E.P. (2010). Specimen size effects on Zr-based bulk metallic glasses investigated by uniaxial compression and spherical nanoindentation. *Metallurgical and Materials Transaction A*. 41A; 1735.
- [33] Natural stone test methods - Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity. UNE-EN 1936:2007.
- [34] Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. ASTM C1585-13.
- [35] Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. ASTM D7012-10.
- [36] (a) Vazquez T, Triviño F, Ruiz de Gauna A. (1975). Study of hydrated high aluminic cement transformation by X-ray diffraction, infra-red spectroscopy and thermal analysis: Influence of carbonic anhydrite, temperature, humidity and addition of power lime. *Construction Materials*. 25, 615-625.
- (b) De la Cruz I, Vazquez T, Fernandez Peña O. (1986). IR spectroscopy of sulphates in clinkers and cements. *Materiales de Construcción*. 36 (201)25-42.
- [37] American Mineralogist Crystal Structure Database.
<http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/amcsd.php>
- [38] Tunik A.M, Álvarez P.P. (2008). Análisis y edad de la sección calcárea de la formación las chilcas (Chile) y sus implicaciones para la correlación con unidades de argentina. *Revista de la Sociedad Geológica Argentina*. 63(3) 363-379.
- [39] Kiselva I, Navrotsky A, Belitsky A, Fursenko B.A. (1996). Thermochemistry of natural potassium sodium calcium leonhardite and its cation-exchanged forms. *American Mineralogist*. 81(5-6) 668-675.
- [40] Ghobarkar H, Schaf O. (1998). Hydrothermal synthesis of laumontite a zeolite. *Microporous and mesoporous Materials*. 23, 55-60.
- [41] Alptekin A, Bagci Z.H. (2018). Engineering properties of caliche. 9th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology. Turkey.

- [42] (a) Dincer I, Acar A, Ural S. (2008). Estimation of strength and formation properties of quaternary caliche deposits. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 67, 353-366
- (b) Zourlu K, Kasapoglu. (2009). Determination of geomechanical properties and collapse potential of a caliche by in situ and laboratory test. *Environ Geol.* 56, 1449-1459.
- [43] Kilic A, Teymen A. (2008). Determination of mechanical properties of rock using simple methods. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 67, 237-244.
- [44] (a) Park K, Jun S, Kim D. (2014). Effect of strength enhancement of soil treated with environment-friendly calcium carbonate powder. *The Scientific World Journal*. Article ID 526491.
- (b) Merkel C, Deuschle J, Griesshaber E, Enders S, Steinhauser E, Hochleitner R, Brand U, Schmahl W.W. (2009). Mechanical properties of modern calcite-(*Mergerrlia truncate*) and phosphate-shelled brachiopods (*Discradisca stella* and *Lingula anatina*) determined by nanoindentation. *Journal of structural biology.* 168, 396-408.

APÉNDICE 1

Datos de DRX empleados para la caracterización de caliches y muestras de banco

A1.1 Calcita

American Mineralogist 46 (1961) 1283-1316

Crystallographic tables for the rhombohedral carbonates

_database_code_amcsd 0000098

CELL PARAMETERS: 4.9900 4.9900 17.0615 90.000 90.000 120.000

SPACE GROUP: R-3c

X-RAY WAVELENGTH: 1.541838

Cell Volume: 367.916

Density (g/cm³): 2.710

MAX. ABS. INTENSITY / VOLUME**2: 26.50717622

2-THETA	INTENSITY	D-SPACING	H	K	L	Multiplicity
23.07	8.1	3.855	0	1	2	6
29.42	100	3.0357	1	0	4	6
31.46	2.43	2.8436	0	0	6	2
36	13.71	2.495	1	1	0	6
39.44	20.16	2.2848	1	1	3	12
43.19	14.26	2.0946	2	0	2	6
47.15	6.16	1.9275	0	2	4	6
47.54	19.67	1.9125	0	1	8	6
48.54	20.02	1.8754	1	1	6	12
56.61	3.73	1.6259	2	1	1	12
57.44	9.18	1.6042	1	2	2	12
60.72	5.28	1.5253	2	1	4	12
61.05	2.41	1.5179	2	0	8	6
61.43	3.18	1.5094	1	1	9	12
63.1	2.29	1.4733	1	2	5	12
64.71	6.84	1.4405	3	0	0	6
65.67	3.91	1.4218	0	0	12	2
69.24	1.51	1.3569	2	1	7	12
70.3	2.13	1.339	0	2	10	6
72.95	2.69	1.2967	1	2	8	12
77.23	1.93	1.2353	1	1	12	12
81.6	2.24	1.1799	2	1	10	12
83.84	1.57	1.1539	1	3	4	12

A1.2 Cuarzo

Levien L, Prewitt C T, Weidner D J

American Mineralogist 65 (1980) 920-930

Structure and elastic properties of quartz at pressure; P = 1 atm

_database_code_amcsd 0000789

CELL PARAMETERS: 4.9160 4.9160 5.4054 90.000 90.000 120.000

SPACE GROUP: P3_221

X-RAY WAVELENGTH: 1.541838

Cell Volume: 113.131

Density (g/cm3): 2.645

2-THETA	INTENSITY	D-SPACING	H	K	L	Multiplicity
20.87	19.93	4.2574	1	0	0	6
26.65	69.9	3.3446	0	1	1	6
26.65	30.1	3.3446	1	0	1	6
36.56	7.13	2.458	1	1	0	3
39.49	1.01	2.2818	0	1	2	6
39.49	6.18	2.2818	1	0	2	6
40.31	3.19	2.2375	1	1	1	6
42.47	5.25	2.1287	2	0	0	6
45.81	1	1.9806	0	2	1	6
45.81	2.09	1.9806	2	0	1	6
50.17	12.58	1.8184	1	1	2	6
54.9	3.09	1.6723	0	2	2	6
55.37	1.61	1.6593	0	1	3	6
59.98	4.11	1.5423	2	1	1	6
59.98	4.94	1.5423	1	2	1	6
64.08	1.72	1.4532	1	1	3	6
67.78	1.38	1.3826	2	1	2	6
67.78	4.18	1.3826	1	2	2	6
68.19	1.36	1.3753	0	2	3	6
68.19	5.31	1.3753	2	0	3	6
68.34	4.13	1.3726	0	3	1	6
73.53	1.73	1.288	1	0	4	6
75.7	1.91	1.2565	3	0	2	6
79.93	2.3	1.2002	2	1	3	6
81.24	2.41	1.1842	1	1	4	6

