



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

## **OPTIMITZACIÓ DE MÈTODES MULTITÈCNICA PER A LA CARACTERITZACIÓ DE COMPONENTS ORGÀNICS I MORTERS DE CALÇ TRADICIONALS DE L'ANTIGUITAT. DESENVOLUPAMENT DE METODOLOGIES EXPERIMENTALS PER A LA SEVA CONSERVACIÓ I RESTAURACIÓ.**

**APLICACIÓ A UN CAS D'ESTUDI: ELS ESTUCS DE LA PINTURA MURAL  
MAIA (ANTIGA MESOAMÈRICA)**

---

OPTIMIZACIÓN DE MÉTODOS MULTITÉCNICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE  
COMPONENTES ORGÁNICOS I MORTEROS DE CAL TRADICIONALES DE LA  
ANTIGÜEDAD. DESARROLLO DE METODOLOGÍAS EXPERIMENTALES PARA SU  
CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN.

APLICACIÓN A UN CASO DE ESTUDIO: LOS ESTUCOS DE LA PINTURA MURAL MAYA  
(ANTIGUA MESOAMÉRICA)

Programa de doctorado en Ciencia y Restauración del Patrimonio Histórico-  
Artístico. Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales  
de la Facultad de Bellas Artes de la Universitat Politècnica de València

Doctoranda: Núria Guasch Ferré

Directores de la tesis doctoral: Dra. M<sup>a</sup> Teresa Doménech Carbó, Dr. José Luís  
Prada Pérez, Dra. M<sup>a</sup> Luisa Vázquez de Ágredos Pascual, Dr. Xavier Mas  
Barberà

València, 13 de enero de 2016

Para tu,

*Evaluadores externos de la tesis doctoral*

**Dr. Francisco Javier Alonso.** Doctor en Geología. Profesor Titular de Petrología y Geoquímica en el Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo.

**Dra. Ing. Maria Paulina S.F. Faria.** Doctora en Engenharia Civil. Profesora Titular en el Departamento de Engenharia Civil de la Faculdade de Ciências e Tecnologia de la Universidade Nova de Lisboa.

**Dr. José Luíz Ruvalcaba.** Doctor en Física. Investigador de Carrera Titular y Director del Proyecto ANDREAH del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México.

*Composición del tribunal de la tesis doctoral*

Presidenta del tribunal: **Dra. M<sup>a</sup> Julia Osca Pons.** Doctora en Bellas Artes. Profesora Titular y Directora del Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales de la Facultad de Bellas Artes de la Universitat Politècnica de València. Investigadora del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio (IRP-UPV).

Secretaria del tribunal: **Dra. Ana García Bueno.** Doctora en Bellas Artes. Profesora Titular, especialidad de Restauración y Directora del Departamento de Pintura de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad de Granada. Investigadora del Laboratorio de Arqueología y Arquitectura de la Ciudad (LAAC-CSIC).

Vocal del tribunal: **Dra. Ing. Maria Paulina S.F. Faria.** Doctora en Engenharia Civil. Profesora Titular en el Departamento de Engenharia Civil de la Faculdade de Ciências e Tecnologia de la Universidade Nova de Lisboa.

## ÍNDICE

<b>i. INTRODUCCIÓN GENERAL</b>	18
<b>ii. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	22
<b>iii. PLAN DE TRABAJO</b>	24
<b>PARTE 1. ESTUDIO ARQUEOMÉTRICO DE LOS ESTUCOS DE LA PINTURA MURAL MAYA</b>	31
<b>1.1. MORTEROS DE CAL DE LAS CAPAS DE PREPARACIÓN</b>	32
<b>1.1.1. ANTECEDENTES</b>	32
<b>1.1.1.1. Descripción del contexto</b>	32
1.1.1.1.1. Ubicación geográfica	32
1.1.1.1.2. Marco cronológico	34
<b>1.1.1.2. Breves apuntes sobre la arquitectura maya</b>	36
1.1.1.2.1. Arquitectura maya y espacio urbano	36
1.1.1.2.2. Los materiales y las tipologías de la arquitectura maya	37
<b>1.1.1.3. El estuco en la arquitectura maya</b>	38
<b>1.1.1.4. La composición de los estucos</b>	38
<b>1.1.1.5. La preparación de la cal y el árido entre los mayas</b>	41
1.1.1.5.1. Los recursos materiales: el entorno geológico	41
1.1.1.5.2. La selección de la cal y el árido	61
1.1.1.5.3. La calcinación de la cal	70
1.1.1.5.4. La hidratación de la cal	73
<b>1.1.1.6. Otros materiales asociados a la cal</b>	77
1.1.1.6.1. Los suelos y los sedimentos arcillosos	77
1.1.1.6.2. La composición y la estructura cristalográfica de las arcillas	85
1.1.1.6.3. La tipología y el origen de las arcillas empleadas por los mayas	90
<b>1.1.2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	93
<b>1.1.2.1. Materias primas de las áreas arqueológicas estudiadas</b>	93
<b>1.1.2.2. Estucos de los sitios arqueológicos seleccionados</b>	95
<b>1.1.2.3. Instrumentación</b>	100
<b>1.1.2.4. Pretratamiento de las capas de preparación de los estucos para la identificación de las arcillas y la instrumentación específica empleada</b>	103
1.1.2.4.1. Determinación del porcentaje de residuo insoluble del	103



mortero de cal mediante ataque ácido	
1.1.2.4.2. Instrumentación específica para el estudio de las arcillas presentes en los estucos	105
<b>1.1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	108
<b>1.1.3.1. Caracterización de las materias primas del entorno geológico</b>	108
1.1.3.1.1. Materias primas de la cal y del árido	108
1.1.3.1.1.1. Descripción de las características morfológicas y de las texturas petrográficas de las materias primas	108
1.1.3.1.1.2. Contextualización geológica de las materias primas estudiadas	119
1.1.3.1.2. Sedimentos arcillosos	123
1.1.3.1.2.1. Descripción macromorfológica de los sedimentos arcillosos	123
1.1.3.1.2.2. Caracterización químico-mineralógica de los sedimentos arcillosos	129
1.1.3.1.2.3. Paisaje edáfico de los sedimentos arcillosos estudiados	139
<b>1.1.3.2. Caracterización de los estucos de la pintura mural maya</b>	142
1.1.3.2.1. Capas de preparación de los estucos	142
1.1.3.2.1.1. Descripción organoléptica	142
1.1.3.2.1.2. Estudio estratigráfico	148
1.1.3.2.1.3. Estudio granulométrico	154
1.1.3.2.1.4. Descripción petrográfica	163
1.1.3.2.1.5. Caracterización químico-mineralógica de la fase conglomerante del mortero	182
1.1.3.2.2. Otros materiales asociados a la cal	202
1.1.3.2.2.1. Caracterización mineralógica y nanomorfológica de los materiales asociados a la cal	202
<b>1.1.4. DISCUSIÓN FINAL DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES</b>	215
<b>1.1.4.1. Discusión final de resultados</b>	215
<b>1.1.4.2. Propuesta de grupos técnicos de los estucos de la pintura mural maya</b>	219
<b>1.2. LOS AGLUTINANTES Y LOS ADITIVOS VEGETALES</b>	232
<b>1.2.1. ANTECEDENTES</b>	232
<b>1.2.1.1. Estructura y propiedades de las gomas vegetales</b>	232
<b>1.2.1.2. Clasificación</b>	234

1.2.1.3. Componentes de la pared celular y material extraíble de la madera y las cortezas de los árboles	235
1.2.1.4. Métodos de análisis de polisacáridos utilizados en obras de arte	237
1.2.1.5. Identificación de las gomas vegetales en la pintura mural maya	240
<b>1.2.2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	244
1.2.2.1. Reactivos y materiales de referencia	244
1.2.2.2. Instrumentación	244
1.2.2.3. Pretratamiento de las muestras	245
<b>1.2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	247
1.2.3.1. Caracterización de los materiales de referencia	247
1.2.3.2. Caracterización de los estucos de la pintura mural maya	250
1.2.3.2.1. El aglutinante de la capa pictórica	250
1.2.3.2.2. El aditivo de la capa de preparación	256
1.2.3.2.3. Efecto del medio alcalino en la composición de la goma	261
<b>1.2.4. DISCUSIÓN FINAL DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES</b>	264
<b>PARTE 2. NUEVAS PERSPECTIVAS EN LA ADAPTACIÓN Y LA UTILIZACIÓN DE ADITIVOS HISTÓRICOS EN LOS MORTEROS DE CAL TRADICIONALES</b>	267
<b>2.1. ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS GOMAS NATURALES COMO ADITIVO DE LOS MORTEROS DE CAL TRADICIONALES</b>	267
<b>2.1.1. ANTECEDENTES</b>	267
2.1.1.1. Uso de las gomas naturales como aditivos de los morteros de cal tradicionales a lo largo de la historia	267
2.1.1.2. Estudios sobre el efecto de las gomas naturales como aditivos de los morteros de cal tradicionales	271
<b>2.1.2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	274
2.1.2.1. Materiales de referencia	274
2.1.2.2. Métodos	276
2.1.2.2.1. Preparación del mortero	276

2.1.2.2.2. Probetas	284
2.1.2.2.3. Ensayos para determinar las propiedades reológicas del mortero	287
2.1.2.2.4. Ensayos para determinar las propiedades del mortero en estado endurecido	297
2.1.2.2.5. Ensayos para determinar la durabilidad del mortero	315
<b>2.1.2.3. Instrumentación</b>	321
<b>2.1.2.4. Extracción y pretratamiento de las muestras</b>	321
<b>2.1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	325
<b>2.1.3.1. Caracterización de las propiedades reológicas del mortero en estado fresco</b>	325
2.1.3.1.1. Determinación de la consistencia, de la densidad aparente, del contenido en aire, de la capacidad de retención de agua y del período de trabajabilidad	325
<b>2.1.3.2. Caracterización del mortero en estado endurecido</b>	332
2.1.3.2.1. Comportamiento petrofísico	332
2.1.3.2.1.1. Determinación del coeficiente de agua por capilaridad	332
2.1.3.2.1.2. Determinación de la curva de evaporación	336
2.1.3.2.1.3. Determinación de la porosidad accesible al agua bajo condiciones al vacío, de la porosidad accesible al agua por capilaridad, del coeficiente de saturación y de la densidad aparente	341
2.1.3.2.1.4. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua	342
2.1.3.2.2. Comportamiento mecánico	345
2.1.3.2.2.1. Determinación de la resistencia a la flexión y a la compresión	345
<b>2.1.3.3. Caracterización de la estructura porosa y de la microestructura del mortero</b>	348
2.1.3.3.1. Determinación de la distribución del tamaño de poro mediante la porosimetría por intrusión de mercurio	348
2.1.3.3.2. Caracterización de la microestructura mediante la microscopía electrónica de barrido	351
<b>2.1.3.4. Caracterización de la durabilidad del mortero</b>	363
2.1.3.4.1. Determinación de la resistencia al hielo-deshielo	363
2.1.3.4.2. Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos	367
<b>2.1.3.5. Evolución y control del proceso de la carbonatación</b>	369
2.1.3.5.1. Determinación de la resistencia y de la profundidad a la carbonatación	369
2.1.3.5.2. Caracterización química de la evolución del proceso de la carbonatación a lo largo del tiempo	375

<b>2.1.4. DISCUSIÓN FINAL DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES</b>	381
<b>iv. CONCLUSIONES FINALES</b>	389
<b>v. BIBLIOGRAFÍA</b>	393

## **Agradecimientos**

*Al meu marit, sense tu no hagués escrit aquestes paraules.*

*Als meus pares per ensenyar-me a créixer i a dubtar. Als meus germans i a la resta de la meva família per creure en mi i emocionar-se amb tot allò que m'apassiona.*

Al Dr. Aureli Álvarez y a la Dra. Antònia Navarro por iniciarme en la disciplina de la conservación científica del patrimonio.

Al Dr. José Luís Prada por conducirme hasta aquí, por enseñarme y por guiarme en mi trayectoria académica, profesional, intelectual y personal, y por apoyarme en cada momento de la elaboración de esta tesis doctoral.

A la Dra. Teresa Doménech por brindarme la oportunidad de seguir instruyéndome, por creer en mi e integrarme como miembro de su equipo de investigación y apoyarme, tanto a nivel académico como personal, en cada uno de los difíciles momentos de la elaboración de esta tesis doctoral.

A la Dra. M<sup>a</sup> Luisa Vázquez de Ágredos por transmitirme su pasión por la cultura maya y apoyarme en cada momento de la elaboración de esta tesis doctoral.

Al Dr. Xavier Mas Barberà por transmitirme sus conocimientos como conservador-restaurador especialita en la elaboración de morteros de cal y apoyarme en cada momento de la elaboración de esta tesis doctoral.

El estudio analítico llevado a cabo en esta investigación ha sido financiado a través del proyecto "I+D+I MINECO" projects CTQ2011-28079-CO3-01 y 02 y del proyecto "I+D+I MINECO" CTQ2014-53736-C3-1-P y 2-P, co-financiado con fondos FEDER.

La autora desea agradecer la colaboración del Dr. Manuel Planes y el Dr. José Luís Moya, técnicos responsables del Servei de Microscopia Electrònica de la Universitat Politècnica de València.

A todos los miembros de las Instituciones que me han brindado la posibilidad de realizar parte de mi investigación. Sin su apoyo institucional y personal no hubiera podido llevar a cabo una parte importante de la experimentación de esta tesis doctoral. En especial, a la Dra. Ing. Teresa Díaz Gonçalves, a la Dra. Ing. Maria do Rosário Veiga, a la Dra. M<sup>a</sup> Pilar de Luxán Gómez del Campillo y a la Dra. María Cruz Alonso Alonso. A todas ellas, mi agradecimiento más profundo por su ayuda, por compartir sus conocimientos y por orientarme en

todos y cada uno de los momentos en que he necesitado su asesoramiento profesional.

A mis amigos y compañeros de laboratorio, por vuestras enseñanzas, apoyo y consejos. Un especial agradecimiento a la Dra. Laura Osete, por estar a mi lado en los buenos y no tan buenos momentos y no dejar que mi motivación decreciera.

A todos vosotros,

Gràcies, Gracias, Obrigada

## Resum

La present investigació proposa, per una banda, l'optimització d'un mètode multitécnica per a la caracterització de components orgànics i morters de calç tradicionals en construccions monumentals de l'antiguitat. Com exemplicació de l'eficàcia, aquesta metodologia s'ha aplicat a un cas d'estudi, els estucs de la pintura mural de la cultura maia (Antiga Mesoamèrica). L'elecció d'aquest cas d'estudi està motivada per la necessitat de seguir estudiant la composició de les capes de preparació d'aquests estucs. Existeixen dos motius per a això: el primer és que el coneixement dels materials i de les tècniques d'execució d'aquestes superfícies està aportant noves dades per a comprendre la complexitat tecnològica d'aquesta cultura i el segon és que, sols aquesta classe d'investigacions ens permetran conèixer amb certesa com foren realitzades aquestes capes de preparació, i en conseqüència, garantir correctes intervencions de conservació-restauració. A partir d'aquestes consideracions, l'estudi portat a terme estableix un plantejament metodològic que parteix de la recerca de bibliografia especialitzada, aconseguint un coneixement teòric, del context geogràfic, del marc cultural, del medi físic (la geologia i la climatologia) i biològic (la flora i la vegetació) de la Península de Yucatán (Mèxic), necessari per a afrontar la correcta descripció i caracterització de les matèries primeres de l'entorn geològic, utilitzades en la manufactura de las capes de preparació de la pintura mural maia i conseqüentment, per a la correcta interpretació dels estucs procedents dels assentaments arqueològics de les Terres Baixes Maies del Nord (Península de Yucatán, Mèxic) estudiats, mitjançant l'aprofitament de tècniques instrumentals d'anàlisi, com la microscòpia òptica (MO), la microscòpia òptica de llum polaritzada (MOP), l'espectroscòpia infraroja per transformada de Fourier (FT-IR), la difracció de raigs-x (DRX) i la microscòpia electrònica de rastreig-microanàlisi de raigs-x (SEM-EDX), la microdifracció de raigs-x ( $\mu$ -DRX), la microscòpia electrònica de transmissió (TEM) i l'optimització de tècniques instrumentals avançades, per l'anàlisi de compostos orgànics, com la cromatografia de gasos/espectrometria de masses (GC/MS).

Per altra banda, les investigacions actuals tendeixen a reforçar la idea d'incorporar components orgànics als morters històrics a la matriu cimentant. Existeix un debat sobre si aquests additius modifiquen les propietats del morter en estat fresc i si, a més a més, milloren les propietats del morter en estat endurit. En aquest estudi, es proposa la posada a punt d'un mètode d'elaboració de morters de calç normalitzats d'aplicació en el camp de la restauració, que permeti un adequat control de qualitat sobre els seus constituents, a partir de la investigació experimental de morters de calç aèria en pasta amb la incorporació de dos additius orgànics naturals d'origen vegetal, a la seva matriu cimentant, en proporcions variables, per tal de valorar les

modificacions del seu comportament en relació a les principals propietats reològiques, hídriques i físicomecàniques del morter, com alternativa ecològica i sostenible de les resines sintètiques no biodegradables i irreversibles, i per a assegurar una major compatibilitat amb els materials originals.

És per això que aquesta investigació se suma a les iniciatives que es van encetar a principis del segle XIX amb diversos projectes arqueològics de les Terres Baixes Maies del Nord (Península de Yucatán, Mèxic), totes aquestes centrades a recuperar les antigues tradicions tècniques que van permetre elaborar unes barreges de calç capaces de resistir durant segles els greus problemes de conservació ambiental i microbiològica que suposa el medi selvàtic que les envolta. Només el desxiframent complet de la recepta, o dit d'una altra manera, dels diferents ingredients que van fer possible la manufactura d'unes barreges d'aquesta resistència i qualitat, ens permetrà reproduir-les per a utilitzar-les com a material reintegrant en els processos de restauració d'aquestes obres, garantint els excel·lents resultats que s'aconseguien fa milers d'anys pels antics especialistes. Així doncs, aquesta investigació mostra una vegada més la necessitat que científics per a la conservació (químics, biòlegs, geòlegs), historiadors, historiadors de l'art, arqueòlegs i restauradors uneixin esforços en benefici del coneixement i la preservació del ric llegat arqueològic, patrimonial i cultural de les antigues cultures.



## Resumen

La presente investigación propone, de un lado, la optimización de un método multitécnica para la caracterización de componentes orgánicos y morteros de cal tradicionales en construcciones monumentales de la antigüedad. Para ejemplificar la eficacia de esta metodología, se ha aplicado a un caso de estudio, los estucos de la pintura mural de la cultura maya (Antigua Mesoamérica), que ha sido elegido por la necesidad de seguir estudiando la composición de las capas de preparación de estos estucos. Existen dos motivos para esta elección: el primero es que el conocimiento de los materiales y de las técnicas de ejecución de estas superficies está aportando nuevos datos para comprender la complejidad tecnológica de esta cultura; y el segundo se basa en que tan sólo este tipo de investigaciones nos permitirán conocer con certeza como se realizaron estas capas de preparación y, de este modo, garantizar las correctas intervenciones de conservación-restauración. A partir de estas consideraciones, el estudio llevado a cabo establece un planteamiento metodológico que parte de la búsqueda de bibliografía especializada del contexto geográfico, del marco cultural, del medio físico (la geología y la climatología) y biológico (la flora y la vegetación) de la Península de Yucatán (México), consiguiendo el conocimiento teórico necesario para afrontar una descripción y caracterización ajustada de las materias primas del entorno geológico que se usaron en la manufactura de las capas de preparación de la pintura mural maya. El método continua con el aprovechamiento de técnicas instrumentales de análisis, como la microscopía óptica (MO), la microscopía óptica de luz polarizada (MOP), la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), la difracción de rayos-x (DRX), la microscopía electrónica de barrido-microanálisis de rayos-x (SEM-EDX), la microdifracción de rayos-x ( $\mu$ -DRX), la microscopía electrónica de transmisión (TEM) y la optimización de técnicas instrumentales avanzadas para el análisis de compuestos orgánicos, como la cromatografía de gases/espectrometría de masas (GC/MS).

Por otro lado, las investigaciones actuales tienden a reforzar la idea de incorporar componentes orgánicos a la matriz cementante de los morteros históricos. Existe un debate sobre si estos aditivos modifican las propiedades del mortero fresco y si, además, mejoran las propiedades del mortero endurecido. En este estudio se propone la puesta a punto de un método de elaboración de morteros de cal normalizados de aplicación en el campo de la restauración, que permita un adecuado control de calidad sobre sus constituyentes. Para ello, se ha partido de la investigación experimental de morteros de cal aérea en pasta a los que se les ha incorporado en su matriz cementante dos aditivos orgánicos naturales de origen vegetal en proporciones variables, de modo que se puedan valorar las modificaciones de su

comportamiento en relación a las principales propiedades reológicas, hídricas y físico-mecánicas del mortero, como alternativa ecológica y sostenible de las resinas sintéticas no biodegradables e irreversibles, y para asegurar una mayor compatibilidad con los materiales originales.

Es por eso que esta investigación se suma a las iniciativas, que se dieron ya a principios del siglo XIX, de varios proyectos arqueológicos de las Tierras Bajas Mayas del Norte (Península de Yucatán, México), centradas todas en recuperar las antiguas tradiciones técnicas que permitieron elaborar unas mezclas de cal capaces de resistir durante siglos los graves problemas de conservación ambiental y microbiológica que supone el medio selvático que las rodea. Solamente el hecho de descifrar por completo la receta, o dicho de otra manera, los diferentes ingredientes que hicieron posible la manufactura de unas mezclas de esta resistencia y calidad, nos permitirá reproducir estas mezclas para utilizarlas como material reintegrador en los procesos de restauración de las obras, garantizando los excelentes resultados que consiguieron los antiguos especialistas hace miles de años. Así pues, este estudio muestra, una vez más, la necesidad que científicos para la conservación (químicos, biólogos, geólogos), historiadores, historiadores del arte, arqueólogos y restauradores unan esfuerzos en beneficio del conocimiento y la preservación del rico legado arqueológico, patrimonial y cultural de las culturas antiguas.

## Summary

The present research suggests, on one hand, optimizing a multi-technical method for the characterization of organic compounds and traditional lime mortars to use in monumental buildings of antiquity. To illustrate the effectiveness of this methodology it has been applied to a study case, the stucco from mural painting of Maya culture (Ancient Mesoamerica), which has been chosen by the need to continue studying the composition of preparation layers of these stuccos. There are two reasons for this choice: the first one is that knowledge of materials and of execution techniques of these surfaces is providing new data to understand the technological complexity of this culture; and the second one is based on the fact that just this type of research will allow us to know with certainty how these preparation layers were made and, this way, ensure the correct interventions of conservation and restoration. From these considerations, the study conducted establishes a methodological approach that comes from the specialized literature search of geographical and cultural context, the physical (geology and climatology) and biological environment (flora and vegetation) from Yucatan Peninsula (Mexico), getting theoretical knowledge necessary to deal with a detailed description and characterization of the raw materials from the geological environment that were used in the manufacture of the preparation layers from Maya mural painting. The method continues with the use of instrumental analysis techniques such as optical microscopy (OM), polarizing optical microscopy (POM), infrared Fourier transform spectroscopy (FT-IR), x-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy-x-ray microanalysis (SEM-EDX), x-ray microdiffraction ( $\mu$ -XRD), transmission electron microscopy (TEM) and the optimization of instrumental techniques for analyzing organic compounds, such as gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS).

On the other hand, the current researches tend to reinforce the idea of incorporating organic components to the cementitious matrix of historical mortars. There is a debate about whether these additives modify the fresh mortar properties and if they also improve the hardened mortar properties. In this study is suggested the development of a method of making lime mortars with an application in the field of restoration, to provide adequate quality control over their constituents. To do this, it has been used an experimental research of air lime mortar paste to which cementitious matrix, two natural organic additives of vegetable origin in different proportions have been incorporated, so changes in its behavior related to the main rheological, hydraulics and physical-mechanical properties of the mortar can be assessed, as ecological and sustainable alternative to non-biodegradable and irreversible synthetic resins, and to ensure greater compatibility with the original materials.

That is why this research is added to initiatives, occurred since the early nineteenth century, of several archaeological projects in the Northern Maya lowlands (Yucatan Peninsula, Mexico), all of them focused on recovering ancient technical traditions which allowed to develop a mix of lime able to withstand for centuries the serious problems of environmental and microbiological conservation that represents the forest environment that surrounds them. Only the fact of fully decode the recipe, or put in another way, the various ingredients that made possible the manufacture of mixtures of this strength and quality, will enable us to duplicate these mixtures to use them as reintegrative material in construction restoration processes, ensuring the excellent results achieved thousands of years ago by former specialists. Therefore, this study shows, once again, the need of scientists (chemists, biologists, geologists), historians, art historians, archaeologists and restorers join forces for the benefit of the knowledge and the preservation of the rich archaeological cultural heritage from ancient cultures.

## Resumo

A presente investigação propõe a otimização de um método multitécnica para a caracterização de argamassas de cal tradicionais e dos seus componentes orgânicos utilizados em construções da Antiguidade. Para exemplificar a eficácia desta metodologia, foi realizado um estudo sobre um conjunto de estuques de pintura mural da cultura Maia (Antiga Mesoamérica). A seleção deste caso de estudo foi alentada por dois motivos. Em primeiro lugar, o conhecimento dos materiais e técnicas de execução usados para elaborar estas superfícies acresce novos dados para o decifrar da complexidade tecnológica da cultura Maia. E, em segundo lugar, porque se considera que somente através de estudos de caracterização desta natureza se conseguirá conhecer com certeza como se realizavam estas camadas de preparação e, deste modo, garantir intervenções de Conservação e Restauro adequadas. Tendo em conta estas considerações, o estudo realizado estabelece um método que recolhe a bibliografia especializada no contexto geográfico, cultural, geológico, climatológico e biológico da Península do Yucatán (México), para formar o conhecimento teórico necessário para a caracterização das matérias-primas do contexto geológico usados na elaboração das camadas de preparação da pintura mural Maia. A esta primeira fase da metodologia, acresce o uso de técnicas de análise instrumental como a Microscopia Ótica (MO), a Microscopia de Luz Polarizada (MOP), a Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR), a Difração de Raios-x (DRX), a Microscopia Eletrónica de Varrimento e Microanálise por Raios-x (SEM-EDX), a micro- Difração de Raios-x ( $\mu$ -DRX), a Microscopia Eletrónica de Transmissão (TEM) e bem como pela otimização de métodos para a análise de compostos orgânicos em técnicas instrumentais avançadas como a Cromatografia de Gases/Espectrometria de Massas (GC/MS).

Cabe referir que algumas investigações atuais sobre a composição de argamassas históricas sugerem a adição de compostos orgânicos à matriz cementícia durante a sua manufatura. Debate-se sobre se a presença destes aditivos poderia modificar as propriedades das argamassas no seu estado fresco e uma vez endurecidas. Neste trabalho propõe-se um método para a elaboração de argamassas de cal normalizadas para aplicação no campo da Conservação e Restauro que permite um controlo de qualidade adequado sobre cada ingrediente. Partiu-se de uma investigação experimental em argamassas de cal aérea em pasta às quais se incorporaram dois aditivos orgânicos de origem vegetal em diferentes proporções. Deste modo caracterizaram-se as diferenças nas propriedades reológicas, hídricas e físico-mecânicas das novas argamassas. Estas novas argamassas são propostas como alternativas ao uso de resinas sintéticas (não biodegradáveis e

irreversíveis), sendo mais compatíveis com os materiais originais, mais ecológicas e sustentáveis.

Por este motivo a presente investigação integra um conjunto de iniciativas de projetos arqueológicos realizados nas Terras Baixas Maias do Norte (algumas começadas a princípios do séc. XIX) e que têm como objetivo recuperar as tradições técnicas que permitiram elaborar receitas capazes de resistir durante séculos aos graves problemas de conservação ambiental e microbiológica que supõe a selva que os rodeia. Somente o decifrar da receita, ou melhor, os diferentes ingredientes usados nestas receitas de tal resistência e qualidade nos permitirá reproduzir estas misturas e usá-las como material de integração nos procedimentos de Conservação e Restauro, garantindo os excelentes resultados que conseguiram os especialistas antigos há milhares de anos. Este estudo mostra, uma vez mais que a união multidisciplinar entre cientistas da Conservação (químicos, biólogos, geólogos), historiadores de arte, arqueólogos e Conservadores-Restauradores é extremamente importante para o desenvolver do corpus de conhecimento assim como para a preservação do nosso rico legado arqueológico, patrimonial e cultural das culturas antigas.

## i. INTRODUCCIÓN GENERAL

Esta tesis doctoral surge del interés y la búsqueda personal de la doctoranda por los materiales constructivos tradicionales, un afán por averiguar los procedimientos y las técnicas antiguas empezando por el estudio de las materias primas y experimentando cómo se preparaba cada material, los cuales nos acercan al conocimiento empírico del arte de la pintura, de la arquitectura y de la escultura. Recordamos la pulcritud con la que describe cada material y cada proceso el *Tratado de la Pintura* de Cennino Cennini<sup>1</sup> (Albelda, J., 2008), donde se define la pintura de este modo: [...] *Y esta un arte que se llama Pintura, que requiere fantasía y destreza de mano, hallar cosas no vistas, buscándolas bajo aspectos naturales, y sujetarlas, de modo que aquello que no es, sea.*

Del mismo modo que el arte nos puede mostrar otro punto de vista de la realidad, la ciencia también nos permite atravesar la superficie y adentrarnos en ella. Es decir, artista y científico consiguen ver más allá de la realidad que nos rodea y profundizan en el conocimiento total de la obra.

Por otro lado, este trabajo también parte del proyecto de investigación del Laboratorio de Análisis Físicoquímico y Medioambiental de Obras de Arte (LAFQYM) del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio (IRP), en la que la doctoranda participó como becaria FPI - Formación Personal Investigador del Programa de Acodamiento a la Investigación y el Desarrollo de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) 2008. Este proyecto abraza un amplio estudio analítico sobre la identificación y la caracterización de los

---

<sup>1</sup> Cennino Cennini, pintor renacentista italiano, se le conoce sobretodo como estudioso de los materiales de la pintura y de la forma de proceder con ellos. A modo de recetario, Cennini, en su obra *Tratado de la Pintura (El libro de arte)*, describe en 189 capítulos tanto la naturaleza y la manera de tratar los materiales como el ejercicio de las diferentes técnicas pictóricas. Aun así, Cennino Cennini no fue el primero en hablar de los materiales y de las técnicas de la pintura, sino que muchos otros lo hicieron desde la Antigüedad a este lado del Atlántico. En la época griega lo hizo Teofrasto por primera vez (s. IV a.C), y en la romana el tema fue abordado por Vitrubio (27 a.C), Plinio (s. I d.C) y Dioscórides (s. II-III d.C); si bien es cierto que ninguno de ellos lo hizo en tratados específicos sobre pintura, sino indirectamente en obras que trataban otros asuntos, cosa que no afecta a su consideración de las fuentes escritas capitales y pioneras de todo este tema. No obstante, y previamente a la obra de Cennini, que detalla la práctica en tiempos del *Trecento* italiano, existieron manuscritos, hoy día publicados, entorno a los materiales y a las técnicas de la pintura. Algunos que se pueden citar a este respecto son: *Papyrus Leydensis* (s.III), *Papyrus Graecus Holmiensis* (s. III-IV d.C), *Compositiones ad Tingenda* (s.VIII), *Liber sacerdotum* (s.X), *De Coloribus et Artibus Romanorum*, de Heraclio (s. X, con ampliaciones en el siglo XIII), *Mappae Clavicula*, literalmente "Las Claves de la Pintura" (s. XII), *Codex Matritensis* (s. XII) y el *Tractatus de coloribus illuminatorum sive pictorum*, ya del siglo XIV. Respecto a los tratados que nos hablan de la arquitectura y de la escultura, se tiene que citar a *Los diez libros de la Arquitectura. Libro 7.* de Vitrubio, *De coloribus et artibus Romanorum* de Eraclius, *Le livre des Métiers. Les métiers et corporation de la ville de Paris* de Boileau (1779) y *Original treatises on the arts of painting* de Merrifield (1967).

materiales y las técnicas de la pintura mural maya, Antigua Mesoamérica, empezando por la que se realizó durante la civilización maya desde el Preclásico Tardío (ca. 300 a.C - 300 d.C).

La dirección científica recae sobre la catedrática M<sup>a</sup> Teresa Doménech Carbó, responsable del LAFQYM y directora del IRP. Concretamente, este laboratorio se ha coordinado con el grupo de electroanálisis del Departamento de Química Analítica de la Universidad de Valencia (UV) liderado por el catedrático Antonio Doménech Carbó, para abordar el estudio de las pinturas murales y de las tapas de bóveda pintadas de más de veinte ciudades de las Tierras Bajas Mayas del Norte que, mayoritariamente formaban parte de antiguos palacios, templos y tumbas reales localizadas en la Península de Yucatán (México). Esto ha sido posible gracias a la estrecha colaboración científica que, entre 2002 y 2014, estuvo en activo entre el citado Laboratorio y el Departamento de Historia del Arte de la UV, de los que forman parte las dos investigadoras que han permitido la llegada de las muestras arqueológicas de pintura mural maya a la UV y a la UPV, para su estudio y su caracterización: la Dra. Cristina Vidal Lorenzo (dir. Proyecto La Blanca, 2004-2015) y la Dra. M<sup>a</sup> Luisa Vázquez de Ágredos Pascual (dir. Arqueometría del color en el área maya, 2012-2014). Más en concreto, las muestras que forman parte de esta tesis fueron obtenidas y transportadas al LAFQYM del IRP, entre 2002 y 2004, a raíz de las dos tesis doctorales que M<sup>a</sup> Luisa Vázquez de Ágredos Pascual realizó sobre la pintura mural maya, entre el año 2000 y 2007: la primera, dirigida por la Dra. Cristina Vidal Lorenzo (2006, UV) y la segunda, dirigida por la Dra. M<sup>a</sup> Teresa Doménech Carbó, el Dr. Antonio Doménech Carbó y la Dra. Pilar Rojo Picazo (2007, UPV); claramente, después de llevar a cabo las gestiones administrativas y burocráticas necesarias para la aprobación del Consejo Superior de Arqueología de México, el 2002 y en los años sucesivos, y con el consentimiento de los directores de los sitios y de los proyectos arqueológicos implicados en la investigación: Proyecto Acanceh, Proyecto Chacmultún, Proyecto D'zula, Proyecto Kulubá, Proyecto Ek'Balam, Proyecto Chichén Itzá, Proyecto Calakmul, Proyecto Dzibilnocac, Proyecto El Tabasqueño, Proyecto Santa Rosa Xtampak, Proyecto Cobá, Proyecto Tapas de Bóveda, vinculado este último al Museo *Palacio Cantón*, de la ciudad de Mérida (Yucatán, México). Todas estas muestras arqueológicas reales procedentes del área maya, y las que continuaron llegando, entre 2004 y 2014, desde La Blanca y otros sitios arqueológicos del *Palman* guatemalteco, entre ellas las de Yaxhá y Nakum, hicieron posible activar la línea de investigación *Arqueometría de la pintura mural maya* en el LAFQYM del IRP, entre 2002 y 2014.

En este sentido, la investigación que tenéis delante supone un punto y seguido a las dos tesis doctorales que iniciaron la citada línea de investigación en el



LAFQYM del IRP (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006; Vázquez de Ágredos, L., 2007), y a los resultados que se han obtenido desde finales del siglo XIX al analizar las superficies de estuco que fueron preparadas y utilizadas por los mayas como revestimiento arquitectónico y base de pinturas murales de gran calidad y complejidad iconográfica (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006; Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010). Se puede pensar que con más de un siglo de estudios no es posible que se pueda obtener más información sobre este tema. No obstante, la realidad ha sido y todavía es otra. Cada nueva aportación científica ha supuesto, desde entonces, nuevos hallazgos que sin duda nos han ido acercando a los materiales y a las técnicas que usaron los antiguos para preparar estas superficies de naturaleza fundamentalmente calcárea. El gran dilema desde William Holmes (1895) fue detectar los constituyentes principales de estas obras, entre los que se encontraban las sustancias orgánicas que participaron en la manufactura de estas superficies y que empezaron a asomarse a raíz de los primeros análisis. En aquellos momentos no se pudieron, pero a partir de la segunda mitad del siglo XX la ciencia empezó a identificarlas sin excepción. A día de hoy, ningún investigador pone en duda su presencia, ya que la unión de semejantes resultados con las pocas pervivencias etnográficas que aún pueden documentarse en este sentido, parecen confirmar su uso (Morris, A., 1931:351; Morris, H., *et al.*, Eds., 1931:224; Thompson, H., 1932:186; Tozzer, M., 1966; Dubois, M., 1978:101; Schreiner, P., 2002, extraído de Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006).

También, cabe tener en cuenta que las investigaciones actuales tienden a reforzar la idea de incorporar componentes orgánicos a la matriz cementante de los morteros históricos. Existe un debate sobre si estos aditivos modifican las propiedades del mortero fresco y si, además, mejoran las propiedades del mortero endurecido. En esta investigación se ha ensayado cómo la incorporación a la matriz cementante de morteros de cal en pasta de dos gomas naturales de origen vegetal, en proporciones variables, modifica su comportamiento en relación a las principales propiedades hídricas y físico-mecánicas del mortero. De modo que se plantean como alternativa ecológica y sostenible a las resinas sintéticas no biodegradables e irreversibles, y aseguran una mayor compatibilidad con los materiales originales.

Esta parte de la investigación se ha llevado a cabo en dos centros de investigación de reconocido prestigio: una parte, se ha realizado en el *Laboratório Nacional de Engenharia Civil* (LNEC) de Lisboa, durante el período de estancia al extranjero de la doctoranda, y se ha encuadrado dentro de los proyectos PIP 2009-2012 *Degradação e conservação de materiais porosos artificiais* (proc 0205/011/17685) y *Técnicas e materiais de conservação e restauro de revestimentos históricos* (proc 0803/11/17798), llevados a cabo en

dos núcleos del LNEC, *Núcleo de Materiais Pétreos e Cerâmicos do Departameto de Materiais (NPC/DM)* y *Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do Departamento de Edifícios (NRI/DED)*, bajo la dirección de la Dra. Ing. Teresa Díaz Gonçalves y la Dra. Ing. Maria do Rosário Veiga, respectivamente. La otra parte se ha elaborado en el *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc)*, centro del *Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*, perteneciente al *Área de Ciencia y Tecnología de Materiales*, de Madrid, disfrutando de un permiso de estancia de investigación, bajo la dirección de la Dra. M<sup>a</sup> Pilar de Luxán Gómez del Campillo, del *Departamento de Seguridad y Durabilidad de la Estructura* y el apoyo de la Dra. María Cruz Alonso Alonso, del *Departamento de Construcción*.

Es por eso que esta investigación se suma a las iniciativas, que se dieron ya a principios del siglo XIX, de varios proyectos arqueológicos de las Tierras Bajas Mayas del Norte (Península de Yucatán, México), centradas todas en recuperar las antiguas tradiciones técnicas que permitieron elaborar unas mezclas de cal capaces de resistir durante siglos los graves problemas de conservación ambiental y microbiológica que supone el medio selvático que las rodea. Entre estas iniciativas, cabe destacar las realizadas por el Proyecto de Ek'Balam y por varios arqueólogos e investigadores vinculados a la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Yucatán, México (Vargas de la Peña, L. *et al.*, 2001 y 2002). Solamente el hecho de descifrar por completo la receta, o dicho de otra manera, los diferentes ingredientes que hicieron posible la manufactura de unas mezclas de esta resistencia y calidad, nos permitirá reproducir estas mezclas para utilizarlas como material reintegrador en los procesos de restauración de las obras, garantizando los excelentes resultados que consiguieron los antiguos especialistas hace miles de años. Así pues, este estudio muestra, una vez más, la necesidad que científicos para la conservación (químicos, biólogos, geólogos), historiadores, historiadores del arte, arqueólogos y restauradores unan esfuerzos en beneficio del conocimiento y la preservación del rico legado arqueológico, patrimonial y cultural de las culturas antiguas.

## ii. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, se plantean los objetivos generales siguientes:

- Optimizar una metodología científica actualizada para la caracterización arqueométrica de componentes orgánicos y morteros de cal tradicionales en construcciones monumentales de la antigua cultura maya, concretamente en los estucos de la pintura mural de las Tierras Bajas Mayas del Norte (Península de Yucatán, México), mediante métodos multitécnica de análisis con una finalidad arqueométrica y profundizando en el conocimiento histórico de creación de la pintura mural. De este modo, poder identificar la composición y la textura de los diferentes morteros; conocer aspectos tecnológicos de su manufactura y la procedencia de las materias primas; establecer aproximaciones cronológicas; y, si es posible, establecer relaciones de comercio e influencias estéticas con otras culturas, entre otros.

Esta interrelación y el acercamiento a otras disciplinas hace posible, también, llevar a cabo estudios sobre las causas de alteración de los materiales que conforman el patrimonio, así como de los agentes y los mecanismos que las han generado. Este hecho es de suma importancia para determinar, con conocimiento de causa, el tipo de intervención y valorar la idoneidad de los productos y de los tratamientos de restauración que hay que emplear; y para comprobar su eficacia y comportamiento a largo plazo.

- Potenciar el uso de la cal tradicional en la restauración de las construcciones monumentales y de interés patrimonial, y optimizar un protocolo de actuación de cara a su conservación-restauración. Mediante la investigación experimental de morteros de cal tradicionales con la incorporación de aditivos orgánicos naturales en su matriz cementante y de las variaciones en sus características físico-mecánicas, como alternativa ecológica y sostenible a las resinas sintéticas no biodegradables e irreversibles.

Las resinas sintéticas utilizadas como aditivos de morteros son compuestos de naturaleza orgánica sintética que, con el paso del tiempo, experimentan procesos de alteración de su estructura molecular, con el consecuente cambio en su morfología y en sus propiedades mecánicas, físicas y químicas, a consecuencia de la acción de agentes medioambientales degradantes, tales como los contaminantes atmosféricos, la luz, la humedad, los cambios térmicos y los agentes de biodeterioro. En particular, estos materiales varían su morfología, su transparencia, su cromatismo y su resistencia de manera irreversible con el paso del tiempo, haciéndose necesaria, en muchas ocasiones, su eliminación total o parcial mediante procedimientos mecánicos o

con el uso de agentes químicos que, en algunos casos, llegan a ocasionar la pérdida del bien patrimonial.

Los efectos del uso de los polímeros sintéticos y la evaluación de su comportamiento en las estructuras de sitios arqueológicos en el área maya, ya fueron estudiados por Cedillo, L. (1991) en su tesis doctoral. A partir de los resultados obtenidos por éste y de la experiencia de diferentes profesionales de la restauración en lugares tan emblemáticos como *Balamkú* (estado de Campeche, México) y *Ek'Balam* (estado de Yucatán, México), se observó y se determinó que el uso de polímeros sintéticos para actuaciones conservativas era contraproducente, desencadenando, a la larga, mecanismos de alteración (Ruiz, M.C., 2010). Por este motivo, actualmente existe la tendencia de volver a recuperar las técnicas tradicionales y aplicarlas al campo de la conservación-restauración para asegurar una mejor compatibilidad entre los materiales e, incluso, realizar trabajos experimentales para poder evaluar los efectos de los aditivos orgánicos naturales, concretamente de exudados vegetales en morteros de cal (Benaidés, Y., 2006).

### **iii. PLAN DE TRABAJO**

Los objetivos de esta investigación se centran en los siguientes aspectos: por un lado, en la recopilación de información a través de fuentes históricas y la investigación paralela con métodos instrumentales de análisis adecuados, que nos ayuden a entender las técnicas antiguas de manufactura de los morteros y, en consecuencia, de los estucos de la pintura mural maya. Por otro lado, la puesta a punto de un método de elaboración de morteros de cal normalizados de aplicación en el campo de la restauración, que permita un control de calidad adecuado sobre sus constituyentes. Partiendo de estas premisas, la presente tesis doctoral se divide en dos grandes partes, nombradas PARTE 1 y PARTE 2. Seguidamente se pasa a desarrollar el plan de trabajo que corresponde a cada parte, respectivamente:

#### **PARTE 1. ESTUDIO ARQUEOMÉTRICO DE LOS ESTUCOS DE LA PINTURA MURAL MAYA**

Para abordar una investigación como la que aquí se presenta es necesario combinar la metodología de trabajo que es característica de las disciplinas humanísticas con la que procede del área de las ciencias experimentales de análisis. Por lo que respecta a la primera disciplina, se ha tenido en cuenta la bibliografía especializada, de tipo histórico mayoritariamente, que registra rastreos científicos en las fuentes etnohistóricas y etnolingüísticas que cuentan con estos tipos de datos. Eso permite interpretar correctamente varios de los resultados que se derivan de la caracterización de las materias primas del entorno geológico y de los estucos de los sitios arqueológicos seleccionados. Y, por lo que respecta a la segunda de ellas, la metodología experimental sigue el propósito de conseguir llevar a cabo el objetivo planteado mediante el aprovechamiento de técnicas instrumentales de análisis, como la Microscopía Óptica (MO), la Microscopía Óptica de Polarización (MOP), la Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR), la Difractometría de rayos-x (DRX) y la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDX); y la optimización de técnicas instrumentales avanzadas y no tan convencionales, como la Microdifractometría de rayos-x ( $\mu$ DRX), la Microscopía Electrónica de Transmisión (MET) y la Cromatografía de Gases/Espectrometría de Masas (GC/MS).

La metodología de estudio observada en la bibliografía especializada pone de manifiesto que la caracterización de morteros antiguos se debe abordar de manera integral (Ávarez, J.I. *et al.*, 2006), estableciendo un plan de trabajo que engloba diferentes áreas de investigación y diferentes profesionales, claramente relacionados entre sí, sobre el estudio de morteros y su aplicación

en el patrimonio (Hansen, E.F. *et al.*, 2003): conservación (conservación de los morteros de cal); historia (conocimiento sobre los morteros de cal y su uso a lo largo de la historia); caracterización y análisis (investigación científica a través de técnicas instrumentales de análisis adecuadas para la determinación de la composición y las propiedades físicas de los morteros); comportamiento (refleja las modificaciones que experimentan las propiedades del material con el paso del tiempo); y tecnología (incluye recopilación sobre el proceso de obtención de la cal, elaboración de los morteros, su evolución en el tiempo y la investigación sobre las formas tradicionales de elaboración). En esta tesis doctoral, el área de investigación que se establece como objetivo de la PARTE 1 es la caracterización y el análisis de las capas de preparación de los estucos de la pintura mural maya. A continuación, en la figura 1 se presenta el plan de trabajo seguido en esta investigación, teniendo en cuenta las siguientes especificaciones:

(\*1) el contexto histórico y arqueológico de las fuentes escritas y de la tradición oral → se ha tenido en cuenta la bibliografía especializada, de tipo histórico mayoritariamente, que registra rastreos científicos en las fuentes etnohistóricas y etnolingüísticas que cuentan con este tipo de datos.

(\*2) el muestreo → las muestras que forman parte de esta investigación fueron obtenidas y transportadas al LAFQYM del IRP, entre 2002 y 2004, gracias a las dos tesis doctorales que M<sup>a</sup> Luisa Vázquez de Ágredos Pascual realizó sobre la pintura mural maya, entre el año 2000 y 2007, dirigidas por la Dra. Cristina Vidal Lorenzo (2006, Universidad de Valencia) y la Dra. M<sup>a</sup> Teresa Doménech Carbó (2007, Universidad Politécnica de Valencia), y después de las gestiones administrativas y burocráticas que fueron aprobadas por el Consejo Superior de Arqueología de México, el 2002 y después del consentimiento de los directores de los sitios y de los proyectos arqueológicos implicados en la investigación.

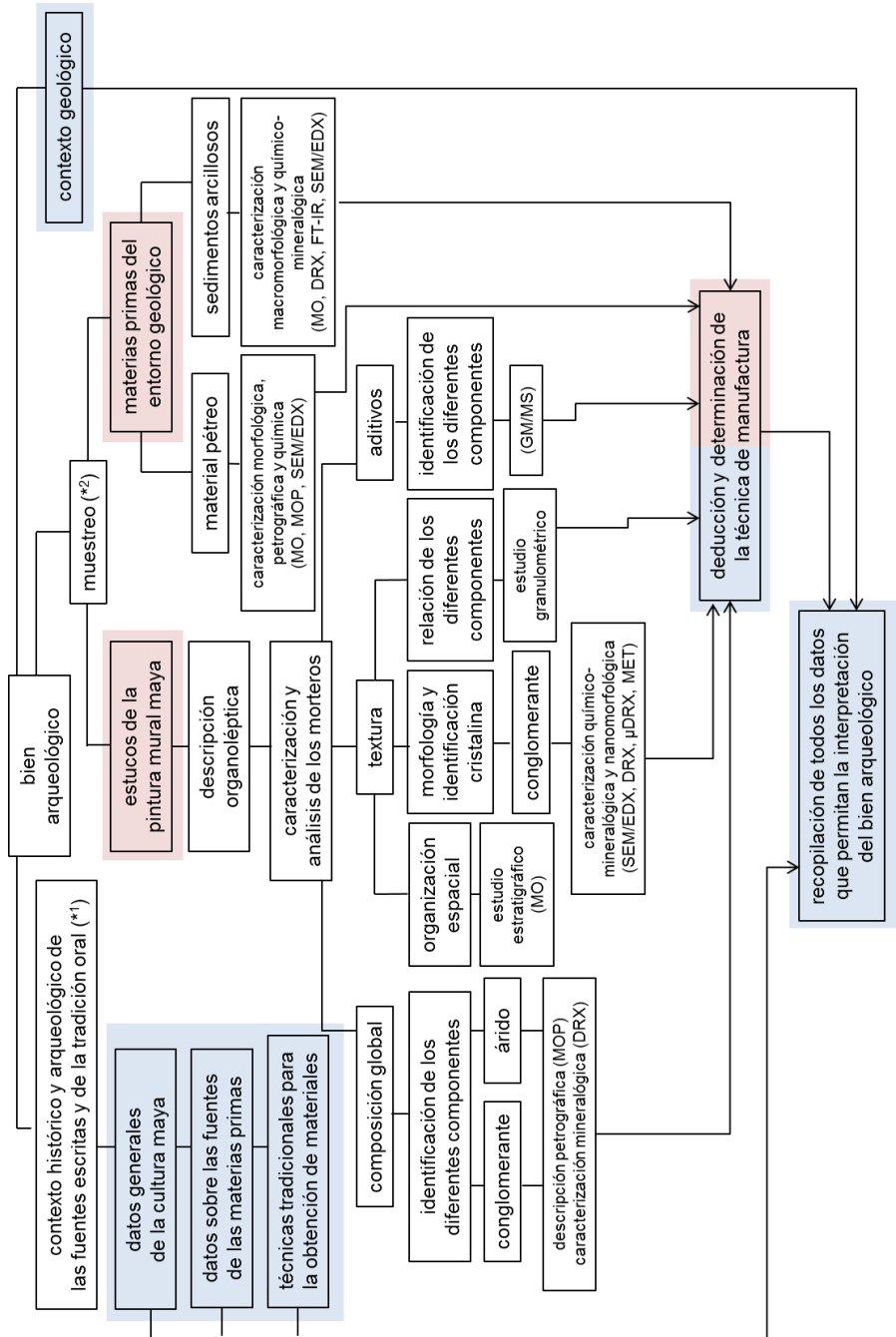


Figura 1. Diagrama de flujo del plan de trabajo de la PARTE 1. Los asteriscos (\*1) y (\*2) del diagrama están desarrollados en el párrafo anterior al diagrama

## PARTE 2. NUEVAS PERSPECTIVAS EN LA ADAPTACIÓN Y EL USO DE ADITIVOS HISTÓRICOS EN LOS MORTEROS DE CAL TRADICIONALES

La puesta a punto de un método de elaboración de morteros de cal normalizados de aplicación en el campo de la restauración que permita un adecuado control de calidad sobre sus constituyentes se establece a partir de la investigación experimental de morteros de cal tradicionales con incorporación de aditivos orgánicos naturales a su matriz cementante y de las variaciones en sus características físico-mecánicas.

Esta parte se plantea a partir de los resultados arqueométricos obtenidos en la caracterización de los morteros de cal tradicionales, en este caso, los morteros de las capas de preparación de los estucos de sitios arqueológicos de la cultura maya (PARTE 1 de esta investigación). En este sentido, hay que tener en cuenta, sobretodo, la aplicación que se pretende obtener del mortero elaborado. Así pues, el aspecto de las aplicaciones permite establecer la primera clasificación de los morteros, que se dividen en tres grandes grupos: morteros para obra, morteros para revestimiento y morteros especiales. En esta investigación, el mortero a elaborar es un mortero para revestimiento, que incluye dos grandes subgrupos, según la norma (UNE-EN 998-1:2010<sup>2</sup>): los morteros de “revoco” y los morteros de “enlucido”. La normativa establece estos dos conceptos aclarando lo que representan según la posición relativa del revestimiento: “revoco” para exteriores y “enlucido” para interiores.

La elaboración del mortero de cal con incorporación de aditivos orgánicos naturales de esta investigación se plantea de tal manera que este cumpla las características establecidas por los morteros de restauración (Ávarez, J.I. *et al.*, 2006): deben ser similares al mortero a sustituir; compatibles con los otros elementos de fábrica (morteros, piedra, ladrillo macizo, etc.); de fácil trabajabilidad, rapidez y seguridad en su colocación; de características físico-mecánicas similares al resto de la fábrica; de compatibilidad, docilidad y mínima retracción; de adherencia adecuada; de permeabilidad baja, así como resistentes en el tiempo.

Así pues, se considera apropiada la elección de una cal aérea en pasta<sup>3</sup>, como conglomerante del mortero a elaborar, ya que por un lado, ésta normalmente

---

<sup>2</sup> UNE-EN 998-1:2010. *Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido.*

<sup>3</sup> Según Rosell, J.R. (2013) la cal en pasta (pasta añeja de cal apagada o cal añeja) es la que ha pasado directamente de óxido a pasta y se ha conservado siempre con exceso de agua; y, la pasta de cal es la fabricada a partir de añadir agua al hidróxido de calcio en polvo. Este autor también especifica que en terminología anglosajona las expresiones utilizadas por diferentes autores son *slaked lime putty* para la cal en pasta y *hydrated lime putty* para la pasta de cal. Y para terminar,



se prescribe como preferente a otras formas que ofrece el mercado en obras de restauración (Rosell, J.R., 2013). Y, por otro, tal y como apunta Rosell (2013): *actualmente se dispone de escasa información técnica precisa, en relación a las diferencias en la carbonatación y las propiedades físicas de los morteros elaborados a partir de esta cal en pasta, una vez endurecido*. De este modo, los resultados de esta investigación se suman a la escasa información técnica sobre este tipo de morteros de cal en pasta.