A1.3 Andesita

FitzGerald J D, Parise J B, Mackinnon I D R

American Mineralogist 71 (1986) 1399-1408

Average structure of an An₄₈ plagioclase from the Hogarth Ranges

Sample: Neutron data

Locality: Hogarth Ranges, Australia

_database_code_amcsd 0001052

CELL PARAMETERS: 8.1790 12.8800 7.1120 93.440 116.210 90.230

SPACE GROUP: C-1

X-RAY WAVELENGTH: 1.541838

Cell Volume: 670.583

Density (g/cm³): 2.673

2-THETA	INTENSITY	D-SPACING	H	K	L	Multiplicity
13.7	8.13	6.4649	-1	1	0	2
13.78	1.02	6.4247	0	2	0	2
13.91	1.24	6.3656	0	0	1	2
15.19	2.89	5.832	-1	-1	1	2
15.68	1.54	5.6503	-1	1	1	2
18.94	6.11	4.6861	0	-2	1	2
21.97	85.49	4.045	-2	0	1	2
22.83	18.4	3.8958	1	-1	1	2
23.66	28.72	3.7609	1	1	1	2
23.7	41.19	3.7547	-1	3	0	2
24.42	34.71	3.6449	1	3	0	2
24.53	12.18	3.6289	-1	-3	1	2
25.46	1.09	3.4986	-1	3	1	2
25.63	13.52	3.4755	-1	-1	2	2
25.96	4.99	3.4326	-2	-2	1	2
26.45	24.27	3.3695	-1	1	2	2
27.6	51.27	3.2325	-2	2	0	2
27.77	62.65	3.2123	0	4	0	2
27.82	94.38	3.2072	-2	0	2	2
28.03	100	3.1828	0	0	2	2
28.43	41.66	3.139	2	2	0	2
29.56	22.77	3.0216	1	-3	1	2
30.29	26.58	2.9507	0	-4	1	2
30.47	17.51	2.9335	0	-2	2	2
30.66	10.3	2.916	-2	-2	2	2
31.5	23.4	2.8402	1	3	1	2
31.76	7.81	2.8177	-1	-3	2	2
33.75	13.63	2.6554	-1	3	2	2
35.33	3.09	2.5404	2	-2	1	2

35.58	29.12	2.5232	-2	-4	1	2
35.59	4.02	2.5229	-3	-1	2	2
35.6	4.41	2.5221	1	-1	2	2
35.8	19.2	2.508	-2	4	1	2
35.86	1.47	2.5039	-3	1	2	2
36.55	2.6	2.4582	-2	4	0	2
36.78	3.22	2.4436	2	2	1	2
37.17	4.34	2.4188	-1	-5	1	2
37.2	4.07	2.4167	-3	1	0	2
37.69	3.31	2.3866	3	1	0	2
37.86	4.26	2.3765	2	4	0	2
38.24	3.1	2.3536	-1	5	1	2
39.07	5.49	2.3053	-3	3	1	2
39.39	6.56	2.2876	-3	-3	1	2
39.72	3.23	2.2693	-1	1	3	2
40.07	1.63	2.2503	1	-3	2	2
40.51	3.91	2.2271	1	-5	1	2
40.53	2.31	2.226	-2	4	2	2
41.28	1.7	2.1869	0	4	2	2
41.8	2.08	2.1611	-2	2	3	2
41.92	1.22	2.155	-3	3	0	2
42.15	1.13	2.1439	-1	-5	2	2
42.2	9.86	2.1416	0	6	0	2
42.53	12.75	2.1254	2	-4	1	2
42.97	8.07	2.105	1	5	1	2
43.17	1.95	2.0957	-3	1	3	2
43.23	1.28	2.0926	3	3	0	2
44.77	1.03	2.0244	-1	5	2	2
44.81	2.77	2.0225	-4	0	2	2
44.99	3.3	2.015	-4	0	1	2
45.24	1	2.0042	2	0	2	2
45.45	1.56	1.9956	3	-1	1	2
45.47	1.9	1.9948	-1	3	3	2
45.61	4.65	1.9888	0	6	1	2
46.18	1.52	1.9656	3	1	1	2
46.63	3.13	1.9479	2	-2	2	2
47.02	3.44	1.9326	-4	-2	2	2
47.2	9.92	1.9258	-4	2	2	2
48.41	7.49	1.8804	2	2	2	2
48.49	5.38	1.8773	-2	6	0	2
49.23	1.23	1.851	3	-3	1	2

49.24	11.39	1.8506	-4	0	3	2
49.65	3.37	1.8363	0	-6	2	2
49.73	13.1	1.8334	4	0	0	2
49.76	2.91	1.8322	1	-1	3	2
49.85	2.55	1.8294	0	-4	3	2
50.05	5.17	1.8224	2	6	0	2
50.29	3.41	1.8145	-2	-6	2	2
50.79	8.92	1.7977	1	1	3	2
50.86	2.54	1.7952	-1	7	0	2
51	1.03	1.7905	-4	-2	3	2
51.22	1.12	1.7835	-1	-7	1	2
51.49	22.79	1.7747	-2	0	4	2
52.28	5.73	1.7498	2	-4	2	2
52.3	1.98	1.7493	-2	6	2	2
52.32	1.35	1.7484	1	5	2	2
52.36	1.62	1.7474	4	2	0	2
52.38	1.18	1.7466	-1	7	1	2
52.67	3.01	1.7377	-2	-2	4	2
52.98	1.33	1.7283	1	-3	3	2
53.17	2.91	1.7227	0	6	2	2
53.29	3	1.7191	-4	4	1	2
53.36	1.9	1.717	0	4	3	2
53.38	5.85	1.7163	-4	-4	2	2
53.7	3.53	1.7068	-4	4	2	2
54.1	1.77	1.6951	-4	-4	1	2
54.46	3.37	1.6848	-2	2	4	2
54.75	1.55	1.6766	-3	-5	3	2
55.53	3.64	1.655	2	4	2	2
56.37	1.42	1.6321	-3	-3	4	2
56.77	1.12	1.6216	-4	-4	3	2
56.83	1.49	1.6199	3	-5	1	2
57.12	3.87	1.6125	-3	5	3	2
57.37	2.12	1.6062	0	8	0	2
58.27	1.48	1.5835	-5	1	1	2
58.27	1.42	1.5834	0	-8	1	2
58.8	1.85	1.5705	-4	-2	4	2
58.81	2.45	1.5702	0	-2	4	2
59.92	2.96	1.5438	3	5	1	2
60.01	2.07	1.5416	-4	2	4	2
60.07	1.28	1.5403	2	-2	3	2
60.21	1.04	1.5369	1	-7	2	2

60.93	1.11	1.5205	0	2	4	2
61.17	1.93	1.5152	-2	4	4	2
61.36	1.55	1.5108	2	-6	2	2
62.04	4.88	1.496	-2	-8	1	2
62.32	5.81	1.49	-2	8	0	2
62.36	1.07	1.4891	3	3	2	2
62.49	4.12	1.4864	-5	-3	3	2
62.66	1.05	1.4825	-5	-3	1	2
62.83	5.25	1.4791	-4	6	1	2
63	1.66	1.4754	0	-8	2	2
63.14	2.33	1.4724	-5	3	3	2
63.46	3.59	1.4659	-4	6	2	2
63.85	5.35	1.4579	0	6	3	2
64.08	3.97	1.4531	2	8	0	2
64.66	3.52	1.4416	2	-4	3	2
65.28	2.04	1.4293	-5	1	4	2
65.76	3.8	1.4201	2	6	2	2
65.93	1.24	1.4168	-4	6	0	2
66.03	1.45	1.4148	2	-8	1	2
66.28	1.8	1.4102	1	1	4	2
67.05	2.26	1.3959	4	4	1	2
67.23	3.39	1.3925	1	9	0	2
67.65	5.35	1.3848	1	-3	4	2
67.77	2.48	1.3828	-4	6	3	2
67.81	1	1.382	-1	9	1	2
67.95	3.28	1.3795	-5	-3	4	2
68.3	1.08	1.3734	5	3	0	2
68.37	2.89	1.3721	1	-9	1	2
68.49	2.12	1.3699	4	6	0	2
68.52	2.47	1.3695	2	4	3	2
68.66	4.05	1.367	-4	0	5	2
69.05	6.69	1.3602	-6	0	2	2
69.46	4.71	1.3531	-1	-9	2	2
69.59	6.49	1.3509	4	0	2	2
69.62	2.13	1.3505	-4	-2	5	2
69.72	1.69	1.3488	2	8	1	2
70.07	3.07	1.3429	-1	1	5	2
70.44	1.12	1.3367	4	-2	2	2
70.54	1.75	1.3351	-5	5	3	2
70.94	1.37	1.3285	-6	-2	2	2
71.14	1.67	1.3253	0	-8	3	2

71.34	2.73	1.322	-1	-3	5	2
71.37	1.18	1.3216	0	-6	4	2
71.43	1.1	1.3206	3	1	3	2
71.6	1.07	1.3179	-6	2	3	2
72.89	1.63	1.2978	-1	9	2	2
73.2	3.07	1.2931	2	-8	2	2
73.97	1	1.2814	-6	0	4	2
74.73	1.08	1.2702	4	-4	2	2
74.82	1.48	1.269	2	0	4	2
74.84	1.11	1.2686	-3	9	1	2
75.05	1.31	1.2657	-4	8	1	2
75.06	1.07	1.2656	0	-2	5	2
75.33	4.26	1.2616	-4	-8	2	2
75.7	2.11	1.2564	-6	4	2	2
75.87	3.48	1.254	-4	8	2	2
76.44	2.36	1.246	-6	-4	3	2
76.7	1.48	1.2425	-5	-3	5	2
76.87	1.05	1.2402	0	8	3	2
77.15	1.91	1.2364	-4	4	5	2
78.21	3.66	1.2223	6	0	0	2
78.24	1.33	1.2218	4	4	2	2
78.61	4.24	1.2171	2	8	2	2
79.12	1.87	1.2105	-3	5	5	2
80.49	1.16	1.1933	6	2	0	2
81.71	1	1.1785	-4	-6	5	2
82.44	1.07	1.1699	-1	5	5	2
82.66	1.37	1.1673	1	-7	4	2
82.76	1.83	1.1662	-3	9	3	2
83.61	2.2	1.1565	3	5	3	2
83.69	2.38	1.1556	-6	4	0	2
84.13	1.4	1.1506	-5	-7	4	2
84.56	2.1	1.1459	-2	6	5	2
85.42	1.14	1.1366	-1	-9	4	2
86.04	1.31	1.13	-1	-11	2	2
86.07	2.03	1.1297	6	4	0	2
86.1	1.45	1.1293	-3	-9	4	2

A1.4 Leonhandrita

Baur W H, Joswig W, Fursenko B A, Belitsky I A
European Journal of Mineralogy 9 (1997) 1173-1182
Symmetry reduction of the aluminosilicate framework of LAU topology
by ordering of exchangeable cations: the crystal structure of primary leonhardite
with a primitive Bravais lattice
_database_code_amcsd 0006703

CELL PARAMETERS: 14.5560 13.2060 7.5130 90.000 110.750 90.000

SPACE GROUP: P2/a

X-RAY WAVELENGTH: 1.541838

Cell Volume: 1350.520

2-THETA	INTENSITY	D-SPACING	H	K	L	Multiplicity
9.33	100	9.4783	1	1	0	4
12.6	2.39	7.0257	0	0	1	2
13.01	29.49	6.8059	2	0	0	2
14.28	4.14	6.2025	0	1	1	4
14.56	9.77	6.0825	-2	0	1	2
14.64	1.24	6.0498	2	1	0	4
17.47	37.78	5.0767	1	1	1	4
18.72	9.1	4.7391	2	2	0	4
19.85	29.39	4.4737	-2	2	1	4
20.7	2.87	4.2911	3	1	0	4
21.02	1.61	4.2257	1	2	1	4
21.15	22.48	4.2008	2	0	1	2
21.21	72.93	4.1884	1	3	0	4
22.21	2.32	4.0032	2	1	1	4
23.46	1.02	3.7921	-3	2	1	4
23.51	1.08	3.7836	-1	3	1	4
24.7	80.02	3.6043	-4	0	1	2
24.76	1.21	3.5956	-1	1	2	4
25.13	37	3.5443	2	2	1	4
25.35	71.77	3.5128	0	0	2	2
25.62	1.96	3.4771	-4	1	1	4
25.93	9.74	3.4366	1	3	1	4
26.25	1.22	3.3948	0	1	2	4
26.88	41.98	3.317	-3	1	2	4
27.01	50.53	3.3015	0	4	0	2
27.76	2.17	3.2142	3	1	1	4
27.96	30.63	3.1909	-3	3	1	4
28.21	1.42	3.1637	-4	2	1	4
28.25	16.88	3.1594	3	3	0	4

28.79	7.17	3.1013	0	2	2	4
29.21	58.84	3.0573	1	1	2	4
29.37	1.38	3.0413	-4	0	2	2
29.53	11.6	3.0249	4	2	0	4
30.08	7.81	2.9705	2	4	0	4
31.49	36.78	2.8412	-5	1	1	4
31.58	2.41	2.833	-2	3	2	4
32.41	23.62	2.7623	-4	2	2	4
32.56	4.1	2.7497	2	0	2	2
33.13	1.9	2.7041	-3	3	2	4
33.57	2.21	2.6696	3	4	0	4
33.66	1.99	2.6624	-5	2	1	4
34.55	41.26	2.5958	2	4	1	4
35.08	8.18	2.5577	1	3	2	4
35.36	11.56	2.5384	2	2	2	4
35.86	13.48	2.5042	-2	0	3	2
36.11	8.13	2.4876	-1	5	1	4
36.31	1.73	2.4742	-1	4	2	4
36.47	9.14	2.4638	-2	4	2	4
36.52	1.03	2.4603	-2	1	3	4
36.92	34.16	2.4345	-4	4	1	4
37.06	3.34	2.4257	-3	1	3	4
37.11	1.07	2.4227	-2	5	1	4
37.21	1.31	2.4166	-1	1	3	4
37.84	1.44	2.3776	-3	4	2	4
37.97	4.74	2.3696	4	4	0	4
38.16	6.39	2.3585	-4	0	3	2
38.16	1.77	2.3583	3	1	2	4
38.44	2.53	2.3419	0	0	3	2
38.45	6.55	2.3415	-2	2	3	4
39.48	2.81	2.2826	3	5	0	4
39.6	1.34	2.276	-6	2	1	4
39.64	3.95	2.2734	-5	3	2	4
40.32	1.1	2.2368	-4	4	2	4
40.62	2.22	2.2211	-4	2	3	4
41.01	10.33	2.201	0	6	0	2
41.31	8.28	2.1855	-6	2	2	4
41.89	11.24	2.1568	-1	5	2	4
41.97	5.3	2.1525	-3	3	3	4
42.02	1.17	2.15	-2	5	2	4
42.1	1.54	2.1462	-1	3	3	4