Por lo que respecta al árido del mortero, la granulometría se ajusta a su uso específico. La norma UNE-EN 13139:2003<sup>4</sup>, establece la medida del árido para “revocos” y “enlucidos” < 1mm. En esta investigación, se quiere conseguir un mortero apropiado para la manufactura de las capas intermedias de un estuco de textura fina conveniente, también, en caso de realizar reposiciones volumétricas de pérdida de revestimiento. Siguiendo todas estas premisas, se establece una distribución de medida de grano < 1mm, de forma angulosa, para que favorezca la formación de una estructura interna más compacta y, al mismo tiempo, propicie la unión del mortero al apoyo (Pocostales, L. *et al.*, 2010); de composición carbonatada; mezclados en una relación en masa 1:2, ya que según Gárate (1994), en general, los revocos de cal y arena oscilan entre una dosificación 1:2 a 1:3, tal como han corroborado los resultados arqueométricos de la PARTE 1 de esta investigación.

Asimismo, la función de la incorporación de aditivos<sup>5</sup> en masa es aportar a las propiedades del mortero, tanto en estado fresco como endurecido, determinadas modificaciones bien definidas y de carácter permanente. Los aditivos aptos para morteros deben cumplir las exigencias prescritas en la norma UNE-EN 934-3:2004. Estos componentes pueden producir una única modificación a las características del mortero (función principal) o, además, modificaciones adicionales (función secundaria) (Rodríguez-Mora, O., 2003). Los aditivos más comunes se clasifican según las propiedades que confieren en el mortero, es decir, conforme a su función principal, en los siguientes grupos principales: modificadores del contenido en aire (aireantes),

---

este mismo autor especifica que la norma UNE 41 066:1955 define la cal en pasta como: “(...) *cal apagada a la que se ha añadido durante su hidratación, un exceso de agua sobre la indispensable para formar el hidróxido. Ofrece un aspecto exterior pastoso.*” (Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo. UNE 41 066 Cales para construcción. Definiciones. Madrid: INRT, 1955).

<sup>4</sup> UNE-EN 13139:2003. *Áridos para morteros*.

<sup>5</sup> Sustancias o materiales añadidos antes o durante la mezcla del mortero en pequeñas cantidades con relación a la masa del conglomerante (su proporción no supera el 5 % en masa del contenido del conglomerante), según la Norma UNE-EN 934 3:2004. *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 3: Aditivos para morteros para albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado*).

modificadores de la reología en estado fresco (plastificantes), modificadores del tiempo de carbonatación (retardadores), hidrofugantes y retenedores de agua (Rodríguez-Mora, O., 2003). Los ensayos experimentales normativos que se plantean en esta investigación nos determinan las propiedades, en concreto, que nos aportan los dos aditivos orgánicos naturales de origen vegetal seleccionados a partir de su identificación, por medio de técnicas instrumentales de análisis no convencionales, en los morteros de las capas de preparación de los estucos de la pintura mural maya. Estos tipos de metodologías experimentales nos acercan al conocimiento empírico de los antiguos artistas y nos ayudan a manufacturar estrategias y materiales adecuados para la restauración.

A continuación, se presenta la campaña de ensayos experimentales realizados para llevar a cabo el desarrollo de la PARTE 2 de esta investigación (Figura 2).

Los laboratorios e instituciones que han hecho posible los ensayos experimentales de la PARTE 2:

**ETSIE-UPV** → Laboratorio de Materiales del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

**NR/DED-LNEC** → *Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do Departamento de Edifícios do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.*

**NPC/DM-LNEC** → *Núcleo de Materiais Pétreos e Cerâmicos do Departamento de Materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.*

**LAFQYM-UPV** → Laboratorio de Análisis Físicoquímico y Medioambiental de Obras de Arte del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio (IRP) de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

**IETcc-CSIC** → Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, centro del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), perteneciente al Área de Ciencia y Tecnología de Materiales, Madrid.

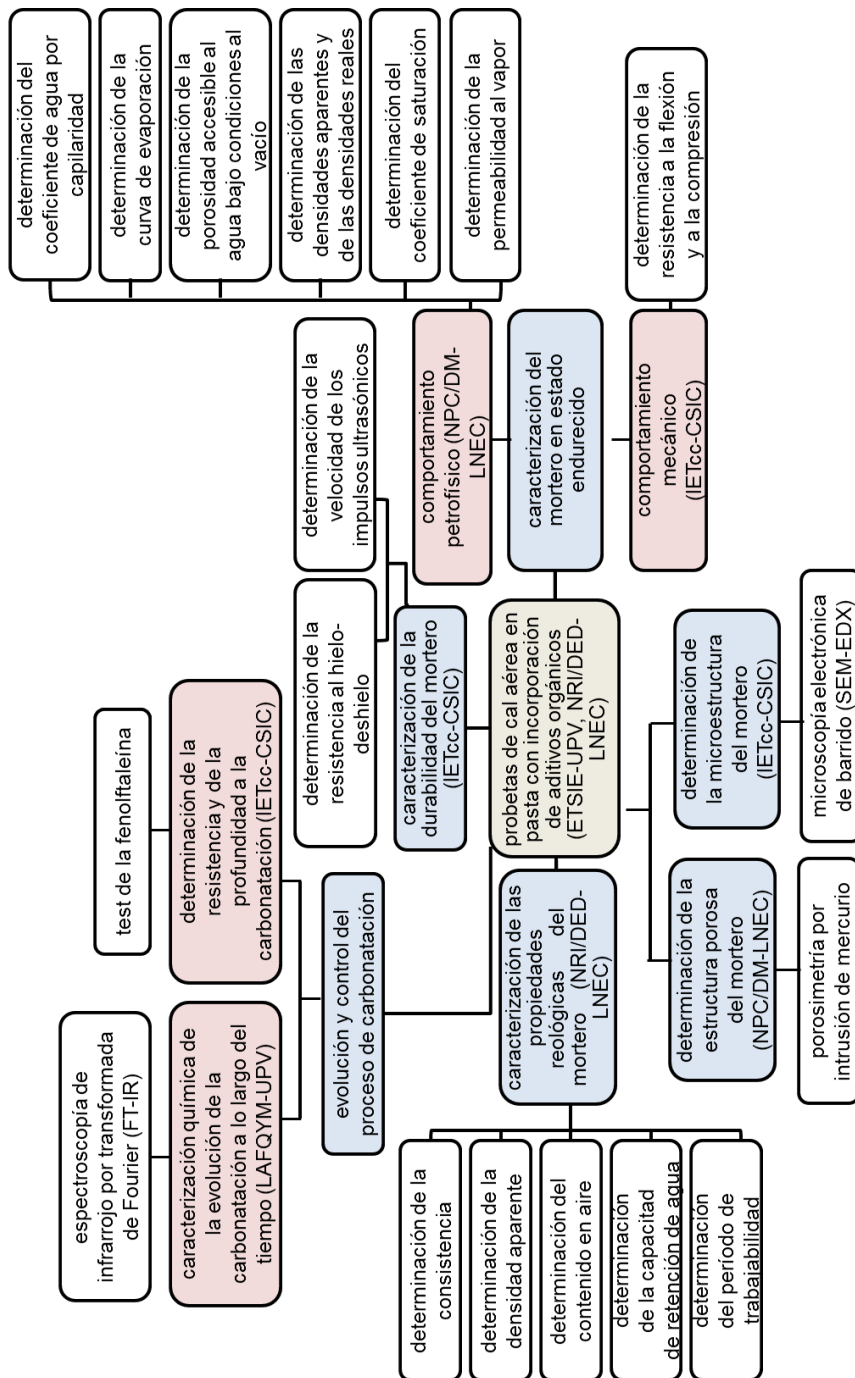


Figura 2. Diagrama de flujo del plan de trabajo de la PARTE 2

**PARTE 1. ESTUDIO ARQUEOMÉTRICO DE LOS ESTUCOS DE LA  
PINTURA MURAL MAYA**

## 1.1. MORTEROS DE CAL DE LAS CAPAS DE PREPARACIÓN

### 1.1.1. ANTECEDENTES

#### 1.1.1.1. Descripción del contexto

##### 1.1.1.1.1. Ubicación geográfica

La expansión de la cultura maya afectó a una parte significativa del territorio mesoamericano, esta demarcación corresponde en la actualidad a diferentes países de América Central: Guatemala, Honduras, El Salvador, Belice y una parte del sur de México (Figura 3). Una parte de la actual Chiapas y Tabasco, y la Península de Yucatán al completo fueron mayas, paralelamente el resto de México desarrolló desde tiempos del Preclásico Temprano otras importantes culturas precolombinas, la cultura olmeca (en la Costa del Golfo), la teotihuacana (en el centro de México), la tolteca (en el centro de México), la asteca o mexica (en el centro de México), la zapoteca o mixteca (Oaxaca) o la mezcala y tarasca (en el área occidental de México) (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010).



Figura 3. Mapa de la ubicación geográfica de Mesoamérica: Guatemala, Honduras, El Salvador, Belice y una parte de México (una porción de Chiapas y Tabasco, y la Península de Yucatán). Fuente: <[www.famsi.org](http://www.famsi.org)> Foundation for the Advancement of Mesoamerican Studies.

La diversidad medioambiental presente en la cultura se explica por el alcance de su zona de influencia (Figura 4). Por este motivo, el ámbito de influencia maya se ubica en tres grandes áreas: las Tierras Bajas, las Tierras Altas y la denominada Área de Transición, localizada entre las dos anteriores. Estos tres territorios se diferencian principalmente por la altitud en la que se encuentran, las Tierras Bajas se encuentran a 500 metros sobre el nivel del mar, las Tierras de Transición a unos 600 metros y, finalmente, las Tierras Altas a unos 800 metros. A la vez, en la zona de las Tierras Bajas se distinguen dos regiones, las Tierras Bajas Mayas del Norte y las Tierras Bajas Mayas del Sur. Hay que apreciar que en las Tierras del Sur se dan un importante número de precipitaciones facilitando un frondoso ecosistema selvático. En la demarcación de las Tierras Bajas se encuentran las actuales zonas de Chiapas y Tabasco, el sur de los estados mexicanos de Campeche y Quintana Roo, y el departamento de El Petén de Guatemala. En cambio, la zona de las Tierras Bajas Mayas del Norte, región objeto de estudio de este trabajo de investigación, se extiende desde el norte del estado mexicano de Yucatán hasta el norte de Campeche y Quintana Roo (Figura 5) (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010; Munoz, G., 2006).



Figura 4. Mapa de la ubicación geográfica de la zona maya de México. Se expande desde el norte del estado mexicano de Yucatán hasta el norte de Campeche y Quintana Roo. Fuente: <www.famsi.org> *Foundation for the Advancement of Mesoamerican Studies*.



Figura 5. Mapa del territorio maya con la distribución de sus principales regiones geográficas, subregiones y sitios arqueológicos. Fuente: <www.famsi.org> *Foundation for the Advancement of Mesoamerican Studies*.

### 1.1.1.1.2. Marco cronológico

El origen de la cultura maya se sitúa en el Preclásico Temprano (ca. 1800 a.C - 900 a.C) y continúa en el Preclásico Medio (ca. 900 a.C - 300 a.C), aunque no fue hasta el Preclásico Tardío (ca. 300/250 a.C - 250/300 d.C) cuando los mayas adquieren la complejidad político-social, económica, religiosa y cultural que son propias de las sociedades que reúnen las condiciones de una civilización. Estudios arqueológicos recientes apuntan a la existencia de una jerarquización social (complejidad social); de intercambio a media y larga

distancia (complejidad económica); la presencia de estados (complejidad política); la construcción de panteones (complejidad religiosa); la presencia de la arquitectura monumental en los centros de los antiguos sitios mayas, siempre vinculada a la élite social; de obras públicas; el arte que legitima el poder; la escritura; el urbanismo y, por lo que respecta a la complejidad cultural, especialistas a tiempo completo (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010).

La etapa Clásica también se divide en tres fases conocidas como Clásico Temprano (ca. 300 d.C - 600 d.C), Clásico Tardío (ca. 600 d.C. - 800 d.C) y Clásico Terminal (ca. 800 d.C - 950/1000 d.C), siendo durante la segunda de estas fases cuando la cultura maya llega a su edad de oro. Si bien es cierto que cada ciudad maya tuvo su propia etapa de esplendor, no siempre fue coincidente con el Clásico Tardío, lo que convierte este hecho en un poco más complejo del que se consideró décadas atrás. De esta manera, uno de los momentos de mayor esplendor en la ciudad y reino de *Calakmul* (estado de Campeche, México), pasa a ser en el Clásico Temprano, de la misma manera que pasa con *Acanceh* (estado de Yucatán, México), incluido en la investigación. Por su parte, otras ciudades como las de *Chacmultún* y *D'zula* (estado de Yucatán, México) vivieron su mayor bonanza en el Clásico Tardío, y *Ek'Balam* o La Blanca, esta última localizada en El Petén, lo hicieron a caballo entre el Clásico Tardío y el Terminal (Vidal, C. *et al.* (Eds.), 2005, 2006 y 2007). El último período del Clásico Terminal se inicia un proceso de decadencia en algunos territorios del ámbito maya, principalmente en las Tierras Bajas Mayas del Sur. Esta situación es el punto de partida del período Posclásico Temprano (ca. 950/1000 d.C-1200 d.C), donde algunos de los grupos toltecas, que hasta entonces estaban establecidos en el Centro de México, se establecieron en algunos de los sitios mayas del norte de la Península de Yucatán. Por ejemplo, los *xiu* llegaron hasta la ciudad de *Uxmal* (estado de Yucatán, México), los *itzaes* hasta la de *Chichén Itzá* (estado de Yucatán, México) y los *cocom* hasta la de *Mayapán* (estado de Yucatán, México), donde estuvieron hasta finales del Posclásico Tardío (ca. 1200 d.C-1521 d.C) (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010) (Figura 6). Su presencia y gobierno en estas ciudades favorecieron el contacto entre las antiguas tradiciones mayas y las toltecas que fueron importadas en tiempos del Posclásico Temprano por estos grupos desde el Altiplano, lo cual se manifestó en el ámbito de la arquitectura y de las artes (Sharer, R.J., 1998).

A partir del año 1521 d.C., con la conquista de la ciudad de *Tenochtitlán* por parte de los españoles comandados por Hernán Cortés, se inicia la caída del mundo prehispánico tanto en la zona de influencia maya, como en toda Mesoamérica. Sin embargo, la sustitución cultural y la desaparición del imperio maya no fueron inmediatos, en muchas zonas sobrevivieron diferentes ámbitos culturales mayas que no desaparecieron hasta muchos años después. Este es



el caso de la ciudad de *Tah Itzà* (departamento de El Petén, Guatemala) que no cedió hasta el año 1697 (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010).

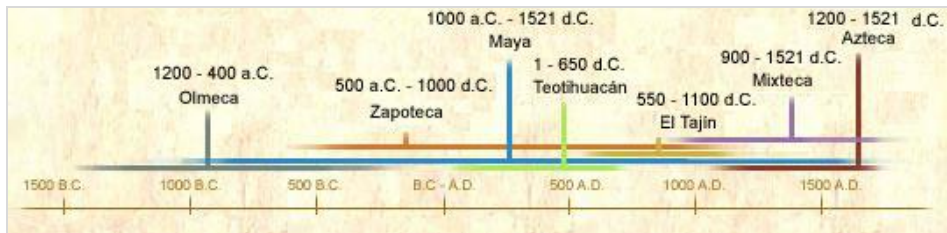


Figura 6. Esquema cronológico de las diferentes culturas mexicanas donde se ubica la cultura maya. Fuente: <www.famsi.org> *Foundation for the Advancement of Mesoamerican Studies*.

### 1.1.1.2. Breves apuntes sobre la arquitectura maya

#### 1.1.1.2.1. Arquitectura maya y espacio urbano

En el período Preclásico Medio se origina el urbanismo y la arquitectura monumental en Mesoamérica y es en la última fase de este período que alcanza su madurez y esplendor. A grandes rasgos, se trata de una arquitectura planteada a partir de plataformas y basamentos piramidales, con una alta calidad de materiales y con unas técnicas constructivas muy sofisticadas. Así, algunas de las construcciones más relevantes de este período se encuentran en *Uaxactún*, en *Tikal* o en *Nakbé* (El Petén guatemalteco), en *Cerros*, en *Cuello* y en *Lamanai* (Belice), o en *Komchén* y en *Dzibilchaltún* (Península de Yucatán, México). Estas viviendas eran utilizadas por la aristocracia maya y integraban diversos elementos diferenciadores con dos objetivos, remarcar simbólicamente su categoría, relacionándola con la de sus residentes, y identificar su función (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010; Muñoz, G., 2006).

Nos encontramos delante un modelo arquitectónico ubicado en un patrón urbanístico de trazado radiocéntrico donde las clases bajas se ubicaban en la periferia y las clases dominantes o altas en el centro de la trama urbana. Por tanto, es en el centro de la trama urbana donde se encuentra esta arquitectura excepcional. Los principales elementos decorativos son las superficies de estuco con los que se revestían los edificios y la pintura mural; no obstante, para este objetivo también se utilizaron otros elementos, como el grafito o los diversos relieves y motivos escultóricos policromos que aparecen en sus fachadas y cresterías. Muchos de estos elementos todavía son visibles a pesar de los diversos problemas de conservación generados por el entorno selvático

en el que se encuentran. Muchos de estos problemas son generados por factores de alteración externos como el grado de humedad, la temperatura, el abandono de los sitios o el biodeterioro propio de estos contextos (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010; Muñoz, G., 2006).

#### **1.1.1.2.2. Los materiales y las tipologías de la arquitectura maya**

El principal material de construcción de la arquitectura de las Tierras Bajas Mayas fue la piedra caliza, con algunos casos excepcionales donde se ha observado la utilización de otros materiales con la misma finalidad, con la piedra arenisca, la riolita o la traquita, estas últimas altamente resistentes dada su génesis en zonas volcánicas. En cuanto a la piedra caliza, esta procedía de muchos de los afloramientos presentes en esta zona de Mesoamérica durante aquel período. Principalmente, esta piedra se extraía de su cantera de origen a nivel de superficie, mediante rudimentarias herramientas de piedra y mangos o palos de madera. Los bloques extraídos se repicaban a pie de cantera hasta alcanzar la forma querida para, a continuación, trasladarlos a la obra y utilizarlos en lo que fuera necesario (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010; Muñoz, G., 2006).

Se construyeron multiplicidad de estructuras arquitectónicas para diferentes usos –algunos de carácter civil y otros de carácter religioso–, todas ellas, pero, utilizando la piedra caliza. Las primeras en construirse fueron las estructuras palaciegas de carácter residencial, normalmente estructuradas en imponentes Acrópolis, y los mercados, como los mercados de *Chichén Itzá*, *Tikal* o *Caracol*. En otro orden de las cosas, conviene señalar que las tipologías edilicias de tipo religioso más comunes de esta arquitectura fueron los templos, los juegos de pelota, los edificios astronómicos, los baños de vapor y los laberintos, estos últimos menos abundantes que los anteriores. Por supuesto, la función desarrollada por estos edificios condicionó inevitablemente tanto su forma como los elementos constructivos y decorativos presentes. En buena medida, el análisis de todos estos elementos permiten comprender y delimitar los usos presentes en el interior de estos edificios. Así pues, tanto la tipología de la edificación como los elementos constructivos y decorativos posibilitan la identificación de estos usos originales. Sin embargo, a menudo, hay que asumir una perspectiva multidisciplinar para delimitar más cuidadosamente estos usos; así, la historia del arte, la historia, la edafología o la epigrafía son disciplinas útiles y necesarias para esta descodificación de los usos mencionados (Muñoz, G., 2006).

### 1.1.1.3. El estuco en la arquitectura maya

Fue precisamente en la cultura maya donde el arte del estuco<sup>6</sup> y, más exactamente, su manufactura técnica, consiguió el mayor y más excelso desarrollo, según manifiestan las imponentes y elegantes superficies calcáreas que revistieron la arquitectura monumental del área maya del Preclásico (ca. 2000 a.C - 300 d.C) (Hansen, E. *et al.*, 1997; Hansen, E. *et al.*, 2002) y del Clásico (ca. 300 d.C-950/1000 d.C) (Magaloni, D., 1996, 2001 y 2004; Vargas de la Peña, L. *et al.*, 2001 y 2002; Vidal, C. *et al.* (Eds.), 2005, 2006 y 2007; Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010), sirviendo a la vez como base de preparación de pinturas murales de gran complejidad iconográfica. Desde entonces, y hasta la fecha, estas arquitecturas pintadas del área maya han conservado con mayor o peor fortuna sus revestimientos de estuco pintados, con una gran calidad técnica, ya que de otro modo no se explicaría su supervivencia total o parcial después del abandono que sufrieron estas ciudades precolombinas en tiempo de la Colonia (siglos XVI, XVII y XVIII) rodeadas por la selva húmeda y la microfauna que hoy continúa amenazando su perdurabilidad. Tal capacidad de resistencia explica que estas superficies calcáreas captaran rápidamente la atención de arqueólogos, arquitectos, historiadores del arte, químicos y especialistas de la conservación y la restauración, que desde finales del siglo XIX las han investigado con el propósito de profundizar en la tecnología de la cal que fue utilizada para su manufactura.

### 1.1.1.4. La composición mineral de los estucos en la zona maya

La composición mineral de los estucos mayas fue ya documentada en los diccionarios que se redactaron durante los primeros años de la Colonia. En este sentido, la mezcla de cal que se preparó como mortero de la capa de preparación recibía el nombre de *yach' te aan* o *yach' – bil te aan*, mientras que *zac* o *zac bitun* fue la que se destinó a la capa pictórica. El significado de este último término en lengua maya yucateca es “barniz blanco sobre lo que asentaban sus pinturas los pintores”, el cual estaba constituido por una “tierra blanca que se obtenía de las cuevas” (Álvarez, C., 1984:237-238).

---

<sup>6</sup> El término *estuco* se ha empleado en la arqueología mexicana para designar de manera genérica los materiales a base de cal, ya sean para la construcción de pisos, aplanados, morteros de reajuntar o para otros fines constructivos o decorativos. Aun así, en otros países se usan los términos *argamasa* o *mortero* para designar los mismos materiales (Villaseñor, I. *et al.*, 2011:83). En esta tesis doctoral se usará este término como genérico a raíz de su uso generalizado en la literatura especializada.

Más adelante, arquitectos del siglo XIX como Viollet Le Duc (Viollet Le Duc, E., 1838:40-46) y el arquitecto y dibujante Frederick Catherwood (Catherwood, F., 1844:spp) hicieron referencia a estas superficies estucadas y determinaron que se trataban de mezclas calcáreas altamente resistentes. A la vez, a finales del mismo siglo, el científico William Holmes a través del *Smithsonian Institute*, corroboró estos resultados después de analizar diferentes muestras (Holmes, W., 1895:168).

A principios del siglo XX, pero, se produjo un cambio dentro el campo arqueológico, la arqueología mesoamericana tomó impulso y recibió financiación de instituciones nacionales e internacionales. Así, la arqueología que estudiaba el ámbito maya fue financiada por la *Carnegie Institution of Washington* y el *Museu Peabody* de la Universidad de Harvard. En este contexto, entre los años 1924 y 1954 se desarrolló el proyecto denominado *Proyecto Chichén Itzá*, impulsado por la *Carnegie Institution of Washington*, donde se hicieron los primeros análisis químicos (concretamente durante el año 1931) de la pintura mural maya (Morris, A., 1931:347-384). Los resultados obtenidos permitieron ver que el revestimiento de estuco sobre el que se pintó el mural estaba conformado por dos sustratos de idéntica composición calcárea (Merwin H.E., 1931:395). Finalmente, entre los años 50 y 60 del siglo XX, Littman realizó una serie de investigaciones sobre la caracterización de los estucos mayas, especialmente la del uso de los agregados<sup>7</sup> calcáreos - *sascab*<sup>8</sup>- para su manufactura (Littman, E., 1957, 1958a, b, 1959a, b, 1960a, 1962, 1966).

Sólo a partir del año 1995, y en trabajos posteriores relacionados con la caracterización de los estucos del área maya, empezaron a escucharse los nombres de nuevos compuestos de origen inorgánico que la química analítica empezó a identificar en asociación a la cal y el *sascab* con el que los mayas prepararon las citadas capas de preparación, que en su mayoría están constituidas por dos únicos estratos. Estos nuevos elementos asociados al *sascab* fueron: materiales carbonatados de diferente naturaleza (fragmentos de rocas calizas molidas y trituradas, de rocas calizas dolomíticas, de rocas dolomíticas, de rocas calizas fosilíferas, fragmentos de estalactitas o estalagmitas del subsuelo y nódulos de cal); materiales no carbonatados (arena

---

<sup>7</sup> Los agregados son los materiales inertes que se mezclan con la cal para posteriormente ser aplicados sobre superficies arquitectónicas. Estos materiales inertes suelen ser arenas y gravas locales de diversas naturalezas (Villaseñor, I. *et al.*, 2012:16). El término agregado es sinónimo de material de carga o árido.

<sup>8</sup> Agregado utilizado en las pastas de cal del área maya es una arena calcítica denominada *sascab* (tierra blanca) en maya yucateca (Falcón, T., 1999). Este término se desarrollará posteriormente en el apartado 1.1.1.4.2 de esta tesis doctoral.

de cuarzo, barita, yeso, micas, feldespatos potásicos o alcalinos, plagioclasas, cordierita, minerales del grupo de la serpentina y cristobalita); fragmentos fósiles (foraminíferos, moluscos bivalvos); y, fragmentos de estucos reciclados (Magaloni, D., 1996, 2001; Hansen, E., *et al.*, 1995, 1997, 2002; Mateos, F.I., 1997; Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>. L., 2006; García-Solís, C.A. *et al.*, 2006; Goodall, R.A., *et al.* 2007; Villaseñor, I., *et al.*, 2008, 2009, 2010; Villaseñor, Y, 2010). Esta diversidad vigente en la selección y la utilización de los agregados, que se denota en los estudios realizados, responde en gran parte a la diversidad geológica de la Península de Yucatán, al aprovechamiento de los materiales disponibles localmente (Barba, L., 2013) y, en menor medida, a una tecnificación por parte de los mayas que se fue diferenciando en los diferentes períodos históricos prehispánicos.

Algunas de estas últimas aportaciones anuncian que los resultados obtenidos por la microscopía electrónica de barrido combinada con la microanálisis de rayos-x por dispersión de energías (SEM/EDX), por un lado, muestra la presencia de arcillas acompañando la cal, localizadas mayoritariamente en la capa subyacente de la capa pictórica, en los sitios arqueológicos del norte de la Península de Yucatán del período Clásico (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>. L., 2006). Por otro lado, la presencia de arcillas también se denota en las muestras estudiadas de las inscripciones de la cripta funeraria de Palenque (Villaseñor, I. *et al.*, 2008).

Asimismo, mediante la difracción de rayos-x (DRX), se detecta illita en los estucos del sitio arqueológico de *Calakmul* (García-Solís, C.A. *et al.*, 2006). Posteriormente, la presencia de arcillas en estos sitios arqueológicos queda confirmada mediante la microscopía óptica de luz polarizada (MOP) y los resultados de fluorescencia de rayos-x (FRX) en las muestras arqueológicas del período Clásico Terminal (Villaseñor I. *et al.*, 2009, Villaseñor, I., 2010). Estos autores confirman la tendencia a sustituir la cal por tierras y arcillas durante los últimos estadios del período Clásico y lo relacionan con la evidencia del incremento de la deforestación en el área maya (Gunn, J. *et al.*, 2002).

Otro aspecto a tener en cuenta, es la presencia e identificación de compuestos puzolánicos en los estucos mayas. Se han determinado partículas de ceniza volcánica y esquirlas de vidrio volcánico como parte integrante de algunos estucos mayas, de los sitios arqueológicos de *Palenque*, *Calakmul* y *Lamanai*, que han dado lugar a reacciones puzolánicas<sup>9</sup> (Villaseñor, I. *et al.*, 2009, 2010;

---

<sup>9</sup> Las reacciones puzolánicas son las reacciones químicas que se producen entre materiales de sílice y alúmina reactivos con la cal apagada (hidróxido de calcio). Las reacciones resultan en silicatos y aluminosilicatos de calcio hidratados, los cuales proporcionan mayor dureza a la cal, así

Villaseñor, I., 2010). Según Villaseñor (2011), esta identificación hace pensar que los mayas conocían bien las reacciones puzolánicas de la cal con el vidrio volcánico y mezclaban estos materiales de forma intencionada, ya que se encontraban a su alcance de manera local o regional.

Por último, hay que mencionar la detección de materiales meteoríticos<sup>10</sup> en los estucos de *Palenque*. En este estudio, se caracterizan materiales que parecen corresponder a materiales de impacto, posiblemente del meteorito de Chicxulub que impactó en la Península de Yucatán a finales del período cretácico (Villaseñor, I., 2010). La incorporación de estos materiales en la manufactura de los estucos mayas, también podría corresponderse a una acción premeditada de los mayas de crear estucos puzolánicos.

En este sentido, los resultados que se han reunido hasta la fecha exigían seguir profundizando en el estudio de la composición mineral de estas capas de preparación de los estucos mayas en época prehispánica y planteaban nuevas preguntas que han sido abordadas en la investigación que aquí se presenta.

#### **1.1.1.5. La preparación de la cal y del árido entre los mayas**

##### **1.1.1.5.1. Los recursos materiales: el entorno geológico**

Entender la geología<sup>11</sup> de la Península de Yucatán se hace indispensable para poder aproximarse a las preocupaciones y a los interrogantes que fueron comunes entre los especialistas de la cultura maya que trabajaron los abundantes recursos materiales de la zona para la manufactura de la cal (las rocas calizas y la madera como combustible). El especialista de la época, en las Tierras Bajas Mayas del Norte, tenía que conocer muy bien su entorno para seleccionar el material más adecuado y, así, conseguir un rendimiento óptimo en la manipulación de los recursos calcáreos que ofrece sobradamente la plataforma kárstica calcárea de la Península de Yucatán.

---

como la capacidad de fraguar bajo la agua. La cal resultante se conoce como cal puzolánica (Villaseñor, I. *et al.*, 2011).

<sup>10</sup> Esta detección de materiales meteoríticos en los estucos de *Palenque* es poco probable, ya que los sondeos geológicos realizados actualmente detectan las capas de impacto del meteorito a una profundidad tal que hace difícil pensar que estos materiales llegasen a los sedimentos más superficiales y fuesen usados por los mayas.

<sup>11</sup> La geología (del griego γη (geo, "tierra"), y λόγος (logos, "ciencia") es la ciencia que estudia la Tierra, su historia y los procesos que le han dado forma.

Desde el punto de vista geológico, la Península de Yucatán es una unidad formada por sedimentos masivos calcáreos de la era Cenozoica, que forma parte de la provincia geográfica del Golfo y la Plana del Caribe, con características morfológicas y estructurales muy similares. Fisiográficamente, se caracteriza por ser una superficie kárstica con un escenario de erosión dentro de su ciclo geomorfológico, donde existen cavidades y conductos, variando desde poro y fracturas, hasta grandes cavernas, dolinas<sup>12</sup> o *cenotes* abiertos o crípticos, en especial en la parte norte. La edad de la formación de las rocas, mayoritariamente calcáreas, en esta península está en el rango de la época del Paleoceno hasta el Pleistoceno<sup>13</sup> (Figura 7).

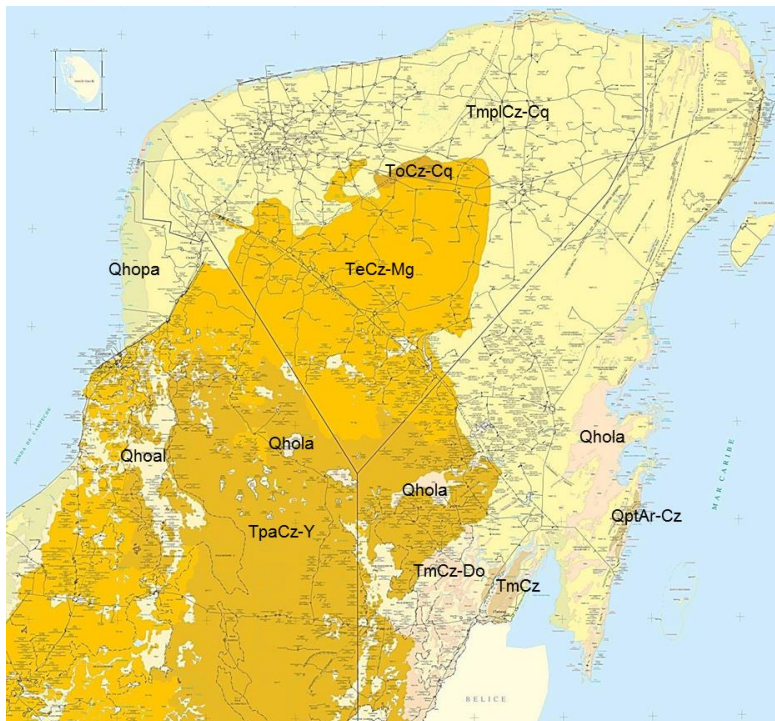


Figura 7. Mapa geológico de la Península de Yucatán. *Carta Geológico-Minera. Estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Escala 1:500.000. Servicio Geológico Mexicano, 2007 (SGM, 2007b).* Fuente: <<http://mapasims.sgm.gob.mx/GeoInfoMexDb/>>.

<sup>12</sup> Depresión cárstica circular en forma de embudo, de dimensiones muy variables, formada por disolución de rocas generalmente calizas. Denominadas *cenotes* del maya, *dz'onot* en lengua maya.

<sup>13</sup> Teniendo en cuenta, el sustrato geológico más externo que forma el relieve actual.

Nomenclatura normalizada de las facies litológicas de la columna estratigráfica del mapa geológico, de más antiguas a más modernas: TpaCz-Y. Fm. Xpujil (época Paleocena, período Paleógeno (Terciario)); TpaCz-Y. Fm. Icaiché (época Paleoceno, período Paleógeno (Terciario)); TeCz-Mg. Fm. Chichén Itzá (época Eoceno, período Paleógeno (Terciario)); TmCz. Fm. Bacalar (época Mioceno Superior, período Neógeno (Terciario)); TmCz-Do. Fm. Estero Franco (época Mioceno Superior-Plioceno, período Neógeno (Terciario)); TmplCz-Cq. Fm. Carrillo Puerto (época Mioceno-Plioceno, período Neógeno (Terciario)); QptAr-Cz, Qpt(?)Ar, Qpt(?)Cq-Ar, QptCq-Cz. Bioclastos Seyba Playa, Qpt(?)Cgp-Ar (época Plistoceno, período Cuaternario); QhoCz, Qholi, Qhopa, Qhola, Qhoal (época Holoceno, período Cuaternario).

Los primeros estudios de reconocimiento geológico, que estudiaron las formaciones de la era Cenozoica en los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo, ya establecieron que la secuencia o serie estratigráfica<sup>14</sup> comprendía rocas sedimentarias carbonatadas de edades<sup>15</sup> más jóvenes al norte y más antiguas al sur de la Península del Yucatán, tal y como se puede observar en la figura 7 (Sapper, K., 1896; Tercier, J., 1932; Álvarez, J.R., 1954; Butterlin, J. *et al.*, 1960). Además, López Ramos, E. (1973) recopila los datos de todos estos estudios previos, así como de informes inéditos desarrollados por geólogos de Petróleos Mexicanos, PEMEX (1947, 1952, 1953, 1965) y define un material de *caliche*<sup>16</sup> reciente que cubre gran parte de la península y que se forma indiscriminadamente sobre casi todas las rocas del subsuelo, ya sean de la época del Eoceno, del Oligoceno y del Mioceno-Plioceno, el cual dificulta el levantamiento geológico de la Península de Yucatán, ya que oscurece la información geológica superficial, especialmente en la parte central y en el norte de la península (López Ramos, E., 1975).

A mediados de la década de los años 70, se establece la actual comprensión geológica de la Península de Yucatán basándose en los resultados de las perforaciones petrolíferas y en los de los estudios geofísicos, gravimétricos y magnéticos de toda la península (López Ramos, E., 1975; Aguayo, J. E. *et al.*,

---

<sup>14</sup> Conjunto de estratos presentes en una región, dispuestos en el mismo orden en qué se depositan. Su disposición es importante, dado que el estudio de sus características litológicas y del contenido en restos fósiles hace posible deducir las condiciones existentes en la zona durante su formación.

<sup>15</sup> La tabla de los tiempos geológicos se utiliza en geología para describir y relacionar acontecimientos de la historia de la Tierra. Se organiza en eras, períodos, épocas y edades nombradas a partir de acontecimientos geológicos o paleontológicos relevantes.

<sup>16</sup> *Caliche*: costra carbonatada, más o menos cementada, que forma una o varias capas. Es característica de los suelos de las zonas áridas y semiáridas. Producto friable de la erosión calcárea en este ambiente tropical húmedo. Este material cubre el subsuelo con una fina capa (0,1 a 0,5 m) o con capas masivas de material (0,5 a 10 m).



1980; Ward, W.C, 1985; Lefticariu, M. *et al.*, 2006; Bahlburg, H. *et al.*, 2010; Schulte, P. *et al.*, 2010; Cabadas, H. *et al.*, 2010; Urrutia-Fucuganchi, J. *et al.*, 2011; Solleiro-Rebolledo, E. *et al.*, 2011; Bautista, F. *et al.*, 2011a). Ésta se expone a continuación dividida en tres subapartados: la estructura geológica de la Península de Yucatán, la historia geológica de la Península de Yucatán y, la composición litológica y la estructura estratigráfica de la Península de Yucatán.

### *La estructura geológica de la Península de Yucatán*

La Península de Yucatán tiene una geomorfología muy característica, es una penillanura<sup>17</sup> con una escasa altura sobre el nivel del mar. La zona central tiene un relieve más abrupto, siendo la máxima altitud de 275 m, correspondiendo a la Sierra Yucateca, alrededor de Ticul, producto de procesos tectónicos, mayoritariamente resultante de dos fallas con desplazamiento vertical de distensión, pero con dos direcciones bien diferenciadas: la falla transformante<sup>18</sup> de Ticul<sup>19</sup> (NO40°SE), de dirección nordeste a suroeste, buzando<sup>20</sup> hacia el este; la falla Campeche-Hecelchakán (NE55°SO – NE30°SO), que varía su orientación de nordeste a suroeste, buzando hacia el oeste (ver el corte geológico de la Figura 10 y la Figura 11).

Posteriormente, sobre este paisaje dominado por altos y valles o depresiones de origen tectónico se fue desarrollando un modelo erosivo de tipo kárstico, debido a la composición calcárea del sustrato rocoso. Así pues, se trata de una plataforma carbonatada con una pendiente reducida que se extiende bajo las aguas del Golfo de México para formar una subplataforma submarina llamada Banco de Campeche (Figura 8).

---

<sup>17</sup> Superficie de gran extensión, generalmente erosiva, con algunos desniveles muy débiles, a veces recubierta por suelos y sedimentos.

<sup>18</sup> Una falla transformante o borde transformante es el borde del desplazamiento lateral de una placa tectónica con respecto a otra. Su presencia es notable gracias a las discontinuidades del terreno. Este tipo de fallas conectan las dorsales oceánicas o simplemente acomodan el desplazamiento entre placas continentales que se mueven en sentido horizontal.

<sup>19</sup> La falla de Ticul, ha tenido dos fases de actividad o movimiento: una primera y dominante de tipo transformante; y, otra posterior, postorogénica de distensión (explicación ampliada en el subapartado siguiente: *La historia geológica de la Península de Yucatán*).

<sup>20</sup> Desviación de la superficie de un estrato respecto de la horizontal.

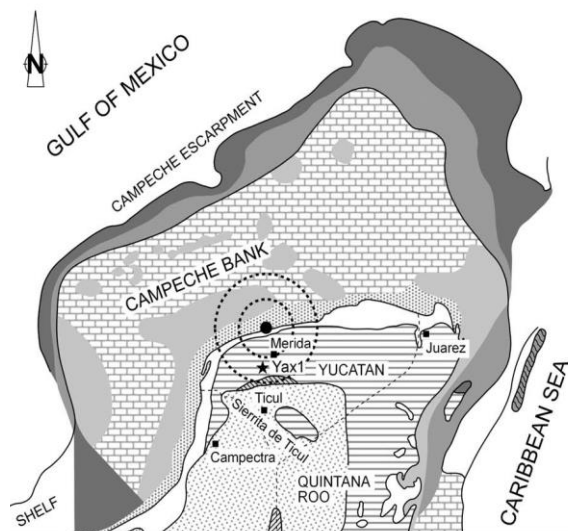


Figura 8. Mapa geológico de la Península del Yucatán donde se ilustra la subplataforma submarina denominada *Banco de Campeche*. Autor dibujo: Bahlburg, H. et al., 2010.

Según los sondeos profundos realizados en las prospecciones petrolíferas, esta plataforma tiene una espesura aproximada de 3.000 a 3.200 m y comprende materiales de edades que van desde el período Cretáceo hasta la época del Mioceno-Plioceno. Este rango de edades comprende la mayor parte de la era Mesozoica y la era Cenozoica, excepto la época del Oligoceno que casi no se observa, excepto en zonas muy limitadas, como son las áreas próximas a la falla de Ticul. De este modo, esta plataforma calcárea, con algún tramo entremedias más margoso o yesífero y con brechas polimícticas<sup>21</sup> y de colapso<sup>22</sup>, se asienta sobre un zócalo metamórfico que corresponde a la era Paleozoica. Solamente, en el extremo oeste de la plataforma, se asienta sobre la serie estratigráfica del período Triásico-Jurásico, el cual se encuña y desaparece hacia el este (Figura 9a y 9b).

<sup>21</sup> Roca sedimentaria detrítica de grano gordo, formada por cantos, elementos angulosos de medida superior a los 4 mm, con proporciones variables de matriz y cemento. La naturaleza de los cantos es de varios tipos de roca.

<sup>22</sup> Tipo de brecha originada por el colapso de cavidades. Los clastos son, en general, angulosos.

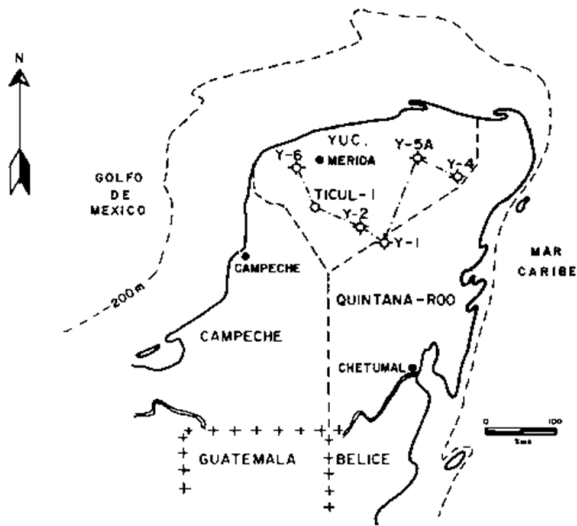


Figura 9a. Localización geográfica de los sondeos. Autor dibujo: Aguayo, J.E. *et al.*, 1980

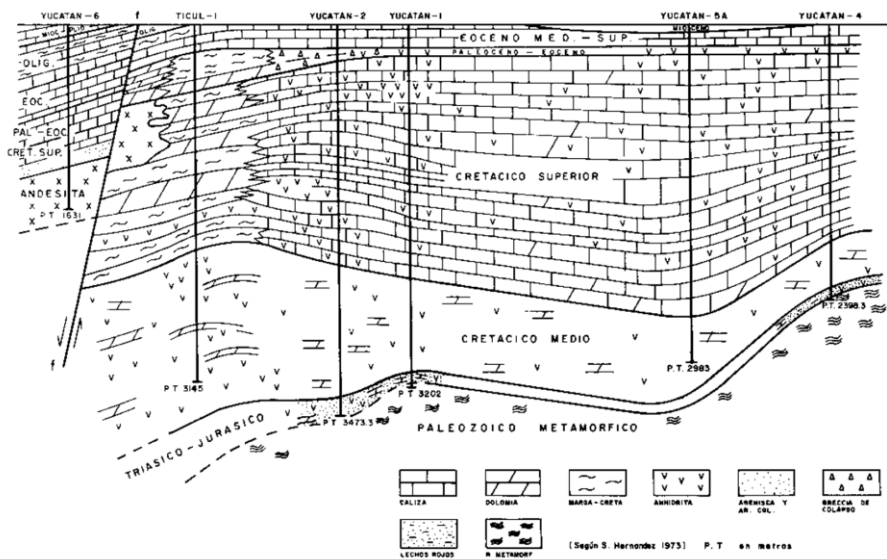


Figura 9b. Corte geológico del estado de Yucatán (NO-SE) realizado a partir de los sondeos. Acrónimos: Y-1, Y-2, Y-4, Y-5A, Y-6: sondeo Yucatán-1, 2, 4, 5A i 6; TICUL-1: sondeo Ticul-1; f: falla; OLIG: Oligoceno; EOC: Eoceno; PAL-EOC: Paleoceno-Eoceno; CRET.SUP.; Cretáceo Superior. Autor dibujo: Aguayo, J.E. *et al.*, 1980

En resumen, la Península de Yucatán presenta dos áreas estructurales geológicas bien diferenciadas (Servicio Geológico Mexicano. SGM, 2007b):

- Una zona central, relativamente elevada, de la época del Paleoceno y del Eoceno, suavemente plegada y fragmentada en bloques por fallas poco profundas y de escasa inclinación de era Cenozoica; y, también por fallas que están relacionadas a movimientos antiguos y más profundos de la placa tectónica, como es la falla de Ticul. En parte, esta zona se presenta intensamente carstificada con frecuentes dolinas y valles o depresiones tipo polje<sup>23</sup>.

- Una planicie precostera básicamente carbonatada, de la época del Mioceno-Plioceno, que rodea esta zona central, tanto por el norte, por el este como por una franja estrecha por el nordeste. Potencia alrededor de 220 m y estratificación prácticamente horizontal sin prácticamente afectación tectónica, excepto en el extremo nordeste. Además, en el extremo nordeste, existe una alineación de dolinas o *cenotes* que indica un grado de subsidencia importante, producto de la existencia en profundidad de un cráter provocado por el impacto de un meteorito (explicación ampliada en el subapartado siguiente: “La historia geológica de la Península de Yucatán”).

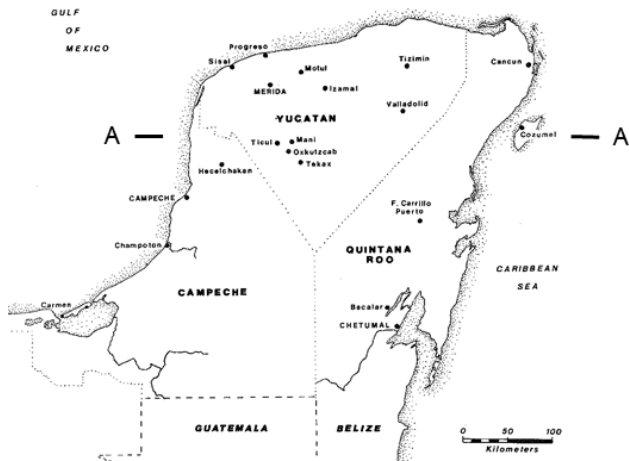
El contacto entre ambas zonas y sus correspondientes series estratigráficas varía según la zona: en la parte este, hacia la costa del Caribe, el contacto es menos abrupto y se aprecian cambios laterales de facies y escasas fracturas que, a veces, aparecen ocultas bajo los estratos de la cobertura sedimentaria más reciente. En cambio, en la parte oeste, el contacto está más afectado por movimientos tectónicos con fallas profundas, de distensión y buzamiento hacia el oeste, como la falla *Campeche-Hecelchakán* (NE55°SO – NE30°SO) que varía su orientación de nordeste a suroeste, buzando hacia el oeste (ver el corte geológico de la Figura 10 y la Figura 11). También se observa, en esta zona occidental, un buzamiento significativo de los estratos de la serie estratigráfica de la época del Mioceno-Plioceno con una vergencia hacia el oeste y un hundimiento, por debajo de la línea de costa, con el Golfo de México. Por último, por encima de estas dos áreas descritas se desarrolla, en primer lugar, durante el período Cuaternario antiguo (época del Pleistoceno), una cobertura sedimentaria principalmente carbonatada con ambientes sedimentarios muy diversos, la cual presenta una fuerte erosión kárstica; y, en segundo lugar, durante el período Cuaternario moderno (época del Holoceno) se desarrolla una amplia gama de paleosuelos<sup>24</sup>.

---

<sup>23</sup> Depresión cerrada de origen kárstico, de dimensiones kilométricas, bordes calcáreos y muy abruptos y fondo rocoso o recubierto de sedimentos, generalmente recurrido por un curso de agua.

<sup>24</sup> Suelos antiguos, formados en paisajes del pasado, bajo unas condiciones, principalmente climáticas, diferentes de las actuales, y que conservan constituyentes y morfologías atadas a las condiciones pasadas.

A continuación, se presenta un corte geológico<sup>25</sup> idealizado de la Península de Yucatán realizado a partir del mapa geológico de la Península de Yucatán (SGM, 2007b), de oeste a este (del punto A al A'), cortando los tres estados de la península, el estado de Campeche, el de Yucatán y el de Quintana Roo (Figura 10).



<sup>25</sup> A modo de síntesis, a partir del corte geológico se puede resumir la evolución geológica de la Península de Yucatán: (1). La plataforma carbonatada se asienta sobre un zócalo de era Paleozoica y una pequeña cuña del período Triásico-Jurásico (Fm. Todos los Santos); (2). Durante el período Cretáceo, de época superior se desarrolla una potente serie de materiales calcáreos. Especialmente en la mitad occidental de la plataforma, se alternan rocas calizas y rocas dolomías con episodios evaporíticos con yesos, margas y arcillas; (3). A finales del período Cretáceo, se produce el impacto del meteorito de Chicxulub y, posterior al impacto se genera una capa de roca andesítica pobre en sílice y rica en minerales ferromagnésicos. Esta capa de material es posible que se generara como producto de la fusión y posterior cristalización total o parcial de los materiales de la corteza por el impacto. Por encima, se le superpone una capa de brecha polimíctica formada por fragmentos del impacto mezclados con la roca de la corteza y, posteriormente una brecha de colapso de relleno del cráter de impacto; (4). Durante la época del Paleoceno y del Eoceno inferior, se activa una sedimentación de plataforma marina somera con episodios de regresión, la cual genera una serie estratigráfica evaporítica menos potente y diferente de la del período Cretáceo. Posteriormente, se deposita una serie estratigráfica calcárea, caracterizada por rocas dolomías y rocas calizas con nódulos de chert; (5). Tectónicamente, la orogenia Laramide pliega suavemente la serie estratigráfica de la época del Paleoceno-Eoceno y reactiva algunas fallas transformantes profundas correspondientes a los movimientos de las placas tectónicas. Estas fallas generan otras que son más secundarias y superficiales, especialmente en la zona central de la Península del Yucatán; (6). Durante la época del Plioceno, se favorece la formación de potentes espesuras de rocas calizas organógenas y/o bioclásticas en los bordes periféricos de la zona central. También, se detecta una etapa de subsidencia fuerte que se debe a los movimientos de distensión postorogénicos y al funcionamiento de casi todas las fallas con carácter de hundimiento o graben. Por último, la plataforma emerge a finales del período Terciario dejando una configuración general similar a la actual, aunque las oscilaciones del nivel del mar durante el período Cuaternario han modificado las amplias zonas próximas al litoral.

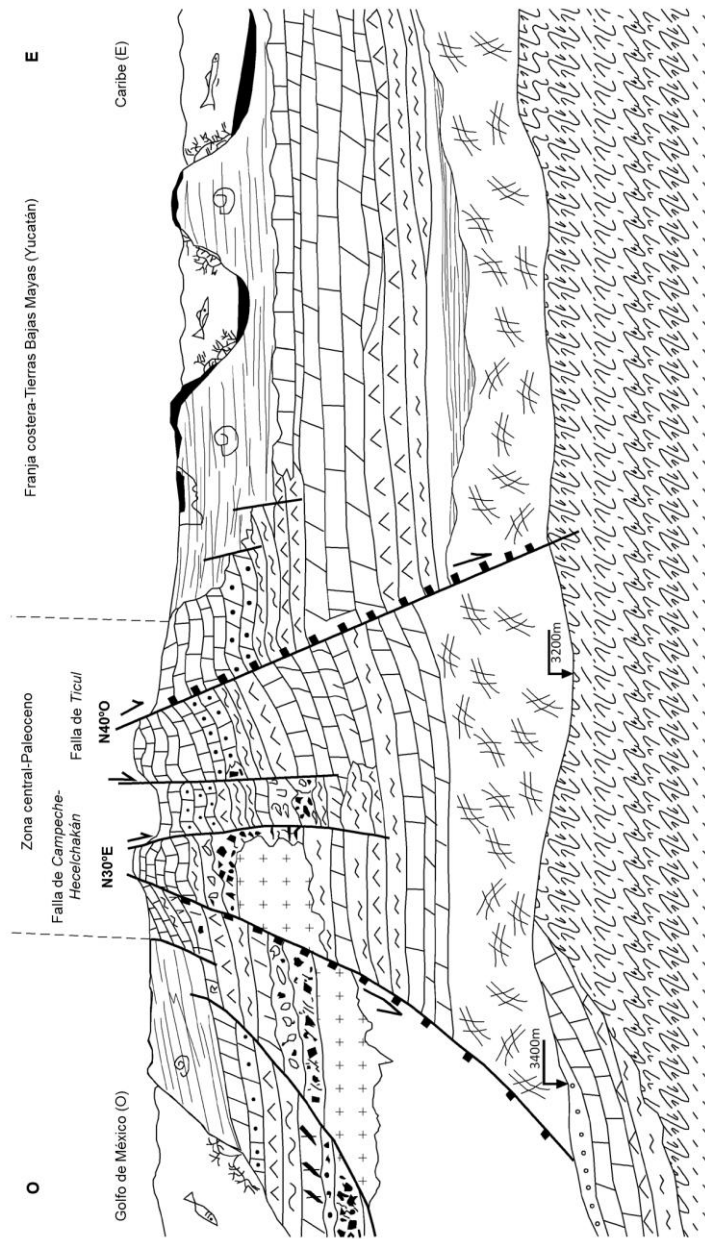
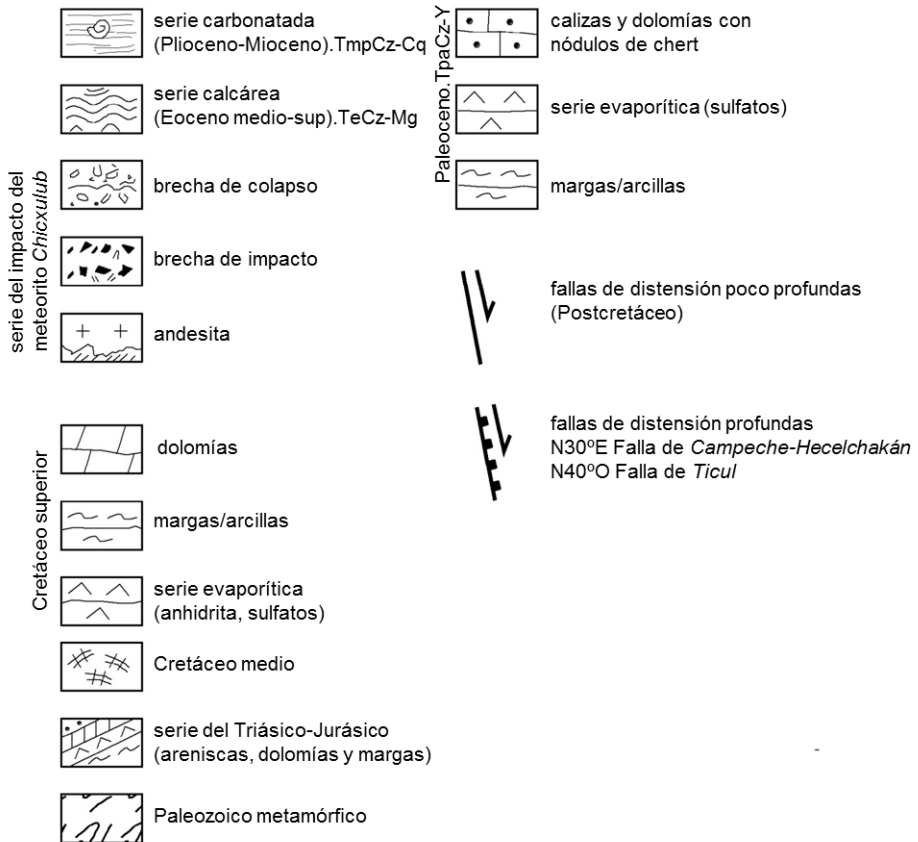


Figura 10. Corte geológico idealizado de la plataforma de Yucatán, de oeste a este (del punto A al A'). Escala 1:500.000. Escala profundidad: 1cm  $\approx$  130m. Autor dibujo: Prada, J.L., Guasch-Ferré, N. Infografía: Vázquez, E.