42.12	17.82	2.1455	6	2	0	4
43.07	4.01	2.1004	4	0	2	2
43.07	1.47	2.1004	5	4	0	4
43.07	2.61	2.1003	0	6	1	4
43.2	5.14	2.0943	4	4	1	4
43.25	2.11	2.092	-3	5	2	4
43.37	1.62	2.0865	4	5	0	4
44.7	2.32	2.0275	-6	0	3	2
44.83	3.03	2.0219	1	5	2	4
45.1	3.76	2.0101	-7	1	2	4
45.19	4.34	2.0065	2	0	3	2
45.31	6.13	2.0016	4	2	2	4
45.46	1.58	1.9952	-2	4	3	4
46.08	1.75	1.9698	-5	3	3	4
46.2	2.79	1.9649	6	0	1	2
46.43	7.11	1.9556	-5	5	1	4
46.44	1.11	1.9553	1	3	3	4
46.47	1.96	1.9542	-6	4	1	4
46.58	6.25	1.9496	2	6	1	4
46.88	1.76	1.9382	-6	2	3	4
47.35	3.84	1.9198	2	2	3	4
48.1	5.42	1.8918	-2	6	2	4
48.56	3.34	1.8749	-7	3	1	4
48.74	1.57	1.8684	-2	0	4	2
48.83	6.62	1.8651	0	6	2	4
49.02	6.02	1.8584	-3	1	4	4
49.36	2.11	1.8462	-7	3	2	4
49.58	2.67	1.8387	5	1	2	4
49.68	5.28	1.8352	-7	1	3	4
50.25	4.17	1.8157	3	1	3	4
50.52	1.82	1.8066	-8	0	1	2
51.19	3.07	1.7845	1	7	1	4
51.42	1.33	1.7772	-5	1	4	4
51.49	2.01	1.7749	3	5	2	4
51.57	6.15	1.7722	4	4	2	4
52.07	3.06	1.7564	0	0	4	2
52.36	1.07	1.7472	-3	7	1	4
53.44	5.59	1.7147	2	4	3	4
53.48	2.53	1.7134	-6	0	4	2
53.66	3.4	1.708	-7	3	3	4
53.88	5.61	1.7015	8	0	0	2

54.55	2.86	1.6824	1	5	3	4
54.9	1.01	1.6722	4	0	3	2
55.4	3.08	1.6585	-6	2	4	4
55.51	1.26	1.6554	1	1	4	4
55.61	1.23	1.6527	-3	7	2	4
55.68	2.98	1.6508	0	8	0	2
56.1	2.19	1.6395	3	7	1	4
56.16	1.9	1.6377	-8	2	3	4
56.44	4.06	1.6304	-7	5	1	4
56.6	5.31	1.6261	-2	4	4	4
57.16	3.82	1.6114	-7	5	2	4
57.31	5.33	1.6077	-7	1	4	4
57.33	1.2	1.6071	6	2	2	4
57.44	3.79	1.6042	2	8	0	4
57.61	5.18	1.6001	-9	1	2	4
57.79	3.23	1.5955	-6	6	2	4
57.88	2.39	1.5931	-2	8	1	4
58.33	1.54	1.5818	-8	4	2	4
58.42	1.09	1.5797	6	6	0	4
58.99	9.53	1.5659	7	5	0	4
59.22	1.75	1.5602	1	3	4	4
59.63	5.28	1.5506	0	4	4	4
60.23	11.41	1.5364	2	8	1	4
60.34	1.7	1.534	8	0	1	2
60.51	1.06	1.53	-3	5	4	4
60.57	1.04	1.5286	2	2	4	4
60.95	1.44	1.5201	-7	3	4	4
61.58	2.76	1.5059	3	5	3	4
61.64	2.13	1.5047	-8	4	3	4
61.82	1.81	1.5008	-4	8	1	4
62.23	1.7	1.4918	4	4	3	4
62.54	1.27	1.4852	4	8	0	4
62.59	4.31	1.4842	-2	0	5	2
63.61	2.34	1.4627	3	1	4	4
64.01	2.94	1.4547	-10	0	2	2
64.2	5.16	1.4508	-4	8	2	4
64.56	1.22	1.4435	7	5	1	4
64.61	4.13	1.4425	-1	1	5	4
65.23	2.66	1.4304	9	3	0	4
65.53	1.85	1.4244	-2	6	4	4
65.73	1.31	1.4206	-3	3	5	4

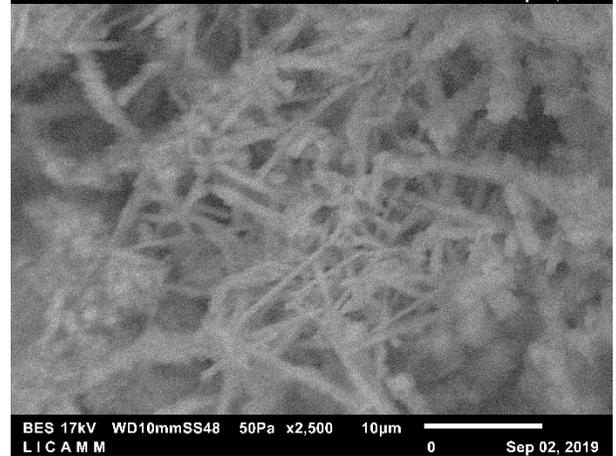
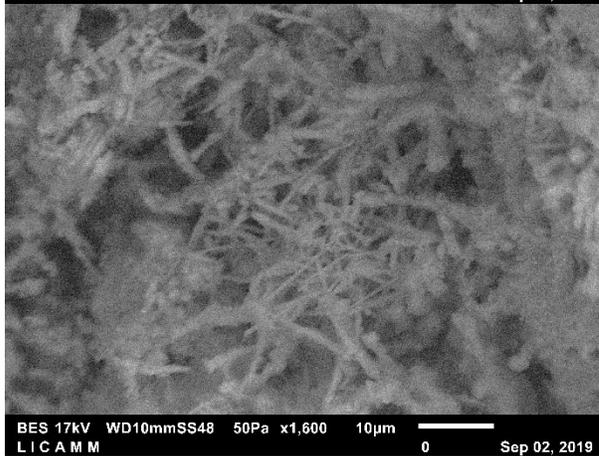
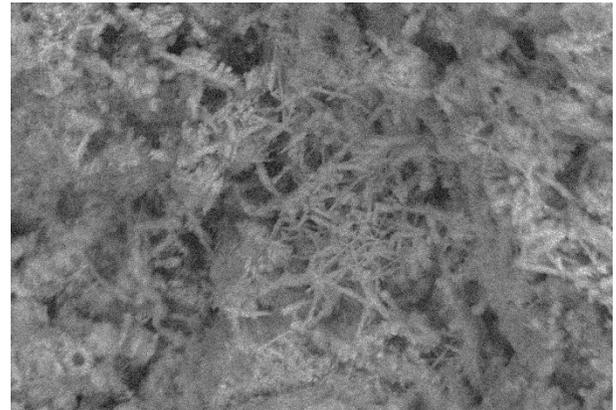
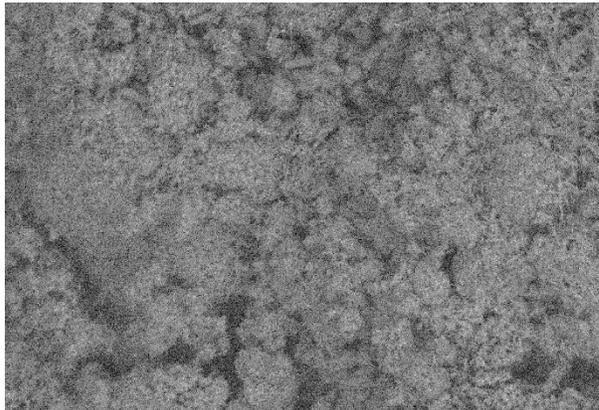
65.88	1.13	1.4177	1	9	1	4
66.05	1.88	1.4145	-10	0	3	2
66.09	4.42	1.4138	-9	1	4	4
66.55	1.26	1.4051	0	0	5	2
67.3	1.17	1.3912	8	4	1	4
67.35	3	1.3903	-7	1	5	4
68.02	2.48	1.3782	-1	3	5	4
68.15	3.26	1.376	-9	5	2	4
68.21	1.55	1.3748	4	0	4	2
68.27	1.25	1.3738	9	1	1	4
68.32	4.76	1.3729	0	6	4	4
68.58	2.75	1.3683	-9	5	1	4
69.38	1.53	1.3546	8	0	2	2
69.43	1.44	1.3537	-2	4	5	4
69.71	2.63	1.3489	-3	9	2	4
69.99	1.92	1.3443	-6	8	2	4
70.56	7.9	1.3348	6	8	0	4
70.67	1.41	1.333	-9	5	3	4
70.81	2.2	1.3306	-3	7	4	4
71.34	1.01	1.322	-7	7	3	4
71.43	3.1	1.3206	0	10	0	2
72.09	4.71	1.3101	-5	9	1	4
72.8	3.5	1.2991	7	5	2	4
73.16	2.97	1.2936	-11	1	1	4
73.49	1.72	1.2887	2	0	5	2
73.69	1.33	1.2857	3	5	4	4
74.42	6.71	1.2748	2	8	3	4
74.81	3.78	1.2692	4	4	4	4
76.33	1.83	1.2476	-11	3	3	4
76.4	2.61	1.2467	-11	3	1	4
76.67	1.04	1.243	-8	4	5	4
76.88	1.1	1.24	-4	10	1	4
77.1	1.31	1.2371	-2	8	4	4
77.17	1.79	1.2361	0	10	2	4
77.2	1.1	1.2356	-7	5	5	4
77.34	2.79	1.2338	-6	0	6	2
77.37	1.18	1.2334	9	1	2	4
77.68	1.59	1.2292	-9	3	5	4
77.96	1.98	1.2255	-9	7	2	4
79.72	1.47	1.2029	0	8	4	4
79.89	2.04	1.2007	-5	3	6	4

80.52	1.02	1.1928	-11	3	4	4
80.55	3.8	1.1925	9	3	2	4
80.65	1.11	1.1913	11	3	0	4
81.5	2.59	1.1811	-8	8	3	4
82.48	1.34	1.1694	6	8	2	4
82.59	1.33	1.1681	-2	10	3	4
83.48	1.25	1.158	7	5	3	4
83.65	2.8	1.156	-3	9	4	4
83.68	1.77	1.1558	-6	4	6	4
83.99	1.1	1.1523	-4	10	3	4
85.52	1.29	1.1355	-9	7	4	4
86.19	1.31	1.1284	-5	5	6	4
86.37	2.25	1.1265	6	4	4	4
86.68	1.09	1.1233	-7	7	5	4
88.62	1.39	1.1036	0	4	6	4

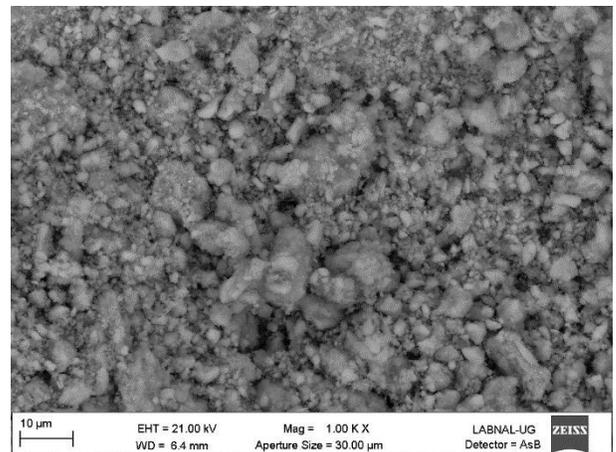
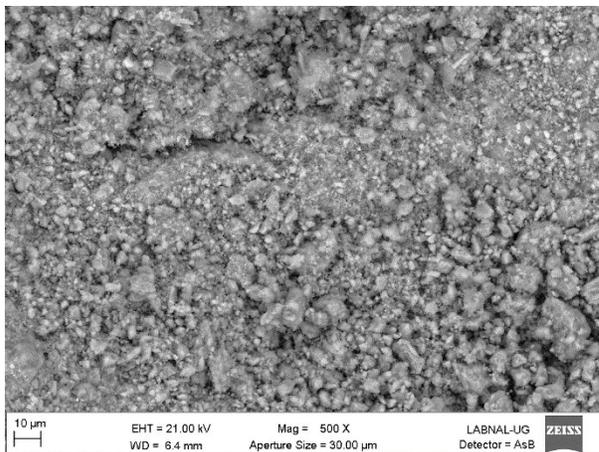
APÉNDICE 2

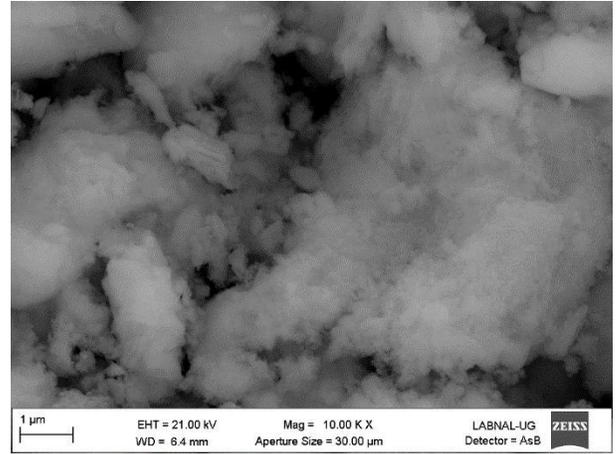
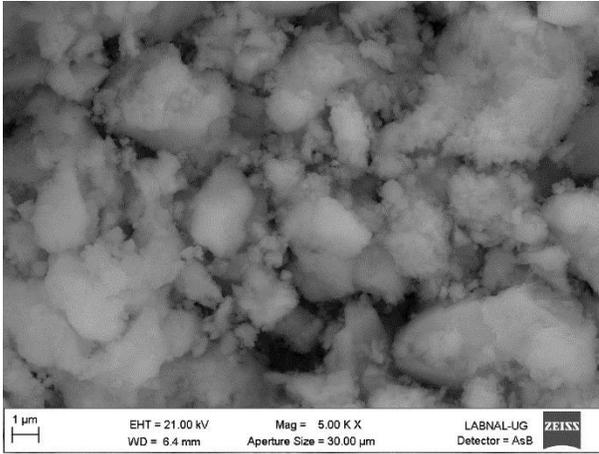
MEB para muestras de caliche y banco con diferente magnificación