A continuación, se representa la leyenda de la figura 10:



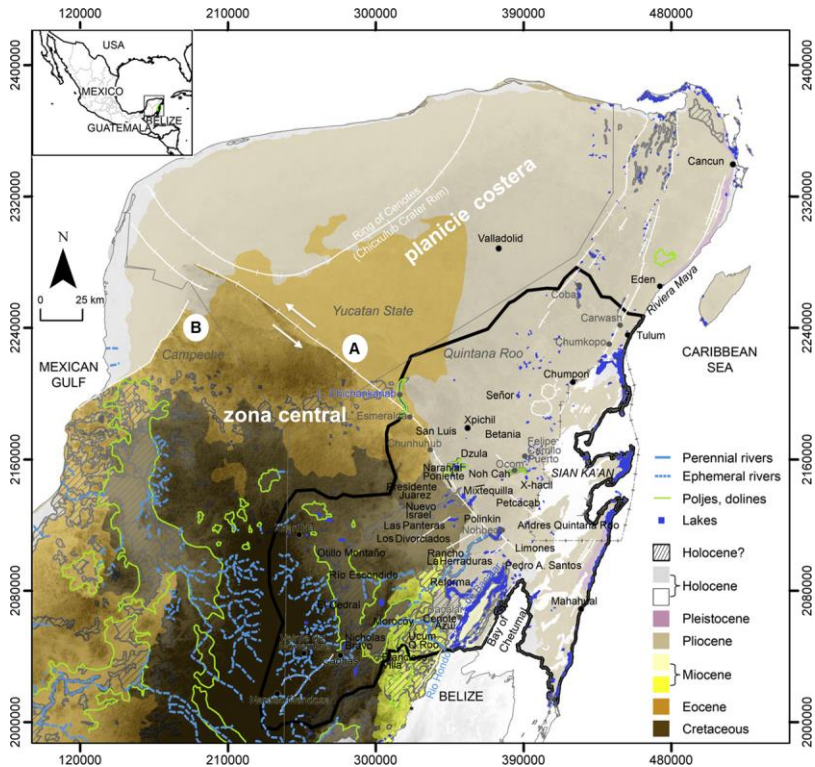


Figura 11. Estructura geológica y tectónica de la Península de Yucatán. Autor dibujo: Gondwe, B.R.N. *et al.*, 2010 modificado por el autor de la tesis. Acrónimos: A: Falla transformante de Ticul (NO40°SE); B: Falla de *Campeche-Hecelchakán* (NE55°SO-NE30°SO)

### *La historia geológica de la Península de Yucatán*

La historia geológica de la Península de Yucatán se inicia con la apertura del Golfo de México, en el período Triásico, de época superior. La deriva continental, la compleja dinámica de las placas tectónicas centroamericanas y el desarrollo de profundas y activas fallas transformantes, durante el período Jurásico, de época inferior y medio, acaban configurando una extensa plataforma marina (Tucker, M.E., 1985; SGM, 2005) que acumula una potente serie estratigráfica sedimentaria carbonatada, durante todo el período Cretáceo. Hay que añadir que en este período geológico, se individualiza la plataforma marina somera que conforma la Península de Yucatán, incluyendo la plataforma continental marina próxima correspondiente (entorno subacuático).



A finales del período Cretáceo, hace unos 65 Ma, se produce el impacto de un meteorito sobre la plataforma de Yucatán y la posterior formación del cráter submarino de Chicxulub, de unos 180 km de diámetro, y la fragmentación de la parte norte y nordeste de la plataforma. Su testigo estratigráfico es una capa cristalina de base, de composición similar a la andesita<sup>26</sup>; sobre este zócalo cristalino, se deposita una capa gruesa de brechas polimícticas con restos de tectitas<sup>27</sup> creadas por el impacto y, posteriores, brechas de colapso (Lefticariu, M. *et al.*, 2006; Schulte, P. *et al.*, 2010) que cubrieron grandes extensiones por todo Mesoamérica, durante el período Cretáceo, de época superior y el inicio de la época del Paleoceno, a muchos cientos de metros de la superficie<sup>28</sup>.

Hoy en día, en la superficie todavía se observa una alineación de *cenotes*, en círculos concéntricos, en el extremo nordeste de la península, alrededor del antiguo cráter de impacto. Estudios más recientes de carácter geofísico (Urrutia-Fucuganchi, J. *et al.*, 2011) han demostrado que el impacto afectó hasta unos 25 km de profundidad, o sea, toda la espesura de la corteza terrestre de esta zona. Además, creó un conjunto de fallas de subsidencia alrededor del círculo del impacto que explicaría la asimetría de la zona central de la Península de Yucatán con el extremo nordeste de la zona periférica costera (Figura 12).

---

<sup>26</sup> Roca básica y rica en minerales ferromagnéticos. En este caso, esta roca no se ha formado por la cristalización de un magma interno de la Tierra, sino por la fusión de las rocas de la corteza terrestre que sufrieron el impacto y como consecuencia del calor liberado.

<sup>27</sup> Vidrio natural formado a raíz de la fusión completa ocasionada por los impactos de meteoritos y dispersado en pequeñas gotas a causa de estos mismos impactos.

<sup>28</sup> Descubrieron un semianillo de dolinas (*cenotes*) con el centro en el poblado de Chicxulub, que se correspondía con el que Glen Penfield (geofísico descubridor del cráter) había visto anteriormente. Se creía que las dolinas o *cenotes* habían estado provocadas por la subsidencia de la pared del cráter del impacto. Pruebas más recientes sugieren que el cráter real mide 300 km de diámetro y que el anillo de 180 km es una pared interior.



Figura 12. La fotografía de radar revela el anillo de 180 km del cráter de Chicxulub; agrupados alrededor de la fosa del cráter hay numerosos dolinas o cenotes. Fuente: <www.lagranepoca.com> Universidad de Berkeley, modificada por el autor de la tesis.

A principios del período Terciario, después del cataclismo, se vuelve a una fase de sedimentación de la plataforma calcárea marina somera más tranquila, donde se desarrolla alguna área evaporítica con acumulación de yesos. En conjunto, se va rellenando el cráter de impacto, creado a finales del período Cretáceo, y se depositan sedimentos marinos someros en toda la plataforma de Yucatán, de la siguiente manera:

- Durante la época del Paleoceno y del Eoceno se va acumulando una potente serie estratigráfica carbonatada con rocas dolomías y rocas calizas parcialmente silicificadas con nódulos de chert<sup>29</sup>. Todo este conjunto estratigráfico constituye la zona central y la parte sur de la Península de Yucatán, en el estado de Campeche. Independientemente de los efectos del impacto, la compleja tectónica de placas del Golfo de México genera movimientos y la consecuente deriva de la plataforma hacia el sureste. De modo que, desde el período Cretáceo, de época superior (edad Maastrichtiano) hasta la época del Eoceno inferior, la plataforma de Yucatán se ve afectada por una fase de plegamiento tardía, la orogenia Laramide<sup>30</sup> (SGM, 2005), que levanta la plataforma y, posteriormente pliega muy suavemente la serie estratigráfica del período Terciario.

<sup>29</sup> Roca sedimentaria integrada por cuarzo de varias texturas cristalinas, de cripto a microcristalina, fundamentalmente, y formas de sílice opalina. En rocas carbonatadas (calizas y dolomías), que es nuestro caso, se suele presentar como un reemplazo (en forma de nódulos) o como cemento.

<sup>30</sup> La orogenia Laramide fue un proceso de formación de montañas que se produjo en el oeste de América del Norte y que empezó en el período Cretáceo superior, hace unos 70 a 80 Ma atrás y acabó hace de 20 a 55 Ma.

Consecuentemente, esta serie estratigráfica sedimentaria se fractura mediante una serie de fallas, que en el primer momento son de tipo inversa<sup>31</sup> con algún cabalgamiento local y, que en un segundo momento, después de la orogenia Laramide, son de tipo normal<sup>32</sup>. La actividad de estas fallas normales provoca el hundimiento y el levantamiento de bloques creando, a la larga, pequeños cerros.

No obstante, hay que añadir que es complejo diferenciar esta fase tectónica muy moderada y las fallas normales que se han cartografiado en la superficie (Servicio Geológico Mexicano, SGM) de otras fallas, más profundas y extensas, que cortan el nordeste de la Península de Yucatán. Estas fallas son fracturas relictas, cicatrices, en la corteza terrestre, del antiguo impacto meteorítico, que aún mantienen una cierta actividad de subsidencia, tal y como se observa en la alineación, en círculos concéntricos, de los *cenotes* respecto al antiguo cráter de impacto. Además, existe otro tipo de falla, como la de Ticul, de tipo transformante, más antigua que las otras y mucho más profunda, la cual se origina por los movimientos de las placas tectónicas.

Esta última etapa postorogénica (Laramide) de la historia geológica es la responsable del tipo de paleorelieve irregular que conforma la morfología de la zona central de la Península de Yucatán.

- Esta morfología abrupta que se acaba de exponer contrasta con la grande planicie precostera que rodea la zona central ya mencionada. Esta extensa penillanura periférica está constituida por sedimentos de la época del Mioceno y del Plioceno en los que no se detecta ningún componente significativo, ni ningún sedimento generado y correspondiente al episodio del impacto del meteorito, ya que estos están recubiertos por una gruesa serie estratigráfica carbonatada correspondiente a la época del Paleoceno-Eoceno que, a su vez, ha sido recubierta por sedimentos más modernos de la época del Mioceno-Plioceno. Es decir, el registro del episodio del impacto del meteorito está a cientos de metros de profundidad.

Por este motivo, hay que mencionar que la detección de materiales meteoríticos en los estucos de *Palenque*, que hace Villaseñor, I. (2010:118), atribuyéndolos a materiales procedentes del registro del impacto del meteorito de Chicxulub, es errónea. Cabadas, H. *et al.* (2010), detecta restos de cenizas

---

<sup>31</sup> El labio levantado se apoya sobre el plan de falla. Se originan por fuerzas compresivas. Hay disminución de la superficie.

<sup>32</sup> El labio hundido se apoya sobre el plan de falla. Su origen es por fuerzas de distensión, dado que hay un aumento de la superficie.

volcánicas, en los suelos de la Península de Yucatán, procedentes de las cadenas volcánicas de América Central y el Caribe. Su naturaleza vítrea, similar a la de las tectitas del meteorito, puede haber provocado las interpretaciones erróneas que se establecen de los materiales vítreos caracterizados en los estucos mayas de *Palenque*.

- A finales del período Terciario, la plataforma calcárea del Yucatán queda emergida debido a las oscilaciones del nivel del mar. Posteriormente, a comienzos del período Cuaternario antiguo (época del Pleistoceno), debido a la alternancia de períodos glaciales de carácter regresivo con períodos interglaciares de carácter transgresivo, se genera una serie estratigráfica principalmente carbonatada de ambientes sedimentarios de plataforma costera o de desarrollo kárstico-tropical, de espesura y estructura variable según la zona o el afloramiento: *lacustrine*, *palustrine*, *lagoon-sea*, *reef*, *dune*<sup>33</sup>.

En las zonas de la planicie prelitoral, se ha podido estudiar y diferenciar una estratigrafía significativa de los ciclos de las glaciaciones cuaternarias: sedimentos lacustres, palustres y de *lagoon* que nos indican las transgresiones interglaciares. Además, en estos sedimentos se observan episodios de sedimentos arenosos, llamados *eolianitas*<sup>34</sup> intercalados de forma sucesiva, los cuales están relacionados con campos de dunas de plataforma costera emergida, indicativos de una regresión por descenso del nivel del mar, debido a períodos glaciales (Cabadas, H. *et al.*, 2010).

Cada área geográfica, según su entorno geológico en general y litológico en particular, desarrolla una serie estratigráfica específica o característica, que condiciona la selección de los materiales que utilizaron los mayas para manufacturar las capas de preparación de sus estucos, tanto por el conglomerante como por el árido o agregado. Un buen ejemplo de este hecho, se ve en la zona oriental del litoral, donde se ha determinado una serie estratigráfica característica de plataforma costera, de la época del Pleistoceno superior, en la que se reconocen varias facies litológicas bien diferenciadas, tal y como se muestra en la figura 13 y 14: (a). la secuencia estratigráfica de la época del Pleistoceno superior está coronada por una costra de *caliche* (meteorización subaérea) con (b). rizocreciones<sup>35</sup> (antigua zona de raíces); (c).

---

<sup>33</sup> *lacustrine* (ing.) = lacustre (cast.); *palustrine* (ing.) = palustre (cast.); *lagoon-sea* (ing.) = laguna-playa (cast.); *reef* (ing.) = arrecife (cast.); *dune* (ing.) = duna (cast.)

<sup>34</sup> Sedimentos depositados por procesos eólicos, es decir, por la acción del viento. En su uso común, el término se refiere específicamente a la forma más común de *eolianita*: la de costa calcárea que consiste en sedimentos superficiales carbonatados de origen biogénico marino, formados en dunas costeras por el viento, y litificados posteriormente.

<sup>35</sup> Evidencia de raíces de plantas.

calcarenitas bioclásticas y oolíticas con una estratificación ligeramente cruzada y pocos *burrows*<sup>36</sup> (ambiente *foreshore-backshore*); (d). calcarenitas con una estratificación casi horizontal, *burrows* que decrecen hacia arriba, gravas con conchas, corales y intraclastos (ambiente *upper shoreface*); (e). calcarenitas con una estratificación ligeramente cruzada, *burrows* que incrementan hacia abajo (ambiente *lower shoreface*); (f). calcarenitas con zonas micritizadas, abundantes moluscos (ambiente *offshore*); (g). conglomerados lenticulares con clastos de caliche, corales, conchas y esponjas (depósitos de transgresión); (h). el paquete de material sedimentario descansa sobre una superficie de costra de caliche (corteza subaérea ahogada por la subida del nivel del mar), por debajo de la cual se localiza la roca caliza de la época del Pleistoceno medio (Tucker, M.E. *et al.*, 1990:117).

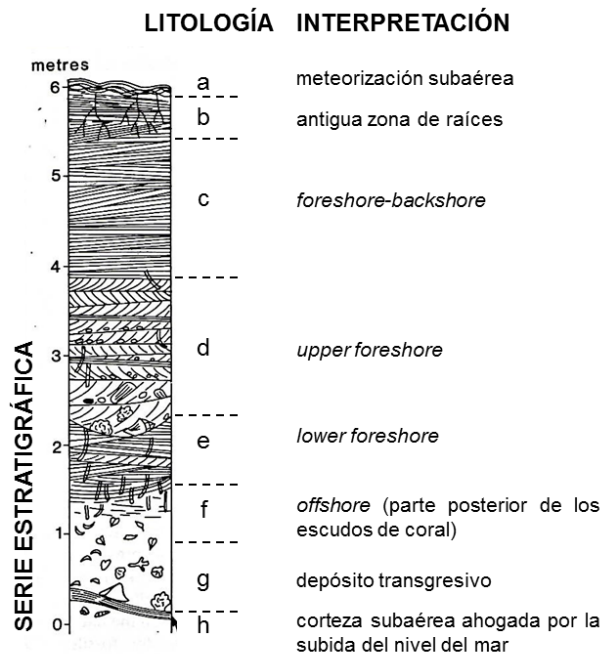


Figura 13. Serie estratigráfica idealizada del nordeste de la Península del Yucatán. Autor dibujo: Tucker, M.E. *et al.*, 1990:117. Interpretación de los ambientes sedimentarios respecto la topografía de la playa (Figura 14): *foreshore*, la “playa” estrictamente; *backshore*: “después de la playa”. Sólo llegan las tormentas. El oleaje producido por las tormentas arrastra sedimentos a esta zona. El material más fino del sedimento de la zona de *foreshore* y *backshore* es retrabajado por el viento y transportado detrás de la

<sup>36</sup> Excavación creada por un organismo en sedimentos no consolidados (bioturbación), como consecuencia de su alimentación, desplazamiento, o creación de una morada. Los organismos bioturbadores son variados.

zona de *backshore* formando las dunas costeras; *offshore*: mar abierto, donde ya no hay acción del oleaje; *upper*: superior; *lower*: inferior.

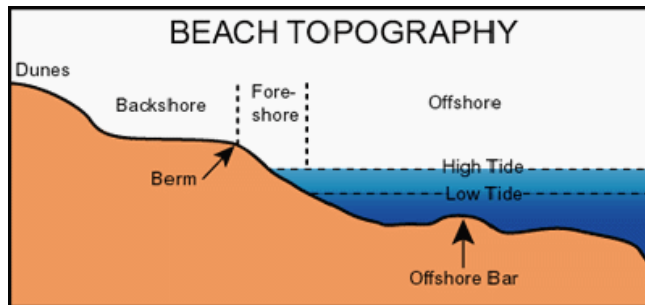


Figura 14. Topografía de la playa. Fuente: <<http://www.iteachbio.com/Marine-Biology/marine.html>>

- Finalmente, durante el período Cuaternario moderno (época del Holoceno), se diversifican aún más las condiciones de sedimentación, derivadas de las condiciones climáticas, del tipo de vegetación, del balance hídrico y pluviométrico y del inicio de las actividades agrícolas por parte de los asentamientos humanos con la consecuente deforestación por la tala y la quema de árboles. Todos estos condicionantes generan una gran variedad de suelos sobre el sustrato del período del Cuaternario antiguo y depósitos de relleno kárstico en cuevas y *cenotes*. En algunos casos, este recubrimiento está constituido por una capa calcárea endurecida llamada *calcisol*<sup>37</sup>, vocablo que en otros términos geológicos se indica como *caliche*<sup>38</sup> o *calcreta*, de escasa espesura en algunas zonas y, en cambio, en otros puntos tiene varios metros de espesura y está conformado por suelos complejos con diferentes estratos de carácter poligénico<sup>39</sup> que se superponen en los depósitos del período Cuaternario antiguo (época del Pleistoceno) (Solleiro-Rebolledo, E. *et al.*, 2011; Bautista, F. *et al.*, 2011a).

<sup>37</sup> El término *calcisol* deriva del vocablo latín *calcarium* que significa "calcáreo". En la clasificación de los suelos de la FAO, *World Reference Base for Soil Resources*, es un suelo con una acumulación secundaria sustancial de cal. Son comunes en ambientes calcáreos áridos y semiáridos.

<sup>38</sup> El término *caliche* proviene del latín *calx* que significa "cal". En inglés se conoce como *caliche*, *hardpan*, *calcrete* o *duricrust*. Por lo tanto, el término *caliche* es sinónimo de *calcreta*: material carbonatado formado por precipitación de carbonato de calcio en suelos.

<sup>39</sup> Los suelos poligénicos son aquellos suelos que han seguido dos ciclos o más de desarrollo consecutivos, al haber estado incursos a una sucesión de condiciones de clima, vegetación, topografía y drenaje diferentes de los actuales.

## *La composición litológica y la estructura estratigráfica de la Península de Yucatán*

Esta plataforma kárstica está constituida por una amplia variedad de litologías con una distribución muy heterogénea, que implican varios usos en la manufactura de las capas de preparación de la pintura mural maya, desde la fabricación de la cal a la generación de material como agregado o árido (Espinosa, L. *et al.*, 1998). De aquí la importancia de conocer la heterogénea distribución litológica de las rocas calizas de la Península de Yucatán, la cual se debe a los distintos ambientes diagenéticos<sup>40</sup> que participan en su formación. Del *Texto explicativo de la Carta Geológica de México* (SGM, 1992, 2007a) se extrae, en primer lugar, que en la plataforma de Yucatán, la secuencia marina de la era Cenozoica es de tipo carbonatado-evaporítico, con contenido escaso de material terrígeno, y que su espesura máxima es de unos 1000 m (López Ramos, E., 1973) y, en segundo lugar, que la nomenclatura de la serie estratigráfica correspondiente al período Terciario sedimentario marino de la plataforma de Yucatán, actualmente responde mayoritariamente, a las formaciones Icaiché (época Paleoceno, período Paleógeno [Terciario]), Chichén Itzá (época Eoceno, período Paleógeno [Terciario]), Bacalar (época Mioceno Superior, período Neógeno [Terciario]), Estero Franco (época Mioceno Superior-Plioceno, período Neógeno [Terciario]) y Carrillo Puerto (época Plioceno, período Neógeno [Terciario]), en orden ascendente de posición estratigráfica. Por último, la correspondiente al período Cuaternario responde a la Formación de calizas con moluscos.

A continuación, en la tabla 1 se presentan las diferentes facies litológicas<sup>41</sup> presentes en la Península de Yucatán, contextualizadas con el área de estudio de la presente investigación.

Tabla 1. El subsuelo de la Península de Yucatán, está constituido de rocas calizas con un rango de edad de la época del Paleoceno hasta el Plistoceno conforme la serie estratigráfica presentada en esta tabla. Acrónimos: PE: período geológico; EP: época geológica (Butterlin, J. *et al.*, 1960; López Ramos, E., 1979; Aguayo, J.E. *et al.*, 1980; Flores, J.S. *et al.*, 1994; de Pablo-Galàn, L., 1996; Castro, J., 2002)

---

<sup>40</sup> Estos distintos ambientes diagenéticos que participan en la formación de las rocas calizas de la Península de Yucatán son típicos de las rocas sedimentarias calcáreas de mares tropicales poco profundos con abundancia de estructuras coralinas.

<sup>41</sup> Bajo el nombre de facies litológica se quieren reunir un conjunto de materiales que presentan una serie de características comunes de aspecto externo y/o de ambiente sedimentario. O sea que *facies* equivale a aspecto y *litológica* equivale a naturaleza de las rocas de una unidad geológica.

PE	EP	FACIES LITOLÓGICAS	LITOTIPOS	LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	
Cuaternario	Holoceno		caliche superficial que cubre la mayor parte de la península	dispuestas a modo de banda periférica en las costas norte y oeste de la Península de Yucatán	
	Plistoceno	Fm. Caliza con moluscos	rocas calizas <sup>42</sup> , calcarenitas <sup>43</sup> oolíticas <sup>44</sup> y bioclásticas <sup>45</sup> , blancas con cavidades de solución intercaladas con margas		
Terciario	Neógeno	Mioceno-Plioceno	Fm. Carrillo Puerto <b>TmPlCz-Cq</b>	rocas calizas muy variadas: superficie: rocas calizas, blancas, masivas, a veces recristalizadas; intermedio: margas <sup>46</sup> , con intercalaciones de arcilla, marrones claras; inferior: rocas calizas, blancas, blandas. Microfauna: algas, foraminíferos ( <i>Archaias</i> sp., <i>Amphistegina</i> sp., <i>Robulus vaughani</i> ) y ostrácodos	toda la parte oriental y central de Quintana Roo, centro de Yucatán y nordeste de Campeche
		Mioceno sup. - Plioceno	Fm. Estero Franco <b>TmCz-Do</b>	rocas calizas y dolomías <sup>47</sup> , amarillentas, cristalinas. Nódulos de calcita de textura sacaroidea <sup>48</sup> que, en niveles superiores, se presentan en forma masiva, de blanco a rosa.	en el estado de Quintana Roo (margen del río Hondo)

<sup>42</sup> Roca sedimentaria formada mayoritariamente por calcita (mineral de la clase de los carbonatos, carbonato de calcio –CaCO<sub>3</sub>-); los componentes carbonatados se pueden formar por precipitación química, de origen orgánico o detrítico.

<sup>43</sup> Roca sedimentaria detrítica, en la que la mayoría de los componentes son de naturaleza calcárea y de tamaño comprendido entre 2 y 0,06 mm.

<sup>44</sup> Los oolitos son esferas concéntricas de carbonato cálcico que crecen en medios marinos agitados próximos a la costa, provocando el flujo y reflujo del sedimento que crece en esferas a modo de bola de nieve.

<sup>45</sup> Roca sedimentaria formada por la acumulación de caparazones de seres vivos. Pueden ser fragmentos grandes como fósiles o muy pequeños, distinguibles con la lupa.

<sup>46</sup> Roca sedimentaria mixta, detrítica y carbonatada, de grano fino, constituida por arcilla (del 35 al 65%) y carbonato de calcio.

<sup>47</sup> Roca sedimentaria carbonatada que tiene una proporción de más de la mitad de dolomita (mineral de la clase de los carbonatos, carbonato de calcio y de magnesio –(Mg,Ca)CO<sub>3</sub>-) en su composición.

<sup>48</sup> Textura de roca carbonatada que tiene un apreciable contenido de poros intercrystalinos y está compuesta fundamentalmente por cristales de medidas relativamente equidimensionales.



Paleógeno	Mioceno superior	Fm. Bacalar <b>TmCz</b>	rocas calizas cretosas <sup>49</sup> , blancas, que contienen arcillas que pasan a margas ( <i>sascab</i> ); inferior: capas delgadas de yeso. Microfauna: foraminíferos ( <i>Peneroplidae</i> , <i>Amphistegina</i> sp.) y moluscos	en el estado de Quintana Roo
		Oligoceno superior	conjunto de rocas sin nombre <b>ToCz-Cq</b>	rocas calizas coquinas, de blancas a crema; calcarenitas. Microfauna: algas, foraminíferos ( <i>Gaudryina jacksonensis</i> , <i>Spiroplectamina</i> ; <i>Lepidocyclus</i> sp., <i>Camerina</i> sp., Miliolidae)
	Oligoceno inferior			margas, de blancas a grises, con intercalaciones de arcillas; rocas calizas, de crema a grises, compactas; calcarenitas, de blancas a rosas. Microfauna: foraminíferos ( <i>Eulepidina</i> sp., <i>Nummulitides</i> sp., <i>Bilocudinna</i> )
	Eoceno superior	Fm. Chichén Itzá (calizas fosilíferas) <b>TeCz-Mg</b>	<i>Miembro Chumbec</i> : rocas calizas, blancas, masivas con aspecto de mármoles sacaroideos. Microfauna: foraminíferos ( <i>Operculinoides willcoxi</i> , <i>Lepidocyclus pustulosa</i> , Miliolidae)	en el centro y el norte del estado de Yucatán
		medio	<i>Miembro Pisté</i> : rocas calizas, de blancas a amarillas, masivas. Microfauna: algas calcáreas ( <i>Clypeina</i> ) y foraminíferos ( <i>Valvulinidae</i> , <i>Coskolina</i> , Miliolidae)	se localiza en el centro y en el occidente de la Península de Yucatán
		inferior	<i>Miembro Ixbacal</i> : rocas calizas impuras <sup>50</sup> , de blancas-amarillentas a grises; margas amarillas. Microfauna: foraminíferos ( <i>Operculinoides catenula</i> , <i>Discocyclus cristensis</i> , Rotalidae género <i>Dictyokathina</i> , Miliolidae)	aflorea en el norte y en el oeste de Escárcega, en el estado de Campeche

<sup>49</sup> La creta es una roca sedimentaria blanca y porosa, una forma de piedra calcárea compuesta por el mineral calcita. Se forma bajo condiciones marinas profundas por la acumulación gradual de pequeñas placas de calcita (cocolitos) depositados por microorganismos llamados cocolitoforales. Es común encontrar nódulos de chert o sílex embebidos en la creta. *Chalk* (ing.).

<sup>50</sup> El término "impura" se aplica a cualquier roca constituida esencialmente, de sus componentes primarios y que, además incorpora pequeñas cantidades de otros componentes. En este caso, una "caliza impura" es una roca sedimentaria compuesta por calcita mayoritariamente y, también, por pequeñas proporciones de cuarzo y arcilla, normalmente.

		Paleoceno	Fm. Icaiché <b>TpaCz-Y</b>	rocas calizas, de blancas o amarillas, compactas y cristalinas, generalmente dolomitizadas, a veces silicificadas, recristalizadas, con intercalaciones de margas, arcillitas <sup>51</sup> y bentonita verde. Microfauna: algas ( <i>Amphiroa</i> ), foraminíferos ( <i>Bulimina callahani</i> , <i>Allomorphina velascoensis</i> ), moluscos y serpúlidos	en el sur de la Península del Yucatán, desde Chumul hasta la provincia de El Petén
			Fm. Xpujil <b>TpaCz-Y</b>	rocas calizas, estratificadas, microcristalinas, con cambios de facies hacia limos y lutitas, así con depósitos de anhidrita y yesos con horizontes arcillosos escasos y intercalaciones de roca caliza hacia la parte superior de la formación.	estado de Campeche

#### 1.1.1.5.2. La selección de la cal y del árido

##### *La cal*

Según Villaseñor y Barba (2012), parece ser que la tecnología de la cal se origina y se usa de manera abundante en las Tierras Bajas Mayas y que se expandió rápidamente por toda la zona maya debido, en parte, a la peculiaridad geológica de la Península de Yucatán.

La Península de Yucatán está formada por una gran plataforma calcárea con una alta variedad litológica, que se debe a los diferentes ambientes diagenéticos que intervienen en su formación, tal como se explica en el apartado anterior (Espinosa, L. *et al.*, 1996). La abundancia de estos recursos calcáreos en la península hizo que los mayas de las Tierras Bajas usasen, de manera generalizada, la cal en la arquitectura y consiguiesen controlar las técnicas de manufactura de los estucos (Villaseñor, I., *et al.*, 2012:22).

Esta alta variedad litológica queda patente en las descripciones morfológicas que realiza Schreiner (2001), en los estudios basados en la arqueología experimental y etnográficos donde describe, por una parte, un tipo de roca caliza suave y porosa que generalmente se encuentra cerca de la superficie por toda la región de las Tierras Bajas Mayas, la cual se llama *sascab tunich*,

<sup>51</sup> Roca detrítica de grano muy fino compuesta mayoritariamente por minerales del grupo de la arcilla, compactados. Sinónimo: arcilla.

*sascaboso* o *hel bach*. Por otra parte, habla de otro tipo de roca caliza un poco más dura que también se encuentra en la superficie y que es la que preferían para quemar en las caleras para la manufactura de la cal. Este tipo de roca se llama *saco ebach* o *ebach*, *saco tunich* y piedra blanca, dependiendo del lugar. Específicamente, en el centro de Yucatán, la mejor roca para la quema tiene por nombre *sak eel b'aach* (“huevo blanco del pájaro *chachalaca*”<sup>52</sup>) (Shreiner, T., 2003:481). También, especifica que los tipos de rocas más duras, no porosas y cristalinas, llamadas *toque tunich*, *taman tunich*, piedra de cerro y piedra de fuego, no eran consideradas aptas para la quema, ya que requerían temperaturas más altas para ser calcinadas (Schreiner, T.P., 2001; Levy, S. *et al.*, 1995). En estudios posteriores, el mismo autor nos habla que el maya yucateca llama la cal *ta'an* o *sak ta'an* o *k'uta'an* (“cal de nido de pájaro”) (Barrera, A., 1980:770) y que para los mayas la manufactura tradicional de la cal también tenía connotaciones simbólicas, se la nombraba *sak ch'upal* (“joven mujer blanca/pura y bella”) o *chica bonita*, una joven soltera, pura y bella, nacida del fuego (Shreiner, T.P., 2003:481).

Estratigráficamente, en la Península de Yucatán, de un modo general, se han identificado tres capas de sustrato calcáreo superficiales, cubiertas por los suelos típicos someros de la región (< 30 cm) (Figura 15). La primera corresponde a una roca dura o muy dura bien consolidada que presenta variaciones de color, puede ser blanca, crema, gris o roja; no porosa y se encuentra localizada inmediatamente bajo del suelo (0,3-2,5 m), llamada localmente *laja*<sup>53</sup> o *chaltún*. La segunda es una capa de sustrato normalmente blanco, de consistencia suelta y pulverulenta, muy suave y muy poroso, a veces ligeramente consolidado y masivo, pero siempre menos consolidado que la capa superior (2,5-5 m), llamada localmente *sascab* o *sahcab* (“tierra blanca”). Y la tercera es una capa de roca compacta con diferentes grados de dureza y de porosidad con componentes fósiles (5-9 m), llamada localmente *coquina*<sup>54</sup>. Los tres tipos de capas comparten las mismas propiedades mineralógicas (Estrada-Medina, H., *et al.*, 2008).

---

<sup>52</sup> Llamado también *guacharaca* del norte, *chachalaca* del golfo o *chachalaca* de vientre blanco (*Ortalis vetula*). Es una especie de ave galliforme de la familia *Cracidae*. Su área de distribución se extiende desde Tejas y la vertiente del Golfo de México hasta las selvas de Costa Rica. Subespecie: *Ortalis vetula pallidiventris* – sureste de México (norte de la Península de Yucatán).

<sup>53</sup> Hay diferentes niveles de calcisol (*caliche* o *calcreta*) dentro del registro geológico, del período del Cuaternario de la Península de Yucatán, relacionados con los ciclos climáticos ya mencionados, pero el que se entiende como *laja*, *chaltún* o *coraza calcárea* es la última fase de formación, durante el período del Cuaternario moderno (época del Holoceno), que recubre de forma general todas las rocas del subsuelo que se encuentran en la superficie, independientemente de la edad geológica de las rocas del subsuelo (Lopez Ramos, E., 1975).

<sup>54</sup> Roca sedimentaria detrítica, de composición carbonatada, formada mayoritariamente por



Figura 15. Fotografías de izquierda a derecha: fotografía izquierda: vista general de una pared de una cantera en la ciudad de Mérida, estado de Yucatán. La parte superior muestra el nivel original del terreno, la distancia con respecto a la parte inferior es aproximadamente 8 m. Autor fotografía de la cantera en la ciudad de Mérida: Estrada-Medina, H., *et al.*, 2008. Fotografía derecha: vista de una cantera al sur de la ciudad de Pisté, estado de Yucatán. Fuente: <<http://www.backyardnature.net>>.

Duch (1988) en su trabajo de la Conformación territorial del estado de Yucatán realiza un estudio en profundidad de las tres capas de sustrato calcáreo superficiales, a partir de observaciones de campo y la compilación de estudios de otros autores hasta la década de los años 80 (Bonete, F. *et al.*, 1959; Butterlin, J. *et al.*, 1963; Floras, A., 1974; Quiñones, G.H., 1975). De su estudio se pueden extraer las siguientes descripciones morfológicas (Duch, J., 1988):

*Coraza calcárea exterior (laja o chaltún)*

Roca sedimentaria carbonatada de colores claros formada a partir de residuos marinos no consolidados que mediante la acción de varios procesos como la disolución, la cristalización, la compactación, la desecación y la recristalización han dado como resultado un material consolidado de consistencia masiva, de grano fino, en ocasiones cristalizado que tiende a endurecerse con el paso del tiempo.

A veces, se observan relictos microfósiles incrustados en la matriz. A nivel mineralógico, se detecta calcita ocupando lo que fueron poros del material original. Además, hay que destacar las apreciaciones que hace Duch (1988) cuando nos habla de las diferentes tonalidades observadas en el campo. Este

---

fragmentos de caparazones de moluscos bivalvos y gasterópodos litorales, unidos por cemento calcáreo. Su formación es debida a depósitos que deja el agua en sucesivas inundaciones y desecaciones; por eso las lumaquelas son generalmente rocas de arrecifes en las zonas de flujo y reflujo de la mar. Terminología en diferentes lenguas: coquina (cast.) = coquina (ing.).

autor relaciona la tonalidad de la variedad litológica en cuestión con la edad geológica y con su grado de consolidación, tal como se muestra en la tabla siguiente (Tabla 2):

Tabla 2. Enumeración y correlación de la tonalidad vs. la edad geológica vs. el grado de consolidación de la *coraza calcárea exterior (laja o chaltún)*

TONALIDAD	EDAD GEOLÓGICA	GRADO DE CONSOLIDACIÓN
gris oscura	época del Eoceno inferior	mayor grado de consolidación y dureza superior y mayor grado de fragmentación
blanca-grisácea	miembro Pisté de la Fm. <i>Chichén Itzá</i> (época Eoceno medio)	
gris clara	Fm. Carrillo Puerto (época del Mioceno-Plioceno)	grado intermedio de consolidación y dureza
blanca-amarillenta	época del Plioceno	material blando poco coherente

Según Duch (1988), en época prehispánica, este material ha sido fundamental para la construcción de edificaciones en ciudades y centros ceremoniales, caminos (*sacbé*) y cisternas (*chultunes*).

#### *Caliza blanda subsuperficial (sascab o sahcab)*

Material sedimentario de naturaleza predominantemente calcárea que recibe el nombre genérico de *sascab* o *sahcab*, aunque estos muestren algunas diferencias morfológicas importantes.

Este material se describirá sobradamente en el subapartado siguiente donde se hablará de la selección del árido, ya que en el área maya, el *sascab* se ha usado como árido (agregado o carga) de los morteros, sustituyendo la arena habitual, para la manufactura de las capas de preparación de la pintura mural (Littman, E.R., 1958a; Magaloni, D., 1998; Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006 y 2010) y como relleno de los diferentes elementos constructivos de los muros y de las bóvedas para la arquitectura (Muñoz, G., 2006).

#### *Los arenales costeros o sedimentos con caparzones (coquina)*

Sedimentos arenosos de era Cuaternaria (período Cuaternario antiguo –época del Pleistoceno- y período Cuaternario moderno –época del Holoceno-), de color blanco o ligeramente amarillos, relativamente gruesos y formados por un

conjunto de estructuras coralinas y de caparazones, de naturaleza calcárea. La consolidación de estos materiales propicia su endurecimiento progresivo con tendencia a la desaparición de las formas originales de sus constituyentes físicos y la formación de una estructura masiva.

Hay que especificar, que este material, en la zona próxima a la costa, se observa en estratos subsuperficiales dispuestos alternadamente con estratos de *eolianitas*. Esta secuencia estratigráfica sugiere la posibilidad de repetidos ciclos de depósito marino, probablemente a causa de ascensos y descensos subsiguientes del terreno respecto al nivel del mar. Por último, en las inmediaciones de la línea de costa y ocupando la posición más superficial, se encuentran depósitos de arena no consolidados de tonalidad blanca y de composición a base de restos de todo tipo de residuos calcáreos provenientes de varios organismos (moluscos y corales) (Duch, J., 1988; Cabadas, H. *et al.*, 2010).

### *El árido (sascab)*

El estudio de su origen, de su composición química y mineralógica y de su uso en el área maya, ha sido una cuestión investigada desde los tiempos de la colonia. Fray Luis de Landa (S.XVI) en su crónica, describe la abundancia de la roca caliza y del *sascab* en la Península de Yucatán y realiza una traducción literal al castellano antiguo de la palabra *sascab*. Define el término como “tierra blanca”, ya que en lengua maya *sas-* quiere decir “blanco” y *-cab* quiere decir “tierra”. Además, comenta que esta tierra blanca se usaba como carga para la fabricación de materiales de cal; y se sigue utilizando hoy en día de igual modo (de Landa, D., 1985:53). En otro fragmento de la crónica explica: (...) *que están estos edificios muy cerca unos de otros y que son templos, y que la razón de haber tantos es por mudarse las poblaciones muchas veces; y que en cada pueblo labraban un templo por el gran aparejo que hay de piedra y cal y cierta tierra blanca excelente para edificios (...)* (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006 y 2010), haciendo referencia a una “cierta tierra blanca” que fue utilizada por los antiguos mayas en la construcción de centros ceremoniales, en concreto. Pero que por otros estudios posteriores se sabe que el *sascab* (tierra blanca) se ha usado en la construcción de la arquitectura, en general y en los elementos decorativos, en los recubrimientos de pisos y muros, y en la manufactura de los estucos (Littman, E.R., 1958a; Magaloni, D., 1998; Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006 y 2010; Muñoz, G., 2006).

A mediados del s. XX, Bonet, F. *et al.* (1959) define el *sascab* como material desmenuzable y blancuzco que resulta de la descomposición de las rocas calizas que se encuentran en la capa inferior; como una arena calcárea, a veces dolomítica que se usa en la construcción como material inerte. Casi veinte años después, Quiñones (1975) puntualiza la definición diciendo que es un sedimento marino no consolidado de color claro constituido mayoritariamente por restos de fósiles de caparazones de moluscos bastante bien conservados, de naturaleza calcárea, textura criptocristalina o amorfa, de morfología subredondeada y consistencia pulverulenta o masiva. En aquella época, se aplicaba el nombre a cualquier material calcáreo suelto creando confusiones terminológicas. Así también se designa este nombre a las rocas calizas cretosas blancas, las cuales contienen arcillas que se transforman en margas, de la Fm. Bacalar y, en las arenas dolomíticas (Duch, J., 1988; de Pablo-Galán, L., 1996).

Estratigráficamente, este material aparece por debajo de una costra de roca caliza compacta *-laja-* (horizonte endurecido) y descansa normalmente sobre una roca caliza fosilífera porosa *-coquina-* (cama de roca caliza), ya definidas en el subapartado anterior. En general, se ha observado que se encuentra en estratos aproximadamente paralelos a la superficie del terreno y que en conjunto, su espesura varía poco menos de 1 m hasta 5 m. En algunos lugares, aparece interestratificado entre capas delgadas de roca caliza como se observa en *Chichén Itzá* y, en otras localidades, aflora en la superficie, como pasa en general en el sureste de la Península de Yucatán y en Belice (Duch, J., 1988; Espinosa, L. *et al.*, 1996; Pacheco, J. *et al.*, 2003; Estrada-Medina, H. *et al.*, 2008).

En este sentido Duch (1988), en su estudio de campo de diversos lugares del estado de Yucatán, se beneficia de los cortes geológicos dejados por las *sascaberas*<sup>55</sup> (a cielo abierto y subterráneos), para reconocer tres tipos diferentes de *sascab*, atendiendo únicamente a sus características morfológicas (Tabla 3):

---

<sup>55</sup> Término utilizado para designar los lugares de explotación, tanto a cielo abierto como subterráneo del material llamado *sascab*.

Tabla 3. Descripciones morfológicas de los tres tipos de *sascab* identificados en el estado de Yucatán (Duch, J., 1988). Acrónimos: T: tipo de *sascab*; G.C.: grado de consolidación

T	COLOR	MACROFÓSILES	MATRIZ	G.C.
1	blanco a blanco-amarillo	conjunto de caparazones finos o muy finos	criptocristalina (más bien amorfa)	muy poco o nada consolidado
2	blanco a blanco-amarillo	menor cantidad de restos de macrofósiles y relictos de impresiones fósiles	criptocristalina de grano más fino	menos blando que el anterior
3	blanco amarillento	-----	macrocristalina	consolidado (mayor dureza)

De un lado, otro autor que identifica las diferentes características morfológicas del *sascab*, observadas en diferentes sitios arqueológicos del litoral de la Península de Yucatán, es Littman (1958a): las muestras de *sascab* de *Uxmal* (nordeste del estado de Yucatán) y *Sayil* (suroeste del estado de Yucatán) presentan tonalidades rojizas; las muestras de *sascab* de *Chichén Itzá* (nordeste del estado de Yucatán) presentan tonalidades amarillentas; y, las muestras de *sascab* de la Isla *Jaina* (pequeña isla en la costa norte, del estado de Campeche) presentan tonalidades blancas (Figura 16) (Villaseñor, I., 2010).

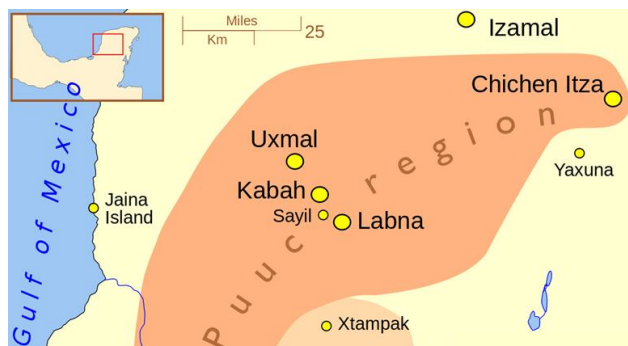


Figura 16. Localización geográfica de las muestras de *sascab* estudiadas por Littman (1958a). Fuente: <<http://www.latinamericanstudies.org>>

Por otro lado, Pacheco, J.I. *et al.* (2003) realiza un estudio esmerado, basado en la ingeniería de materiales, de un conjunto de muestras de *sascab* de los alrededores de la ciudad de Mérida (nordeste del estado de Yucatán y actualmente capital del estado). Del estudio se extrae que químicamente, las muestras de *sascab* analizadas están compuestas básicamente por un 80% de



carbonato de calcio, un 11% de carbonato de magnesio, un 2% de arcillas y un 7% de compuestos como: sulfatos, sílice, nitratos, cloruros y óxidos de hierro.

Mineralógicamente hablando, Isphording *et al.* (1973) determina que los estratos calcáreos de *sascab* tienen un alto contenido de dolomita, talco y clorita en comparación con los estratos de roca caliza que los rodean. En parte, de nódulos de chert, mineral de reemplazo durante la diagénesis<sup>56</sup> (Villaseñor, I., 2010:25).

Por último, cabe destacar uno de los estudios más recientes al respecto realizado por Cabadas, H. *et al.* (2010). En él se lleva a término un trabajo de campo de diferentes *sascaber*s, al nordeste de la Península de Yucatán (costa del Caribe, en el estado de Quintana Roo), en el que se realizan varias columnas estratigráficas del período Cuaternario. Los resultados obtenidos determinan una secuencia estratigráfica que se repite mayoritariamente en todas las *sascaber*s estudiadas y que nos permite describir geológicamente los diferentes estratos explotados de *sascab*, tal como se sintetiza a continuación: (1). la base de la secuencia se caracteriza por una capa de *caliche* blancuzco, de 20 cm de espesura; (2). por encima, una capa de sedimentos carbonatados, con la presencia de *Turritella communis*<sup>57</sup> y *burrows*, asociados a facies lagunares, de 1,5 m de espesura; (3). en la mitad de la secuencia, se observan sedimentos mal clasificados que incluyen fragmentos de roca carbonatada y de arrecifes redondeados, depositados durante las tormentas, de 1 m de espesura; (4). seguidamente, se determina una capa de sedimentos de arena, bien ordenados y laminados, oolíticos y bioclásticos con pocos *burrows*. Según Ward (1985), estos materiales están asociados a facies *eolianitas* y se clasifican como *grainstones*<sup>58</sup> débilmente consolidados, conocidos en general como calcarenitas; (5). el techo de la secuencia vuelve a ser una capa de *caliche* blancuzco, alternado con zonas de material más oscuro y más claro, de 40 cm de espesura, que se corresponden al sustrato rocoso llamado *laja*, *chaltún* o coraza calcárea, ya mencionado en apartados anteriores (Figura 17a y 17b).

---

<sup>56</sup> Procesos de alteración que pasan después de la deposición de los carbonatos, incluye todos los procesos físicos y químicos que afectan al sedimento. Los procesos diagenéticos no operan con uniformidad y regularidad, por lo que el tiempo y la edad geológica de las rocas o sedimentos no son factores cruciales en los productos de la diagénesis. Por lo tanto, si se tiene el mismo grado de litificación, no implica la misma historia deposicional para los dos. La diagénesis se produce desde condiciones superficiales hasta profundidades de soterramiento.

<sup>57</sup> Molusco (gasterópodo marino) de la familia de las Turritellidae.

<sup>58</sup> Materiales carbonatados con una textura deposicional que se reconozca, grano soportada y con matriz micrítica. El espacio intergranular puede estar ocupado por cemento (según la clasificación para las rocas carbonatadas de Dunham, 1962).

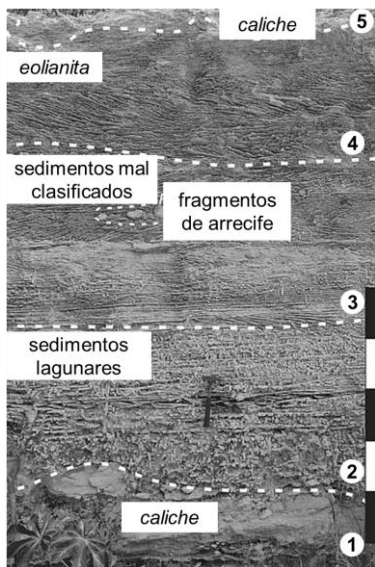


Figura 17a. Secuencia estratigráfica de la *sascabera* cercana a Puerto Morelos (costa del Caribe, en el estado de Quintana Roo). Autor fotografía: Cabadas, H. *et al.*, 2010, modificada por el autor de la tesis

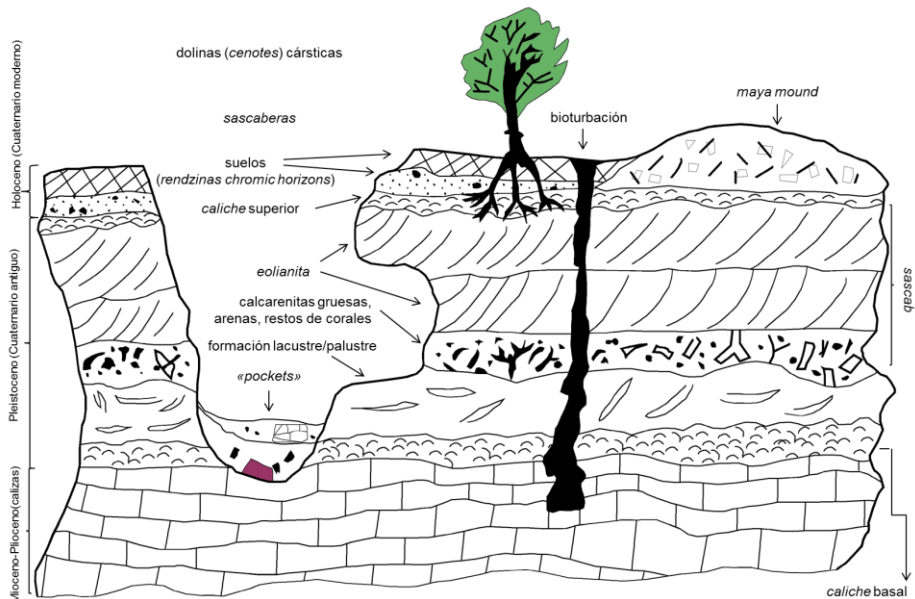


Figura 17b. Corte geológico idealizado de la planicie precostera del nordeste de la Península de Yucatán, según Cabadas, H. *et al.* (2010) y Hutson, S.R. *et al.* (2009). Autor dibujo: Prada, J.L., Guasch-Ferré, N. Infografía: Vázquez, E.

Después de todas las consideraciones expuestas queda de manifiesto que el *sascab* muestra considerables variaciones morfológicas, composicionales y de apariencia. Aun así, el término es utilizado como genérico para referirse localmente a estos depósitos carbonatados (Villaseñor, I., 2010:25).

### 1.1.1.5.3. La calcinación de la cal

Cristina Álvarez (1984:243) establece que la roca caliza era calcinada en hornos que se fabricaban con esta finalidad y que se llamaban *chuch cab* o *chuch taan*, que significa “hacer cal así” o “quemar calera”, haciendo referencia a que estos desaparecían en el proceso de calcinación, hecho que explica que no hayan evidencias de ellos en el registro arqueológico (Mazzullo, S.J. *et al.*, 1994).

Los hornos estaban conformados por troncos de árboles situados en forma de anillos concéntricos superpuestos reduciendo progresivamente su diámetro hasta terminar con un montículo piramidal de 1,5 m aproximadamente. En el espacio existente entre los troncos se colocaba la roca caliza<sup>59</sup> (CaCO<sub>3</sub>), que se transformaba en óxido de calcio (CaO) al alcanzar los 800/850°C durante la combustión (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010). Este método de calcinación deja más de un 30% de roca caliza sin calcinar (Levy, L. *et al.*, 1995).

Las maderas que más se usaron durante este proceso procedían de especies arbóreas ricas en sabias aditivas y alto contenido de agua<sup>60</sup> que avivaron y favorecieron el proceso de combustión. Otras sustancias que también se usaron con este propósito fueron la miel y la cera de abeja, las cuales continúan utilizándose con la misma finalidad en las comunidades mayas actuales. Schreiner (2003:483) dice que en algunas comunidades, se ha documentado la tradición de incluir en estos hornos un trozo roto de algún recipiente de barro para proteger el proceso de calcinación de la cal de la influencia negativa que puede ejercer toda mujer sobre él. Es evidente que la adición de estas sustancias y utensilios en el proceso no solo cumplía con un

---

<sup>59</sup> La quema de la roca caliza, que es fundamentalmente carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) se produce cuando se calienta aproximadamente a 900°C. En este momento, el carbonato de calcio empieza a disociarse para producir el óxido de calcio (cal viva) y dióxido de carbono. La forma de la roca caliza se mantiene, pero su peso se reduce en un 45% (CaCO<sub>3</sub> + calor → CaO + CO<sub>2</sub>) (Magaloni, D., 1996; Schreiner, T.P., 2001).

<sup>60</sup> Las más utilizadas eran aquellas llamadas “maderas de agua”, que tienen entre un 50% y un 60% de agua. Estas se queman de manera limpia y mantienen el aislamiento necesario para mantener la zona de quema en el centro de la calera (Schreiner, T.P., 2001).

objetivo técnico, sino también simbólico, ya que se consideraban portadores de una fuerza y vitalidad que beneficiaría la transformación de la roca caliza a cal viva.

El Instituto de Carnegie de Washington, fue el primero que documentó a partir de estudios etnográficos la producción de la cal en las comunidades mayas. Documentaron la producción de cal realizada por los maestros mayas mientras duraban los trabajos de restauración del Templo de los Guerreros en el sitio arqueológico de *Chichén Itzá* (Morris, E.H. *et al.*, 1931, extraído de Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006). Para esta producción se construyó una pira de troncos de madera húmeda formando un cilindro de 5,5 m de diámetro y 2 m de altura, encima de la que se colocaron fragmentos de piedras calizas para ser calcinadas en cielo abierto (Figura 18) (Villaseñor, I. *et al.*, 2009). A partir de los datos que nos aportan estas experiencias etnográficas, basadas en la arqueología experimental y en la evidencia arqueológica<sup>61</sup> se intenta entender cómo se llevaba a cabo este proceso tecnológico de manufactura prehispánico de producción de cal en la zona maya.