CZA-2

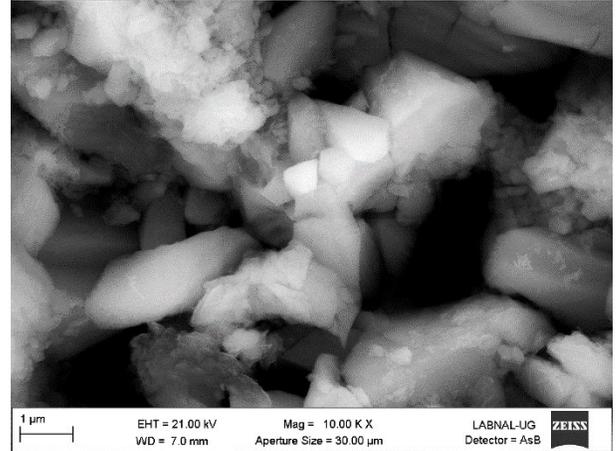
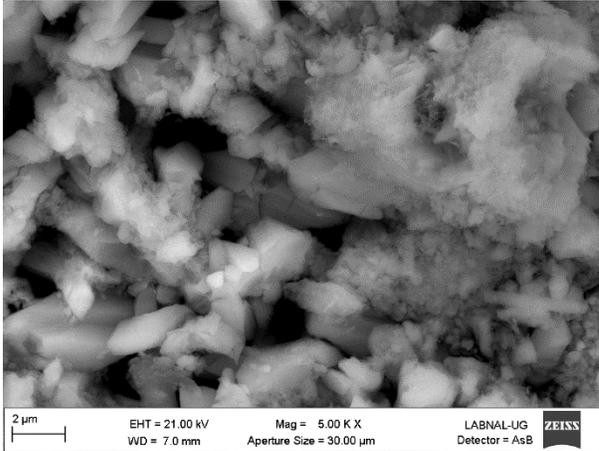
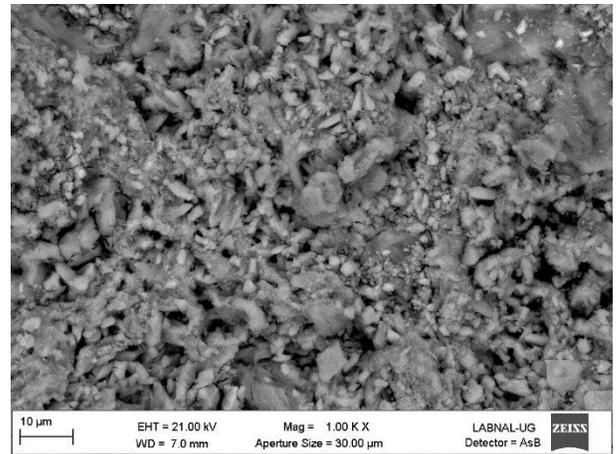
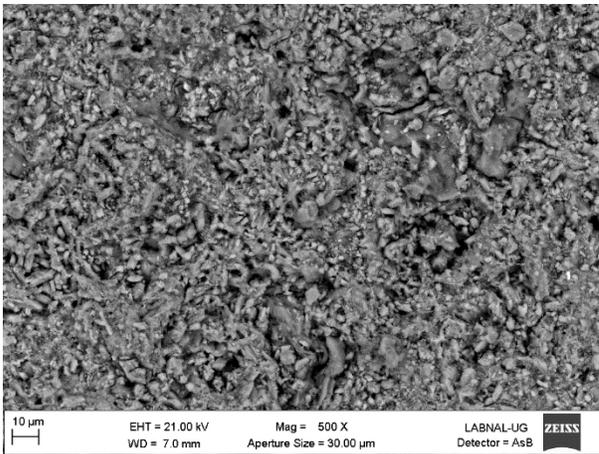


CZA-3

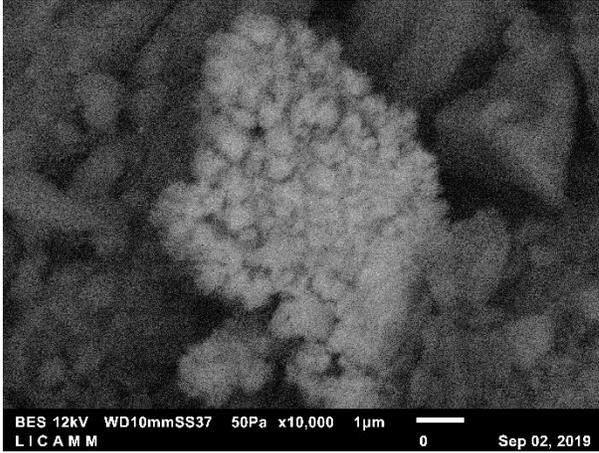
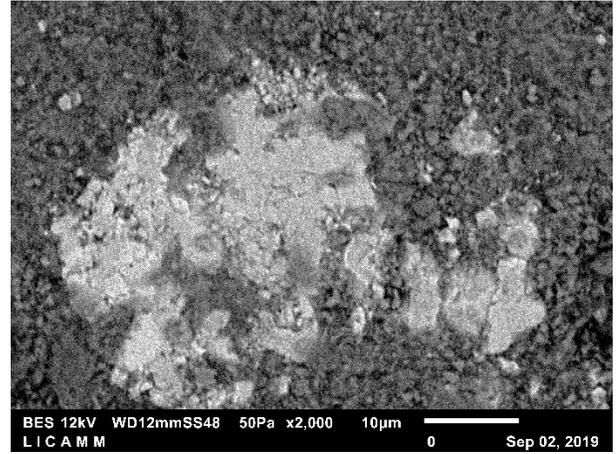
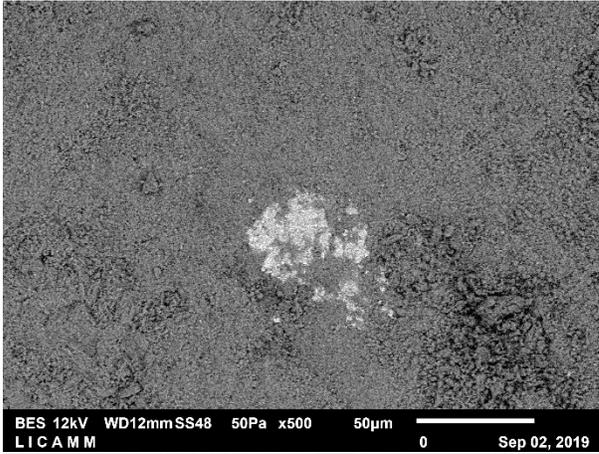




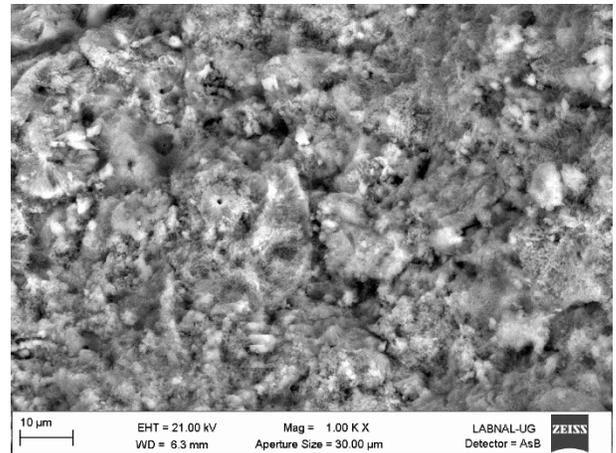
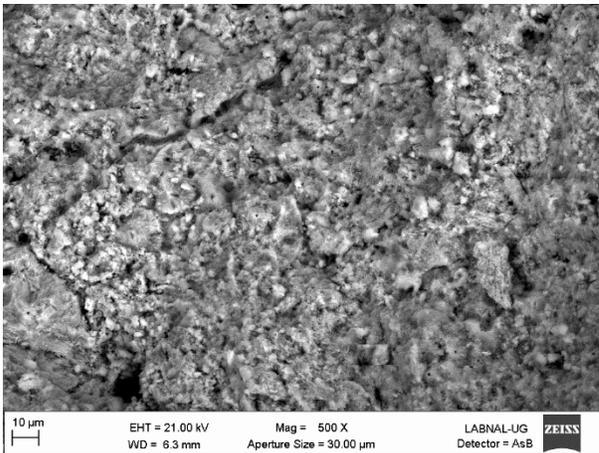
CZA-4

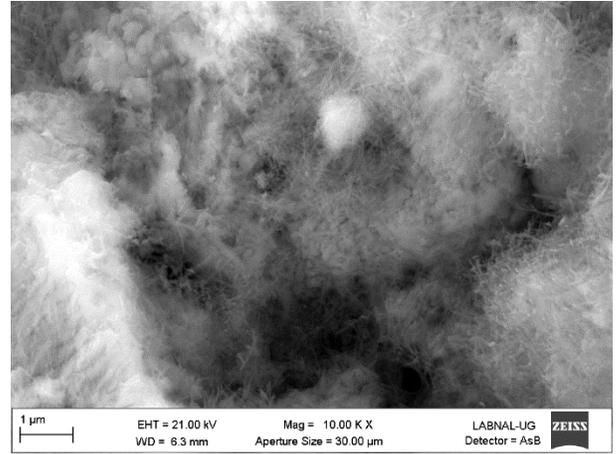
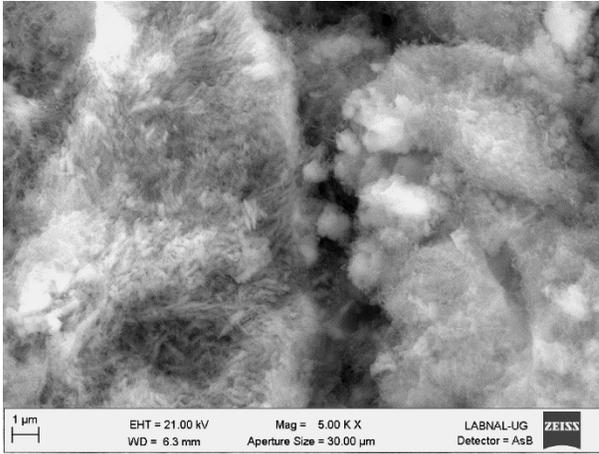


CZA-5

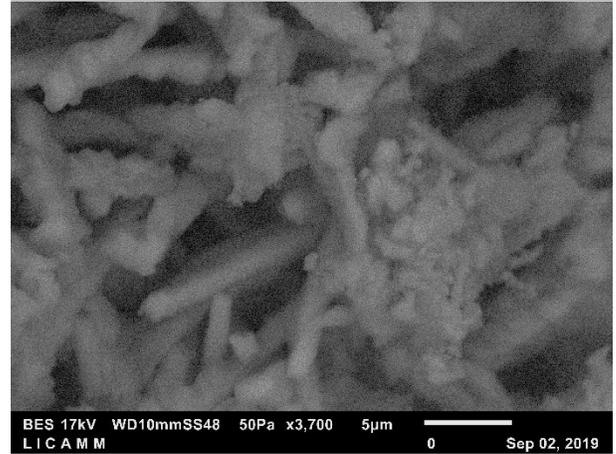
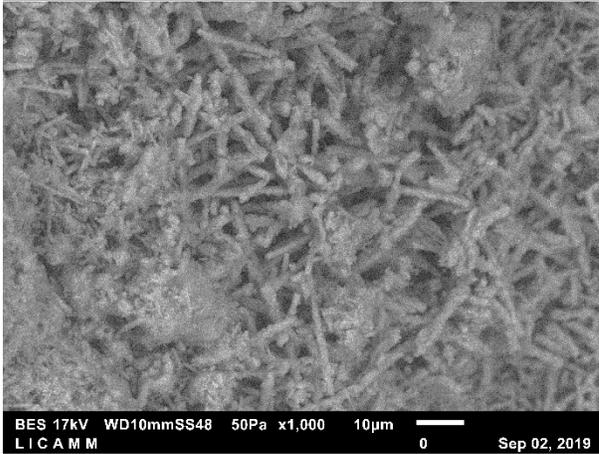
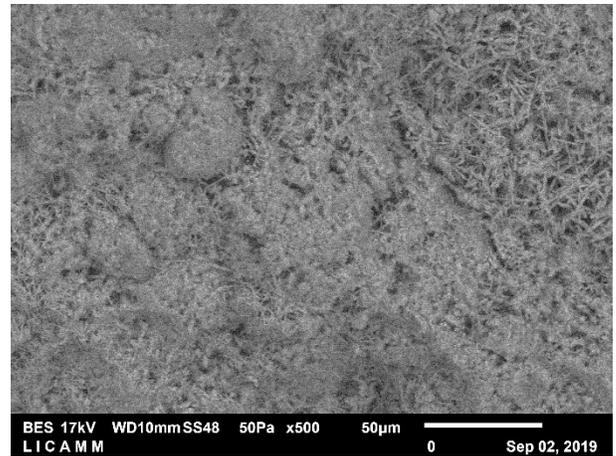
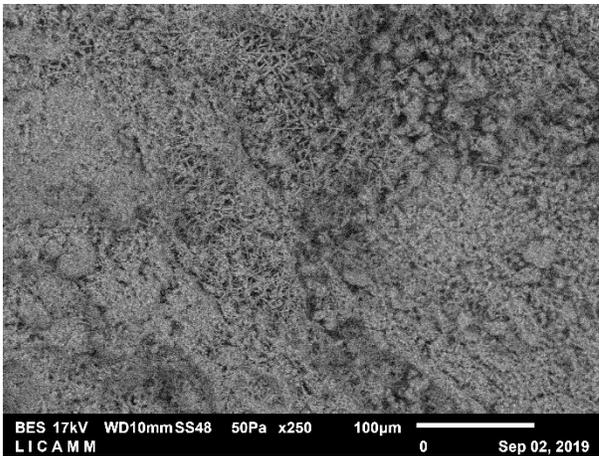