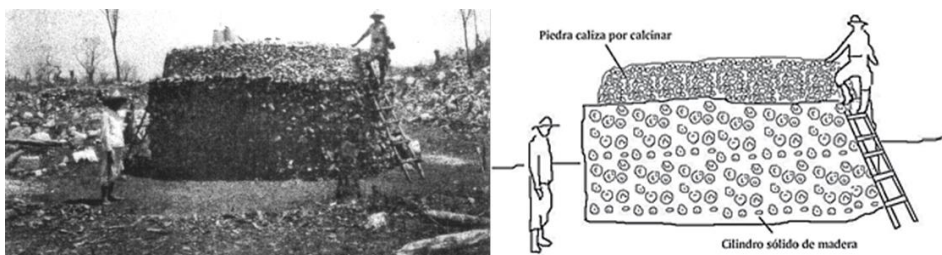
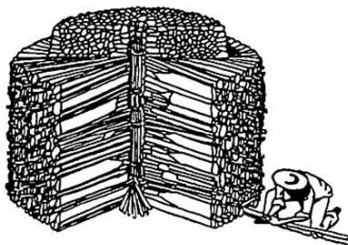


Figura 18. Quema de cal en la zona maya mediante piras al aire libre (caleras). Dibujo hecho por Villaseñor, I. *et al.*, 2009 basado en fotografías de Morris, E.H., *et al.*, 1931 realizadas en la construcción de una calera a comienzos del siglo XX en *Chichén Itzá* (estado de Yucatán) (fotografía extraída de Barba, L., 2013, que originalmente proviene de Schreiner, T.P., 2002)

<sup>61</sup> Morris, E.H. *et al.*, ya en el año 1931 evidencia arqueológicamente algunas quemaduras superficiales (piedras quemadas y restos de cal) que se descubren al cortar los árboles por la transformación del suelo de cultivo, en las Tierras Bajas Mayas del Norte (Morris, E.H. *et al.*, 1931). El hecho de que la producción de cal sea a cielo abierto, sin ninguna estructura permanente de quema, dificulta el registro arqueológico. En las pocas evidencias arqueológicas existentes se han detectado restos de cal recarbonatada, suelos oscuros, roca caliza quemada y restos de escoria (Villaseñor, I. *et al.*, 2012). Además, es probable que la escasa evidencia arqueológica también sea debida a la carencia de excavaciones arqueológicas en la periferia de los sitios arqueológicos donde los recursos forestales son más abundantes y es más propicio para llevar a cabo la quema de cal (Villaseñor, I. *et al.*, 2009).

Ya a principios del s. XXI, Schreiner (2001) llevó a cabo más estudios etnográficos y experimentales de quema de cal con técnicas tradicionales mayas. Los resultados obtenidos documentan la misma técnica de quema que los autores antes mencionados y, el autor, añade que existe una diversidad que responde a una distribución regional de la técnica de piras de madera húmeda y una evolución y refinamiento posterior, por lo menos en el Preclásico Tardío. En este estudio, identifica seis tipos regionales de caleras que clasifica según el método utilizado para apilar la madera. Concretamente, describe un tipo de calera que es propia del área de estudio que nos ocupa en esta investigación. La describe como redonda, hecha de trozos de madera cortos y de poco diámetro e irregular, organizada radialmente (Morris, E.H., 1931, extraído de Villaseñor, I. *et al.*, 2008; Hernández, E. *et al.*, 1995) (Figura 19a) y, añade que se puede quemar a nivel de la superficie o en agujeros excavados en la tierra o en el lecho rocoso (Figura 19b) (Schreiner, T.P., 2001). Este tipo de diseño propio del norte de la Península de Yucatán es más adecuado por el clima árido de las Tierras Bajas Mayas del Norte.

a



b

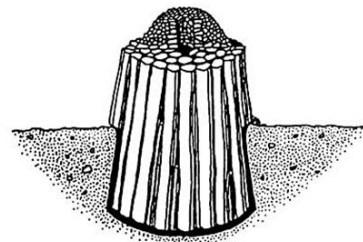


Figura 19. Calera redonda hecha de madera pequeña e irregular organizada radialmente propia del norte de la Península de Yucatán (Figura 17a) en la que se puede quemar a nivel de la superficie o en agujeros excavados en la tierra o en el lecho rocoso (Figura 17b). Autor dibujo: Schreiner, T.P., 2001.

Por último, es importante destacar que el estudio también valora y examina los restos dejados por las caleras. Schreiner (2001) observa que los restos son piedra mal calcinada y trozos de sílex quemado, tierra oscurecida y carbón y, más escasamente, tierra fundida y greda<sup>62</sup> enrojecida. Por lo tanto, hay que destacar que el uso de este material sin un tratamiento previo, produce una textura caótica, que Hansen, *et al.* (2002) detectan en sus estudios de

<sup>62</sup> Arcilla arenosa.

caracterización de estucos del área maya, que se manifiesta por una distribución aleatoria del tamaño de grano, sin que exista una separación clara entre las cargas o agregados y el conglomerante, en este caso la cal.

#### 1.1.1.5.4. La hidratación de la cal

Los indígenas que trabajaron con la Carnegie Institution of Washington en *Chichén Itzá* en el 1931 informaron que la hidratación de la cal debía realizarse durante un período de tiempo prolongado en depósitos de agua que contuviesen cortezas ricas en exudados vegetales<sup>63</sup> (Morris, H.E. *et al.*, 1931, extraído de Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006 y 2010). También describieron que, en este momento del proceso, el material a hidratar era la mezcla en seco de la cal viva (CaO) con el *sascab* (Magaloni, D., 1997, 2001). Esta forma de proceder constituía una herencia prehispánica que aseguraba la obtención de una pasta de cal<sup>64</sup>, mucho más plástica, resistente y apropiada para la preparación de los morteros y de los enlucidos, la cual aún todavía está vigente en muchas comunidades mayas actuales de la Península de Yucatán.

Más tarde, en el año 1966 la restauradora Frida Mateos, en una comunicación personal que realizó en una campaña de trabajo en *Chichén Itzá*, describe el siguiente procedimiento: *“la cal era preparada con agua en la que se habían sumergido cortezas de árbol. Con la masa de cal el artesano construyó un montículo redondo completamente cerrado y bruñó su superficie con una madera dura, para cerrar completamente los poros y permitir a la masa de cal y goma permanecer en el interior humedecida y sin contacto con el aire. Al transcurrir dos semanas, el artesano abrió, en la parte superior del montículo de cal ya seco, un orificio relativamente grande; con cuidado, la parte que cortó fue convertida en una tapa removible. Así el montículo funciona como una caldera que mantiene la pasta de cal en su interior humedecida y lista para ser usada”* (Magaloni, D., 1996).

Treinta años después, en el 1996, Diana Magaloni y un grupo de personas del Instituto de Artes Plásticas de Chiapas realizaron un trabajo de arqueología experimental desde el que fue posible ratificar que el uso de las gomas

---

<sup>63</sup> La cal se dejaba remojar en agua que contenía exudados vegetales de la corteza del árbol de *chukum* o algún otro árbol que liberase goma. Se dejaba así durante dos semanas antes de ser utilizada y se remojava constantemente con la agua gomosa (Magaloni, D., 2001).

<sup>64</sup> El óxido de calcio –CaO– (cal viva) se hidrata (se apaga) con agua para formar hidróxido de calcio –Ca(OH)<sub>2</sub>– (cal muerta o apagada). En este proceso de conversión de cal viva a cal muerta, el material se calienta y se expande. El producto final se denomina pasta de cal (CaO + H<sub>2</sub>O → Ca(OH)<sub>2</sub>) (Schreiner, T.P., 2001).

añadidas a la cal y al *sascab* producen a las dos semanas *una pasta densa, plástica y con buenas propiedades de fraguado* (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2002; Magaloni, D., 2001).

Así pues, a partir de las referencias escritas, se puede dilucidar que los artistas mayas entendían el proceso de hidratación de la cal como el paso último de preparación de la mezcla de los componentes (cal viva + *sascab* + agua gomosa de corteza de árbol), que les serviría para la manufactura de las capas de preparación de sus estucos. Este modo de proceder dista mucho de cómo lo desarrolló la civilización romana<sup>65</sup>, que dominó la fabricación de la cal y las técnicas de la puesta en práctica de los morteros en occidente. Tal y como Gárate, en su libro, cita al clásico *Cementos y Cales*, de Mazzocchi donde se aconseja: *el apagado y formación de la pasta de cal se debe hacer por lo menos con tres meses de anticipación si se quiere impedir que se desarrollen después sopladuras prodedentes de las partículas imperfectamente apagadas (caliche), lo que requiere para su extinción un largo tiempo. Esta es la causa de que los romanos prescribieran que la pasta se tuviera almacenada durante tres años* (Gárate, I., 1994). Por lo tanto, los técnicos romanos hidrataban la cal con agua y después la dejaban almacenada durante tres años y después mezclaban el agregado, que según Vitrubio la proporción correspondía a, *una unidad de cal por tres de arena o dos por cinco, según la calidad de la arena* (Gárate, I., 1994). En cambio los técnicos mayas, mezclaban, según los indígenas<sup>66</sup>, una parte de cal viva por tres de arena cálcica (*sascab*) en seco, que podía ser tamizada y mezclada hasta obtener un conjunto homogéneo. Posteriormente, la mezcla (cal viva y *sascab*) se sumergía en agua gomosa de *holol* y se dejaba así durante dos semanas antes de ser usada (Magaloni, D., 1997 y 2001).

Este nivel de tecnificación se puede ver hoy en día a través de los pueblos mayas y de sus técnicas de hidratación de la cal, que se realizan mediante un proceso llamado pudrición<sup>67</sup>, concentrado en las Tierras Bajas Mayas del Sur,

---

<sup>65</sup> Entre el siglo VI a.C y el siglo V d.C, ambas culturas estuvieron en activo en sus respectivas áreas, prolongándose mucho más en el tiempo la cultura maya, y siendo más el tiempo que no comparten, que el que comparten.

<sup>66</sup> Los indígenas que trabajaron con la Carnegie Institution of Washington en *Chichén Itzá* en el 1931 (Morris, H.E. *et al.*, 1931).

<sup>67</sup> Este tipo particular de pudrición de la cal se puede encuadrar en lo que aquí se conoce como proceso de aspersión, en el cual la cal viva, dispuesta en capas no muy gruesas, se riega con agua. La reacción que se produce provoca el apagado de la cal viva y se reduce a polvo por sí misma. Se deja reposar protegida de la humedad (V.V.A.A. *Guía práctica de la Cal y el Estuco*. Editorial de los Oficios de León, 1998).

un tipo particular de hidratación que se lleva a término por exposición a la atmósfera, con un alto grado de humedad, de la cal mezclada ya con el árido correspondiente. Mientras, que en las Tierras Bajas Mayas del Norte, el proceso de hidratación de la cal generalizado es el de inmersión<sup>68</sup>, que se lleva a término a partir de balsas en las que se almacena la cal viva con las cortezas vegetales y el agua (Muñoz, G., 2006) (Figura 20). Aun así, Schreiner (2001), en sus estudios, documenta que algunos caleros del norte de las Tierras Bajas, que ocasionalmente queman una calera, aún mantienen la costumbre maya de quemar en época de lluvias y dejar la cal al aire libre (método de pudrición) para que se apague de modo natural durante dos o tres años antes de ser usada en arquitectura; en cambio, este método se ha perdido completamente en El Petén. Por lo tanto, con toda la información expuesta, la hipótesis más plausible de hidratación de la cal en época prehispánica, en la zona de estudio que ocupa esta investigación, es la de fusión<sup>69</sup>.

---

<sup>68</sup> La cal apagada por inmersión, según *La Guía práctica de la cal y el Estuco* (1998) es el sistema rudimentario tradicional por inmersiones reiteradas. Se introducen los trozos de cal dentro una cesta de mimbre y, posteriormente, este se introduce dentro de un cubo de agua varias veces seguidas, hasta que deja de *silbar* (Pocostales, L., *et al.* 2010). De modo que, por el tipo de procedimiento de hidratación de la cal que explica Muñoz, G. (2006) que realizaban los técnicos mayas, este actualmente se ajusta más al procedimiento de la cal apagada por fusión, que según la *Guía práctica de la Cal y el Estuco* (1998) es el sistema tradicional, que consiste en introducir la cal viva desmenuzada en una balsa donde se derrama un volumen de agua determinado según una medida estequiométrica para no “ahogar” la cal (Pocostales, L. *et al.*, 2010). Este sistema necesita un mínimo de 3 meses, preferentemente 6 meses, para alcanzar la calidad conveniente. Sin embargo, tal como expone Magaloni, D. (1997, 2001) los mayas tan sólo dejaban reposar la mezcla (cal viva y *sascab*) sumergida en agua gomosa de *holol* durante dos semanas antes de ser usada.

<sup>69</sup> Así pues, actualmente el sistema utilizado por los mayas no se ajusta a ninguno de los procedimientos definidos de hidratación de la cal. En esta investigación, se cree que el procedimiento de hidratación de la cal que realizaban los técnicos mayas, en el área de estudio que nos ocupa, se ajusta más a la cal apagada por fusión, ya que se prioriza el sistema de sumergir la mezcla en balsas respecto al tiempo que se mantiene la mezcla sumergida.



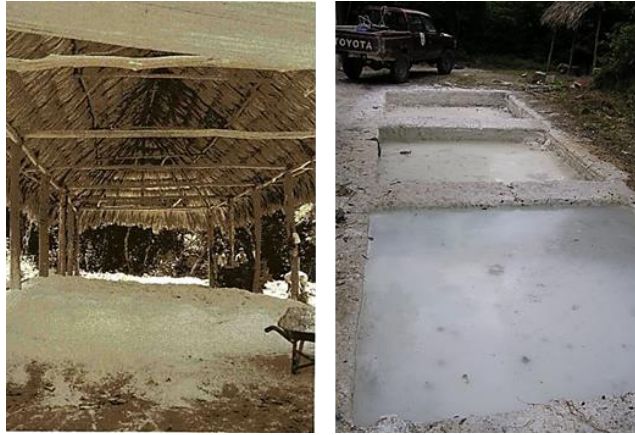


Figura 20. Fotografías que nos muestran las técnicas de hidratación de la cal, en la actualidad, en los pueblos mayas: proceso de hidratación de la cal por pudrición (fotografía de la izquierda) y por inmersión (fotografía de la derecha), respectivamente. Fotografías cedidas: M<sup>a</sup> Luisa Vázquez de Ágredos y publicadas en Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L. (2010). Autores de las fotografías: Muñoz, G. (fotografía de la izquierda); Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L. (fotografía de la derecha).

Estas recetas de origen prehispánico son reproducidas en los proyectos arqueológicos y en los de conservación y restauración que actualmente trabajan en el área con la intención de obtener mezclas de cal que reúnan las mismas propiedades que las antiguas, caracterizadas por su extraordinaria calidad y resistencia (Hansen, E. *et al.*, 2005; Pérez, 2009; Ruiz, M.C., 2009; Fuentes, A. *et al.*, 2010; Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010; Kita, Y., 2013). Concretamente, las temporadas de trabajo de campo que se llevaron a cabo en *Ek'Balam*, entre los años 2001 y 2002, se aprovecharon para preparar varias probetas en las que el óxido de cal se sumergió en agua con presencia de cortezas ricas en savias aditivas que, en cada caso, tuvieron un origen diferente. El propósito era comprobar las variaciones de coloración y de textura que experimentaba cada probeta para poder decidir cuál era la que más se parecía a la que se podría haber usado en época prehispánica, con el fin de preparar las decoraciones de estuco que lucieron sus arquitecturas monumentales, como las situadas en la gran Acrópolis Norte de esta ciudad del norte de Yucatán. De la experiencia se dedujo que los estucadores de *Ek'Balam* usaron una cal que había sido hidratada en agua con presencia de corteza de *pixoy* (*Guazuma ulmifolia*), es por eso que se trata de la misma savia que actualmente se usa en el sitio para preparar la cal con la que se realizan las reintegraciones de estas superficies de estuco cuando su estado de conservación requiere de intervención (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010).

Así pues, queda patente que los estudios que se fundamentan en la arqueología experimental, junto a las fuentes etnohistóricas y etnográficas complementan las excavaciones arqueológicas y nos ayudan a interpretar de manera integral los resultados analíticos aportados por la caracterización químico-mineralógica de las capas de preparación de los estucos mayas que han perdurado hasta nuestros días.

#### **1.1.1.6. Otros materiales asociados a la cal**

##### **1.1.1.6.1. Los suelos y los sedimentos arcillosos**

Tal como se apunta en el apartado 1.1.1.4 (“La composición mineral de los estucos en la zona maya”), una de las últimas aportaciones en los estudios de caracterización de los estucos de los sitios arqueológicos mayas de la Península de Yucatán es la determinación de minerales arcillosos asociados a la cal mediante técnicas instrumentales de análisis convencionales (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006; García-Solís *et al.*, 2006; Villaseñor, I. *et al.*, 2008, 2009; Villaseñor, I., 2010). A partir de los resultados obtenidos surge la necesidad de reanudar el estudio y profundizar en la caracterización de los materiales asociados a la cal de las capas de preparación de los estucos mayas y en la descripción de los minerales arcillosos asociados a los suelos de la Península de Yucatán, tema que se desarrollará en el presente subapartado.

Fray Luis de Landa (s. XVI), en un pasaje de su crónica, describe ya la existencia y la extraordinaria fertilidad de los suelos de la Península de Yucatán: (...) *es maravilloso que la fertilidad de esta tierra sea tan grande en la parte superior y entre las piedras (...)*” (Sedov, S. *et al.*, 2008). Esta existencia queda confirmada en los estudios geológicos que se han realizado en la Península de Yucatán, ya presentados en apartados anteriores de esta tesis, los cuales concluyen la presencia de una amplia gama de paleosuelos desarrollados durante el período Cuaternario moderno (época del Holoceno), de escaso espesor en algunas zonas y, en otros puntos, de varios metros de espesura, que se superponen a los depósitos del período Cuaternario antiguo (época del Plioceno) (Solleiro-Rebolledo, E. *et al.*, 2011; Bautista, F. *et al.*, 2011a). Estos paleosuelos se llaman genéricamente *terra rossa*<sup>70</sup>: suelos arcillosos de tonalidad rojiza que cubren las rocas calizas formando una capa discontinua de espesor variable, de pocos centímetros hasta varios metros

---

<sup>70</sup> Suelo arcilloso relicto de color rojo vivo, desarrollado sobre rocas calizas; se encuentra rellenando grietas y hoyos de la roca karstificada.

(Bautista, F. *et al.*, 2011a). Según Bautista (2011a), la hipótesis más plausible para explicar su formación, en la plataforma kárstica tropical de la Península de Yucatán, pasa por asumir una formación de carácter poligénico, es decir, entender la *terra rossa* como un suelo complejo conformado por diferentes estratos de carácter poligénico, ya que en algunos casos, la teoría del origen residual a través de la disolución de la roca caliza, se ajusta mejor a los datos obtenidos con la teoría de la contribución de materiales alóctonos<sup>71</sup> en los suelos; y, en otros casos, es al revés (Sedov, S. *et al.*, 2007; Cabadas, H. *et al.*, 2010). Por lo tanto, se concluye que aún se necesitan más estudios con el fin de llegar a una mejor comprensión de la formación del suelo en la Península de Yucatán.

Según la *Base de referencia mundial para recursos de suelos 2006* (IUSS Working Group WRB, 2006), la diversidad edáfica de la Península de Yucatán, a nivel genérico, se clasifica de la siguiente manera: dominan las asociaciones de suelos poco profundos, de escaso grado de desarrollo pedogenético como los Leptosoles/Cambisoles crómicos<sup>72</sup>. Los suelos de mayor extensión son los Leptosoles réndzicos<sup>73</sup> y líticos<sup>74</sup> (67%), en las zonas kársticas; Gleysoles (15,5%), en las zonas costeras; Luvisoles (4,44%), en las planicies kársticas; Vertisoles (3,02%), en el sur y en el nordeste; Solanchak y Arenosoles en las zonas costeras, Regosoles y Histosoles en el litoral y en las planicies costeras principalmente (Bautista, F. *et al.*, 2011b).

A continuación, se presenta el mapa geopedológico de la Península de Yucatán que muestra la diversidad edáfica de la región (Figura 21) y donde se describen los suelos de la Península de Yucatán (estado de Yucatán y de Campeche) por grupo según la WRB (2006, 2007) (Bautista, F. *et al.*, 2011a y 2011b).

---

<sup>71</sup> Que se encuentra en un lugar diferente de aquel donde se ha formado. Se aplica a la formación o a la unidad geológica transportada por un proceso tectónico.

<sup>72</sup> Que dentro de 150 cm de la superficie del suelo tiene una capa subsuperficial, de 30 cm o más de espesura, que tiene un cromax rojizo (WRB, 2007).

<sup>73</sup> Que tiene un horizonte mólico que contiene o está inmediatamente por encima de material calcáreo o roca caliza que contiene un 40% o más de carbonato de calcio equivalente (WRB, 2007).

<sup>74</sup> Que tiene roca continua que empieza dentro de 10 cm de la superficie del suelo (solo en Leptosoles) (WRB, 2007).

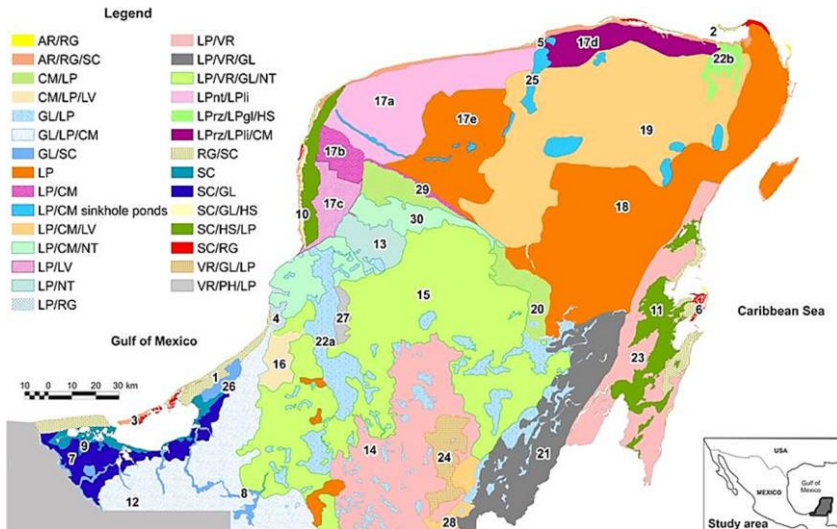


Figura 21. Mapa geopedológico de la Península de Yucatán donde se muestra la distribución de los paisajes edáficos de la región. Autor mapa: Bautista, F. *et al.*, 2011a

Hay que especificar, que no se han incorporado los calificadores<sup>75</sup> de los Grupos de suelos de referencia, que nos proporcionan información sobre las propiedades del suelo y las características relacionadas con el uso, ya que la intención de la tabla que sigue (Tabla 4) es enumerar, describir brevemente y localizar geográficamente los suelos distribuidos a lo largo de la zona de estudio.

Tabla 4. Tabla de los Grupos de Suelos de Referencia (GSR) de la Península de Yucatán (estat de Yucatán y de Campeche), según la WRB, 2006 (Duch, J., 1988; Bautista, F. *et al.*, 2010a i 2011b). Acrónimos: CODI: Código recomendado para los Grupos de Suelos de Referencia (WRB, 2007); GSR: Grupo de Suelos de Referencia

<sup>75</sup> Los calificadores se subdividen en grupo I y grupo II. Los calificadores grupo I comprenden aquellos típicamente asociados con GSR (en orden de su importancia) y de intergrados a otros GSR (en el orden de la clave). Todos los otros calificadores se listan como grupo II (WRB, 2007).

CODI	GSR	CARACTERÍSTICAS DE DIAGNÓSTICO GENERALES	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA
HS	Histosol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- contienen material orgánico acumulado en la superficie, tejidos vegetales que se reconozcan.</li> <li>- poco profundos (10 cm o más).</li> <li>- sobre un material con &gt;40% de CaCO<sub>3</sub>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estado de Yucatán y de Campeche: nordeste de la Península de Yucatán, muy cercanos a la costa (litoral marino) y en los <i>petenes</i><sup>76</sup>.</li> </ul>
LP	Leptosol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- limitados por una profundidad menor o igual a los 25 cm.</li> <li>- sobre un material con &gt;40% de CaCO<sub>3</sub>; &lt;20% de tierra fina.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estado de Yucatán y de Campeche: planicies kársticas y en las partes altas de las lomas<sup>77</sup>.</li> <li>- estado de Campeche: los más comunes en todo el estado, menos en la parte oeste.</li> </ul>
VR	Vertisol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- presentan un horizonte<sup>78</sup> vértico<sup>79</sup> dentro los 100 cm de profundidad.</li> <li>- después de los primeros 20 cm desde la superficie todos los horizontes tienen 30% de arcilla o más, hasta los 100 cm de profundidad.</li> <li>- se desarrollan en zonas donde predominan la presencia de arcillas del grupo <i>esmeclitas</i><sup>80</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estado de Yucatán y de Campeche: en las partes bajas del relieve.</li> <li>- estado de Yucatán: porciones sur y este, desde las proximidades de <i>Maxcanú</i> hasta <i>Noh halal</i> y Santa Rosa.</li> <li>- estado de Campeche: parte central y sur, en las planicies kársticas y acumulativas.</li> </ul>

<sup>76</sup> Comunidades vegetales endémicas de la Península de Yucatán: islas de vegetación arbórea que se encuentran inmersas en una vegetación baja inundable, llamada *marisma*. Estas *marismas* se desarrollan en terrenos bajos y pantanosos que se localizan alrededor de la costa, razón por la que se ven influenciadas por la salinidad del mar. El término *petén* proviene del vocablo maya *pet* que significa "redondo" o "circular" (Tun Dzul, F. *et al.*).

<sup>77</sup> Elevación natural de la superficie terrestre, que se destaca de su entorno, usualmente de poca extensión y con contornos bien definidos, más bien redonda que con picos, sin una definición precisa de su altura.

<sup>78</sup> Los horizontes son las capas de suelo dispuestas aproximadamente de forma paralela a la superficie del suelo y que tienen características que las diferencian de la capa superior y de la capa de debajo. La formación de horizontes es función de procesos geológicos químicos y biológicos que se desarrollan a lo largo de mucho tiempo.

<sup>79</sup> És un horizonte subsuperficial arcilloso que, como resultado de expansión y contracción, presenta superficies polidas y agregados estructurales en forma de cuña (WRB, 2007).

<sup>80</sup> Grupo de arcillas expansivas 2:1.