CZA-7L

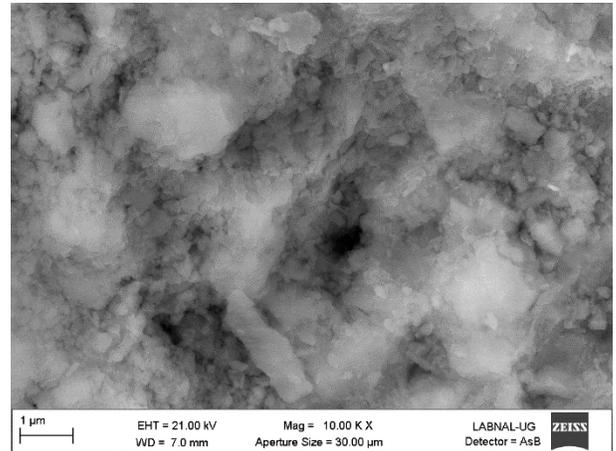
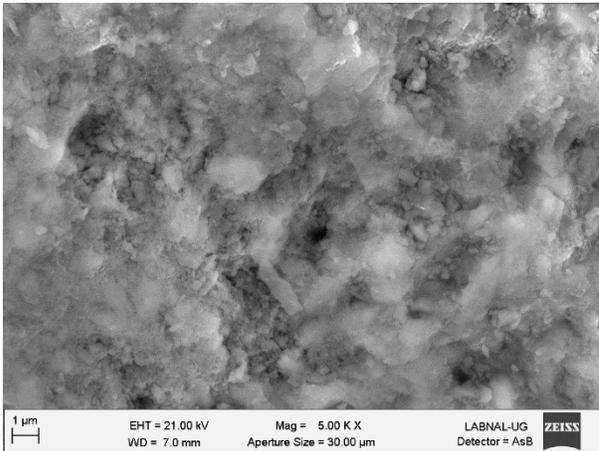
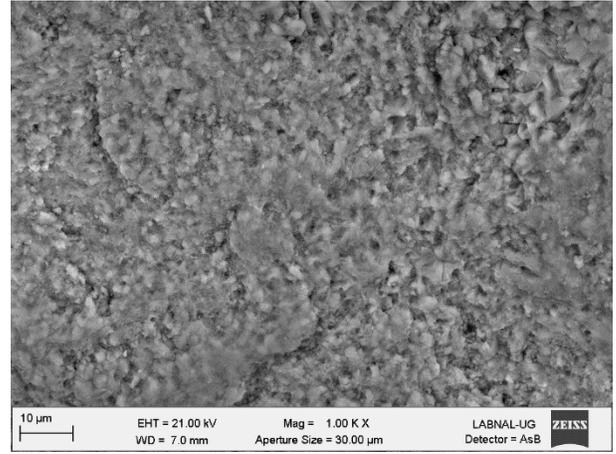
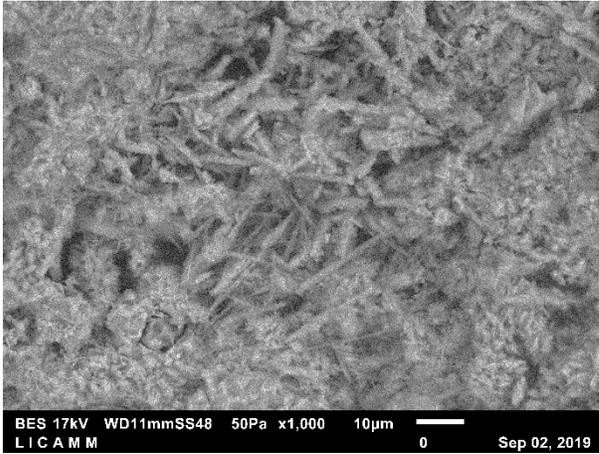
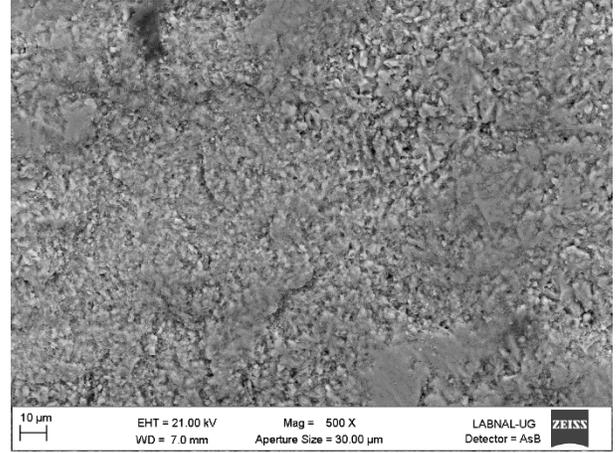
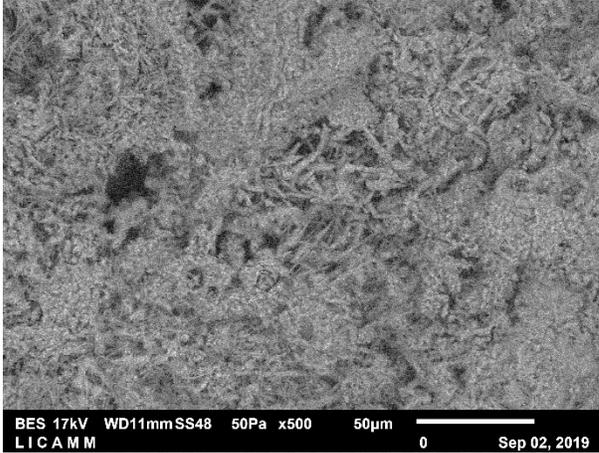




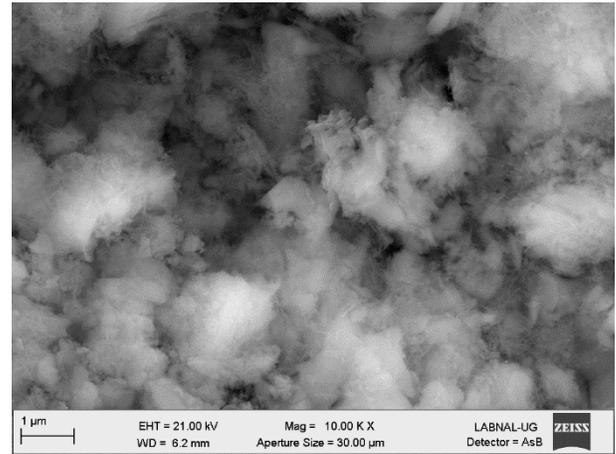
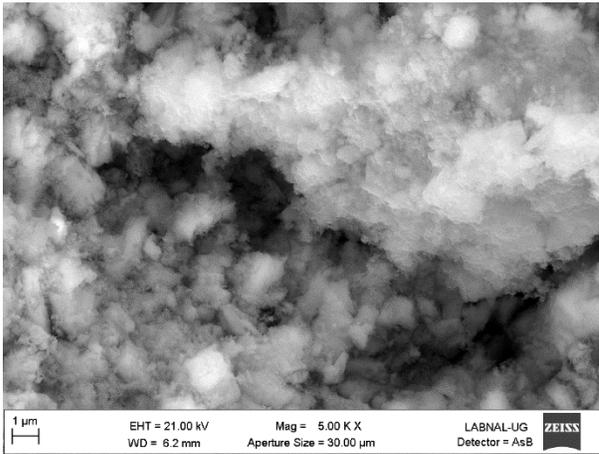
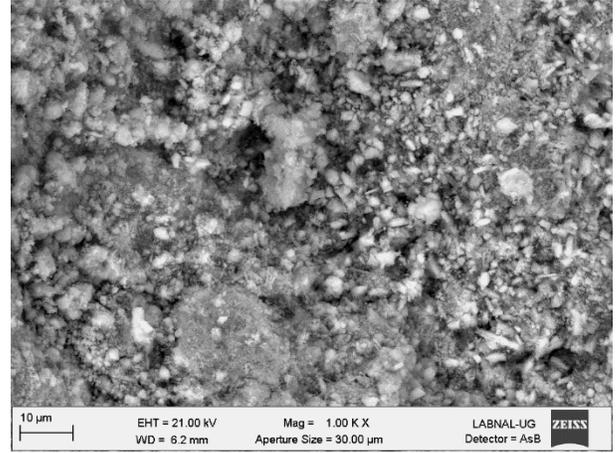
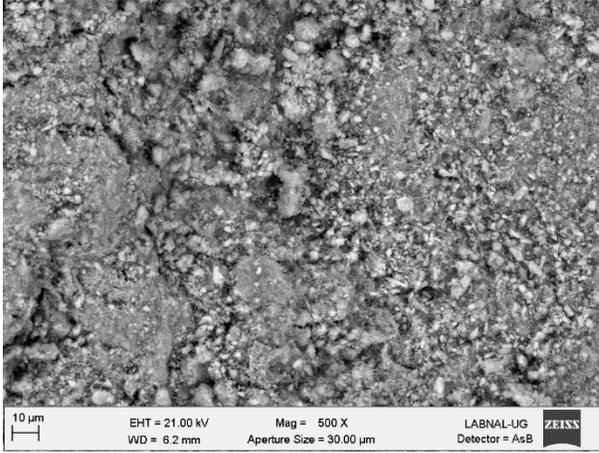
CZA-9L



MB-1



MB-2



APÉNDICE 3

Curvas Esfuerzo-Deformación