<b>SC</b>	Solonchak	<ul style="list-style-type: none"> <li>- horizonte sálico<sup>81</sup> que comienza dentro de los 50 cm desde la superficie.</li> <li>- en áreas bajas que presentan un nivel freático somero, la acumulación de sales es fuerte en la superficie del suelo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estado de Yucatán: franja de terreos bajos y pantanosos, a lo largo de la costa; este y sureste de <i>Celestun</i>; oeste de <i>Hunucmá</i>; este de <i>Dzilam de Bravo</i>, San Felipe y Las Coloradas.</li> <li>- estado de Campeche: a lo largo de la costa y en la zona de <i>petenes</i>.</li> </ul>
<b>GL</b>	Gleysol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- propiedades gléyicas dentro de los primeros 50 cm de profundidad: colores rojizos o amarillentos en la cara de los agregados y/o en la capa o capas superficiales del suelo, en combinación con colores grisáceos/azulados en el interior de agregados y/o más profundo en el suelo.</li> <li>- suelos no estratificados en áreas inundables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estado de Yucatán y de Campeche: en las partes bajas del relieve cercanos a la costa y partes de mayor altitud, en las lomas y en las montañas, en zonas de baja permeabilidad.</li> <li>- estado de Yucatán: porciones sur y este del litoral marino.</li> <li>- estado de Campeche: parte suroeste.</li> </ul>
<b>NT</b>	Nitisol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- horizonte subsuperficial rico en arcilla, más del 30%, textura arcillosa con estructura poliédrica fuertemente desarrollada.</li> <li>- suelos profundos, con buen drenaje, de color rojo típicos de los suelos tropicales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estado de Yucatán: porciones sur y este.</li> <li>- estado de Campeche: en las partes bajas del relieve (planicies y lomas kársticas).</li> </ul>
<b>PH</b>	Phaezoem	<ul style="list-style-type: none"> <li>- suelos ricos en materia orgánica de color oscuro.</li> <li>- horizonte superficial mólico<sup>82</sup>, denso y oscuro, rico en materia orgánica y nutrientes.</li> <li>- matriz libre de CaCO<sub>3</sub>, hasta los 100 cm de profundidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estado de Yucatán y de Campeche: se encuentran en los dos estados, en lugares bien drenados.</li> <li>- estado de Campeche: centro-oeste, en las planicies y las lomas kársticas.</li> </ul>
<b>LV</b>	Luvisol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- suelos con un horizonte de acumulación de arcilla, rico en saturación de base, capacidad de intercambio de cationes.</li> <li>- saturación por aluminio &lt;60%, entre los 25 y los 125 cm de profundidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estado de Yucatán.</li> <li>- estado de Campeche: norte, en las planicies y las lomas kársticas.</li> </ul>

<sup>81</sup> Es un horizonte superficial o subsuperficial somero que contiene un enriquecimiento secundario de sales fácilmente solubles, es decir, sales más solubles que el yeso (WRB, 2007).

<sup>82</sup> Es un horizonte superficial grueso, bien estructurado, oscuro, con alta saturación con bases y moderado a alto contenido de materia orgánica (WRB, 2007).

<b>AR</b>	Arenosol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- formados por texturas que van de arena mediana a más gruesa, a una profundidad de 100 cm.</li> <li>- contiene &lt;40% de fragmentos de roca dentro de los 100 cm desde la superficie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estado de Yucatán y de Campeche: cordones litorales, islas de barrera, planicie costera.</li> <li>- estado de Campeche: planicies costeras.</li> </ul>
<b>CM</b>	Cambisol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- suelos con un horizonte cámbico<sup>83</sup>, que se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie.</li> <li>- textura arenosa de mediana a más fina; estructura moderada; capacidad de intercambio catiónico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estado de Yucatán y de Campeche: planicies aluviales y kársticas onduladas o en los niveles de base de las lomas.</li> <li>- estado de Yucatán: norte y oeste.</li> <li>- estado de Campeche: parte sur, en las zonas bajas del relieve.</li> </ul>
<b>RG</b>	Regosol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- suelos minerales muy débilmente desarrollados (suelos jóvenes), constituidos de materiales sueltos no consolidados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estado de Yucatán y de Campeche: cerca de las costas.</li> <li>- estado de Yucatán: litoral marino (depósitos arenosos costeros) del nordeste, este y sureste de <i>Celestún</i>.</li> <li>- estado de Campeche: norte, sureste y sur de la ciudad de Campeche.</li> </ul>
<b>FL</b>	Fluvisol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- depósitos aluviales, confinados en sedimentos de ríos, así como en depósitos marinos y lacustres.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estado de Campeche: parte sur, en las planicies acumulativas.</li> </ul>
<b>CL</b>	Calcisol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- suelos con una sustancial acumulación de CaCO<sub>3</sub> secundario (15% o más) en un horizonte de 15 cm de espesura y mayor.</li> <li>- presencia de un horizonte petrocálcico<sup>84</sup> (CaCO<sub>3</sub> solidificado).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estado de Yucatán: parte de climas semiáridos.</li> <li>- estat de Campeche: al sur.</li> </ul>

<sup>83</sup> Es un horizonte subsuperficial que muestra evidencias de alteración respecto de horizontes subjacentes (WRB, 2007).

<sup>84</sup> Es un horizonte cálcico endurecido, que está cementado por carbonato de calcio y, en algunos lugares, por carbonato de calcio y un poco de carbonato de magnesio. Es de naturaleza masiva o laminar, y extremadamente duro (WRB, 2007).

Paralelamente, a la primera década del año 2000, se ha realizado una base de datos multilingüe (maya-castellano) de los suelos de la Península de Yucatán, a partir de estudios etnopedológicos, para poder entender las relaciones con el cultivo del suelo y para explorar y clasificar cómo los pueblos indígenas nombran a los suelos de su territorio (Bautista, F. *et al.*, 2010b). Estos tipos de estudios nos pueden acercar al conocimiento que la cultura maya prehispánica tenía de estos materiales arcillosos. En este trabajo, Bautista *et al.* (2010b) también intenta organizar el conocimiento del suelo maya en un esquema de clasificación de suelos y compararlo con la WRB (WRB, 2006 y 2007), consiguiendo generar la Clasificación del Suelo Maya (MSC) (Tabla 5), la cual se basa, mayoritariamente, en la descripción de las propiedades clave de los diferentes suelos del territorio maya (el tipo de roca, el tamaño y la cantidad de piedras, color de la tierra vegetal y del subsuelo, la profundidad, la dinámica del agua y los procesos de apoyo de la planta) (Bautista, F. *et al.*, 2010b).

Tabla 5. Características de diagnóstico del suelo de los grupos de referencia mayas (MSC, 2010) y la correspondencia con los grupos de suelos de referencia (GSR) (WRB, 2006 y 2007) (Bautista, F. *et al.*, 2010b). Acrónimos: CODI: Código recomendado para los Grupos de Suelos de Referencia (WRB, 2007); GSR: Grupo de Suelos de Referencia; MSC: Grupos de Referencia Maya de la Clasificación del Suelo Maya; I.D.: identificadores dominantes; C.D.: características de diagnóstico del suelo

<b>CODI</b>	<b>GSR</b>	<b>MSC</b>	<b>I.D.</b>	<b>C.D.</b>
<b>HS</b>	Histosol	<i>Pu'uc lu'um</i>	1	a
<b>AT</b>	Antrosol	<i>Kakkabb lu'um</i>	2.1	b
<b>LPli</b>	Leptosol lítico	<i>Tzek'el lu'um</i>	2.2	c
<b>LPglli(ca)</b>	Leptosol gléyico lítico (calcárico)	<i>Sak lu'um</i>	2.2	d
<b>LPli</b>	Leptosol lítico	<i>Pus lu'um</i>	2.2	e
<b>LPPrz</b>	Leptosol réndzico			
<b>LPmo</b>	Leptosol móllico			
<b>LPnt</b>	Leptosol nudilítico	<i>Chaltún</i>	2.2	f
<b>LPnt o li</b>	Leptosol nudilítico o lítico	<i>Hay lu'um</i>	2.2	g
<b>LPhk</b>	Leptosol hiperesquelético	<i>Ch'och'ol lu'um</i>	2.2	h
<b>LPhk</b>	Leptosol hiperesquelético	<i>Ch'ich'lu'um</i>	2.2	i
<b>LPmo</b>	Leptosol mollico	<i>Box lu'um</i>	2.2	j
<b>VRha</b>	Vertisol háplico	<i>Yaax kom lu'um</i>	2.3	k
<b>VRha(cr)</b>	Vertisol háplico (crómico)	<i>Yaax kom-K'an kab lu'um</i>	2.3	l
<b>VRgl</b>	Vertisol gléyico	<i>Yaxx kom-Ak'al che'</i>	2.3	m
<b>GL</b>	Gleysol	<i>AK'al che' grey</i>	2.3	n
<b>LV</b>	Luvisol	<i>K'an kab lu'um</i>	2.4	o
<b>PH</b>	Phaeozem	<i>Ek lu'um</i>	2.4	p
<b>LP</b>	Leptosol	<i>Chak lu'um</i>	2.5	q
<b>AR</b>	Arenosol	<i>Pupuskilu'um</i>	2.5	r



*Identificadores dominantes:* (1). suelos orgánicos; (2). suelos inorgánicos o minerales; (2.1). suelos inorgánicos o minerales, influenciados por la actividad humana; (2.2). suelos inorgánicos o minerales, con arraigo limitado a causa de la rocosidad somera; (2.3). suelos inorgánicos o minerales, influenciados por el agua; (2.4). suelos inorgánicos o minerales, con contraste de color entre el horizonte superficial y los subsuperficiales; (2.5). suelos inorgánicos o minerales, sin contraste entre el horizonte superficial y el subsuperficial.

*Características de diagnóstico del suelo:* (a). suelos negros, con abundante materia orgánica, basuras y desperdicios en descomposición, en zonas húmedas generalmente cubiertas por manglares; (b). suelos negros con un alto contenido de materia orgánica y con evidencia de actividad humana, como piezas de cerámica, cenizas, etc., principalmente en montículos; (c). suelos negros con poca tierra fina, afloramiento del lecho rocoso en forma de promontorio, con piedras > 25 cm de diámetro; (d). suelos de color gris claro, arcilla arenosa, muy poca profundidad (3-17 cm), moderadamente bien drenados, sobre roca caliza laminar; (e). suelos negros, con poca tierra fina, blandos, poco profundos, con >10% de materia orgánica, alta retención de agua, con o sin carbonato de calcio y roca caliza laminar; (f). afloramientos rocosos predominantemente de roca caliza laminar, grandes cantidades de fragmentos gruesos con muy poca tierra fina de color rojo, rojo-marronoso o negro; (g). suelos muy superficiales (<10 cm de profundidad) rojos, rojo-marronosos o negros, con materia orgánica (3-15% de contenido), <50% de contenido rocoso; (h). suelos negros con más tierra fina que los suelos *Tzek'el*, >90% de piedras, fragmentos gruesos de tamaño >5 cm de diámetro; (y). suelos negros y poco profundos (<25 cm de profundidad), grava abundante (>90%), >10% de materia orgánica, alta retención de agua; (j). suelos negros, con poca tierra fina y poco profundos, entre el 20-60% de grava y piedras, >10% de materia orgánica, bien drenados, con o sin carbonato de calcio; (k). suelos de color gris o rojo, profundos (>100cm), arcillosos, sin piedras, grietas temporales, duro cuando está seco; (l). suelos de color rojo, profundos (>100 cm), arcillosos, sin piedras, grietas temporales, duro cuando está seco, fértiles (>50% de cationes intercambiables); (m). suelos de color gris, moderadamente profundos (<100 cm), arcillosos, grietas temporales, sin piedras, pantanosos durante la temporada de lluvias, en tierras agrícolas y áreas grandes; (n). suelos de color gris, moderadamente profundos (<100 cm), arcillosos, grietas temporales, sin piedras, pantanosos en verano, en otoño y en invierno, con comunidad de plantas (*Dalbergia sp.* y *Haematoxylum campechianum*); (o). suelos con tierra vegetal de color rojo o rojo-marronoso que cubre un horizonte subsuperficial amarillo, <5% de materia orgánica, sin piedras en la capa superior del suelo, duro cuando está seco pero sin grietas: superficial (25-50 cm), Luvisol epiléptico (**LVel**), (*Ma'taan k'an kab lu'um*); moderadamente profundos (50-100 cm), Luvisol epiléptico (**LVel**), (*Taan taan k'an kab lu'um*); profundos (>100 cm), Luvisol háplico (**LVha**), (*Hach taan k'an kab lu'um*); (p). suelos con un horizonte superficial negro superpuesto a un horizonte subsuperficial de color amarillo o rojo, con más materia orgánica que los suelos *K'an kab lu'um* (>5%), sin piedras; (q). suelos rojos o rojo-marronosos, <5% de materia orgánica, pocas piedras: superficiales (<25 cm), Leptosol háplico (**LPha**), (*Ma'taan Chak lu'um*); moderadamente profundos (25-50 cm), Cambisol léptico (**CMle**), (*Taan taan*

*Chak lu'um*); profundos (>100 cm), Cambisol háptico (**CMha**), (*Hach taan Chak lu'um*); (r). suelos arenosos o arenosos con arena blanca de carbonato de calcio.

A continuación, a modo de ejemplo, se presenta una sección estratigráfica idealizada del paisaje de *Chunchucmil*, al nordeste de la Península de Yucatán, en la que se muestra la distribución espacial de la variedad edáfica de la zona que se superpone a los depósitos de material calcáreo del período Cuaternario antiguo (época del Plioceno), ya desarrollados en anteriores apartados (Figura 22) (Hutson, R. *et al.*, 2009).

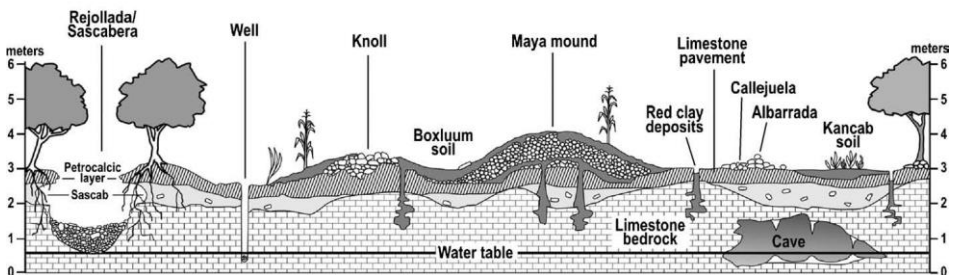


Figura 22. Sección estratigráfica idealizada del paisaje de *Chunchucmil*, región situada en la esquina nordeste de la Península del Yucatán, a 27 km al este del Golfo de México. Autores dibujo: Hutson, S.R. *et al.*, 2009

#### 1.1.1.6.2. La composición y la estructura cristalográfica de las arcillas

A raíz de la confusión terminológica que afecta a los estudios arqueométricos, en general, se cree oportuno incorporar este subapartado para establecer la terminología y la clasificación actualizada de los minerales de las arcillas.

Desde el punto de vista coloidoquímico, Wicklander (1955) define el suelo como: *un sistema heterogéneo y polidisperso, de componentes sólidos, líquidos y gaseosos en varias proporciones. La parte sólida está formada por minerales primarios<sup>85</sup>, minerales de arcilla y óxidos hidratados junto a materia orgánica u organismos vivos, de modo que forma un sistema polifásico, de partículas o agregados. En este sistema heterogéneo, la solución de suelo actúa como un medio a partir del cual las reacciones químicas entre*

<sup>85</sup> Son minerales que no se alteraron químicamente después de su génesis; formados a temperatura elevada y heredado de las rocas ígneas y metamórficas, a veces a través de un ciclo sedimentario (Besoain, E., 1985).

*miembros de las diferentes fases o una misma fase se hacen posibles, todo y cuando los reactantes no se encuentren en contacto directo* (Besoain, E., 1985). A partir de esta definición se puede decir que la arcilla es un constituyente fundamental del suelo, resultando de las acciones de meteorización sobre el sustrato rocoso de origen, y que su conocimiento puede proporcionar informaciones edafogenéticas muy útiles y cuantificar la mayoría de las propiedades químicas, físicas o biológicas del suelo (Besoain, E., 1985). Así pues, suelos y arcillas no se pueden conocer independientemente. La relación entre la mineralogía de las arcillas y la clasificación de suelos es muy estrecha. Por este motivo, en este apartado que nos ocupa hay que hacer referencia a las arcillas<sup>86</sup>, ya que estas están presentes en toda la Península de Yucatán, acompañando a la diversidad edáfica de los suelos de la región. Factores como el clima y la edad geomorfológica de la zona determinan cuál es el proceso de formación de estas arcillas y, por tanto, sus características fisicoquímicas.

Antes que nada, hay que definir y clasificar los minerales de las arcillas para poder aproximarnos al conocimiento de su naturaleza y entender el origen y la evolución de estas en el área de estudio que nos ocupa. En general, el término *arcilla* se aplica a un material natural, terroso, de tamaño de grano fino y que muestra plasticidad cuando se mezcla con una cierta proporción de agua. Su composición química está caracterizada por la presencia de Si, Al y H<sub>2</sub>O, junto a cantidades variables de Mg, Mn, Fe, Ca, Na y K, principalmente. Desde el punto de vista cristalológico<sup>87</sup>, las arcillas forman parte de un grupo de minerales llamados silicatos, concretamente del subgrupo de silicatos llamados filosilicatos<sup>88</sup> o *silicatos en hojas*, dada la morfología característica que suelen presentar estos minerales. Las arcillas son estructuras de aluminosilicatos hidratados formadas por el apilamiento de láminas formadas, a su vez, por diferentes capas tetraédricas y octaédricas (Amigó, M., *et al.* 2001).

Citando textualmente a las doctoras García, E. y Suárez, M., extraído del texto *Las Arcillas: Propiedades y Usos*: “*los grupos tetraédricos (SiO)<sub>4</sub><sup>-4</sup> se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas,*

---

<sup>86</sup> La palabra maya que significa arcilla es *k'at* (Isphording, W.C., 1984).

<sup>87</sup> La cristalografía es una rama de la cristalografía que se encarga de relacionar la estructura cristalina de los minerales con la composición química que estos poseen y las propiedades que se derivan.

<sup>88</sup> Las diferentes formas de combinación de estos tetraedros entre sí y con otros iones da lugar a la formación de los 6 grupos de silicatos existentes: nesosilicatos, sorosilicatos, ciclosilicatos, inosilicatos, filosilicatos y tectosilicatos.

de extensión infinita y fórmula  $(Si_2O_5)^{2-}$ , que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas, los tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por el  $Al^{+3}$  o  $Fe^{+3}$ . Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo gibbsita o brucita. En ellas algunos  $Al^{+3}$  o  $Mg^{+2}$ , pueden ser sustituidos por  $Fe^{+2}$  o  $Fe^{+3}$  y, más raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn. El plan de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales<sup>89</sup>), y por grupos  $(OH)^-$  de la capa brucítica o gibbsítica, de forma que, en este plan, queda un  $(OH)^-$  en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los  $(OH)^-$  son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros" (Figura 23).

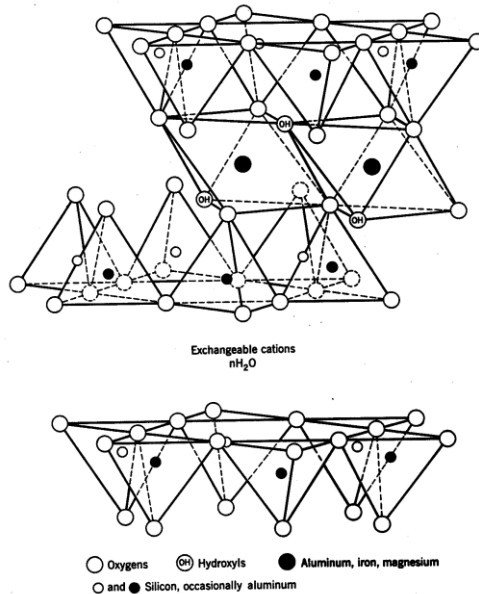


Figura 23. Estructura cristalocquímica de los filosilicatos de los minerales de las arcillas. Fuente: <<http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/hhtm>>. Autor dibujo: García, E. y Suárez, M.

“Una unión similar puede pasar en la superficie opuesta de la capa octaédrica. Así, los filosilicatos pueden estar formados por dos capas: tetraédrica más octaédrica y se llaman **bilaminares, 1:1**, o **T:O**; o bien por tres capas: una

<sup>89</sup> El plano que contiene los tres oxígenos de la cara sobre la que se asienta el tetraedro recibe el nombre de plano basal mientras que el cuarto oxígeno se denomina apical y se encuentra desplazado una cierta distancia sobre el plano basal.

octaédrica y dos tetraédricas, llamándose **trilaminaers**, **2:1** o **T:O:T**. A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica más una o dos tetraédricas se le llama **lámina**. Si todos los agujeros octaédricos están ocupados, la lámina se nombra **trioctaédrica** ( $Mg^{+2}$  dominante en la capa octaédrica). Si solamente están ocupados dos tercios de las posiciones octaédricas y el tercio restante está vacante, se llama **dioctaédrica** (el  $Al^{+3}$  es el catión octaédrico dominante” (García, E. y Suárez, M.).

Según De Pablo (1964), la clasificación de los minerales arcillosos se basa en los tres criterios básicos que las definen: la espesura de la unidad estructural; su composición química y su contenido iónico; y, su orden y su simetría, que son consecuencia de su origen y de los procesos posteriores a los que están sometidos. En la tabla 6 se presenta la clasificación de los minerales arcillosos, en la que se distinguen entre di- y trioctaédricos y entre los grupos: bilaminares (1:1), trilaminares (2:1) y (2:1:1).

Tabla 6. Clasificación de los filosilicatos del grupo de los minerales de la arcilla, extraída de Besoain, E., 1985 y actualizada por la información extraída de García, E. y Suárez, M. Acrónimos: C.G: clase general; F. formula química; A: laminares; B: fibrosas

C.G	COMPOSICIÓN DE LAS CAPAS	POBLACIÓN DE CAPAS OCTAÉDRICAS	NOMBRE DEL GRUPO	MINERALES	F.
A	Bilaminares (1:1)	Dioctaédricas	CANDITAS	Nacrita	1
				Dickita	2
				Caolinita	3
				Metahalloysita	4
				Halloysita	5
				Anauxita	6
		Trioctaédricas	SERPENTINAS	Antigorita	7
				Crisotilo	8
				Amesita	9
				Cronstedtita	10
				Berthierina	11
	(2:1:1)	Dioctaédricas, trioctaédricas o mixtas	Cloritas	Cloritas	12
	Trilaminares (2:1)	Dioctaédricas	MICAS	Illitas	13
				Moscovita	14
				Paragonita	15
			ESMECTITAS	Montmorillonita	16
				Beidelita	17
				Nontronita	18
				Volkonskoita	19
			Vermiculita	Vermiculita dioctaédrica	20
			Pirofillita		21

		Trioctaédricas	Vermiculita	Vermiculita trioctaédrica	22
			MICAS	Biotita	23
				Flogopita	24
				Lepidolita	25
			ESMECTITAS	Saponita	26
				Sauconita	27
			Hectorita	28	
Talco		29			
	Bi-, trilaminares o mezclas	minerales interestratificados <sup>90</sup>			30
<b>B</b>	<b>(2:1)</b> <sup>91</sup>	Dioctaédricas		Paligorskita <sup>92</sup>	31
		Trioctaédricas		Sepiolita	32

### Fórmulas químicas:

- (1).  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
- (2).  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
- (3).  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
- (4).  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
- (5).  $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O$
- (6).  $Al_2Si_3O_7(OH)_4(?)$
- (7).  $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$
- (8).  $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$
- (9).  $(Mg,Fe)_4Al_4Si_2O_{10}(OH)_8$
- (10).  $Fe_6(Si_2Fe_2)O_{10}(OH)_8$
- (11).  $(Fe,Mg,Al)_6(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$
- (12). variable
- (13).  $(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$
- (14).  $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$
- (15).  $NaAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
- (16).  $0,33M+(Al_{1,67}Mg_{0,33})Si_4O_{10}(OH)_2$
- (17).  $0,33M+Al_2(Si_{3,67}Al_{0,33})O_{10}(OH)_2$
- (18).  $0,33M+Fe_2(Si_{3,67}Al_{0,33})O_{10}(OH)_2$
- (19).  $0,33M+(Fe,Cr,Al)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$
- (20).  $0,67M+(Al,Fe,etc.)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$
- (21).  $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$
- (22).  $0,67M+(Mg,Fe,etc.)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$
- (23).  $K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH,F)_2$
- (24).  $K(Mg,Fe,Mn)_3Si_3AlO_{10}(F,OH)_2$
- (25).  $K(Li,Al)_3(Si,Al)_4O_{10}(F,OH)_2$
- (26).  $0,33M+Mg_3(Si_{3,67}Al_{0,33})O_{10}(OH)_2$
- (27).  $0,33M+(Mg,Zn)_3(Si_{3,67}Al_{0,33})O_{10}(OH)_2$
- (28).  $0,33M+(Mg,Li)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$
- (29).  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
- (30). variable, segons composició
- (31).  $H_4Mg_5Si_8O_{20}(OH)_6 \cdot 6H_2O$
- (32).  $H_6Mg_3Si_{12}O_{30}(OH)_{10} \cdot 6H_2O$

<sup>90</sup> En la naturaleza, no obstante, es relativamente raro encontrar estas especies minerales como fases estrictamente puras. Dado el tipo de estructura que presentan los fillosilicatos, es muy habitual que se formen lo que se denominan interestratificados de fillosilicatos, es decir, paquetes de espesor variable formados por fragmentos de estructura asimilable a la de diversas micas y/o arcillas. Se trata en realidad de una mezcla de minerales y esto condiciona que las propiedades del conjunto sean mixtas y no la de las fases puras.

<sup>91</sup> Estas últimas también se las denomina **T:O:T:O**. Estructuralmente están formadas por láminas discontinuas de tipo mica. A diferencia del resto de los fillosilicatos, que son laminares, estos tienen hábito fibroso, puesto que la capa basal de oxígenos es continua, pero los oxígenos apicales sufren una inversión periódica cada 8 posiciones octaédricas (sepiolita) o cada 5 posiciones (paligorskita). Esta inversión da lugar a la interrupción de la capa octaédrica que es discontinua (García, E. y Suárez, M).

<sup>92</sup> En los Estados Unidos, el término utilizado es Attapulgita en vez de Paligorskita; aún así, el Comité Internacional de Nomenclatura, determinó que el término Paligorskita debía ser el nombre aceptado (Bailey, S.W., *et al.*, 1971).

### 1.1.1.6.3. La tipología y el origen de las arcillas empleadas por los mayas

Específicamente, en la Península de Yucatán, se pueden diferenciar tres grandes grupos de arcillas en función de su proceso de formación: por procesos de pedogénesis (arcillas pedogenéticas), por la sedimentación de detritus (arcillas detríticas) y por la cristalización directa (arcillas primarias por cristalización directa) (Isphording, C., 1984; Pablo-Galán, L., 1996), tal y como se presenta a continuación:

*Por procesos de pedogénesis*<sup>93</sup>: a partir de estos procesos se pueden encontrar minerales de arcilla en todas sus etapas de madurez. Por una parte, se forman minerales de arcilla más jóvenes, como la caolinita mal cristalizada, la boehmita, y trazas de talco y de clorita; y, por otra, se encuentran minerales de arcilla en su fase avanzada de madurez, tales como la caolinita con una buena cristalización. Su origen se atribuye a la acumulación y alteración de impurezas silíceas de la roca caliza primaria o parental. La tonalidad de estas arcillas vira de rojas a rojo-marronosas.

*Por la sedimentación de detritus*: a partir de la sedimentación de detritus se forman lo que se conoce como arcillas detríticas. Son arcillas esmectitas asociadas a cuarzo detrítico, magnetita, ilmenita y, en menor proporción, caolinita. Estas arcillas derivan de material detrítico volcánico (originario de las cuencas del sur de Belice y de Guatemala central) depositado en lagos o en lagunas marginales, que más tarde, se transforman en lagos salinos por el levantamiento tectónico de la península. La tonalidad de estas arcillas vira de gris a negro, pasando por el color negro-marronoso. Cabe destacar, además, que se caracterizan por ser altamente plásticas. Estas arcillas están restringidas a la siguiente distribución geográfica: son poco frecuentes en el norte de la península, debido a una falta de corrientes superficiales y, se limitan al bloque este de la falla de Ticul, a las áreas de cuencas de polje dispersas por la Sierra de Ticul, al este del estado de Campeche y a lo largo de la carretera de Escárcega-Chetumal (estado de Quintana Roo).

*Por la cristalización directa*: arcillas primarias formadas por talco, clorita, paligorskita-sepiolita y capas mixtas de caolinita-montmorillonita. Estas arcillas constituyen el tipo genérico de arcillas que se encuentran en la península y están restringidas a la región nordeste, como se puede observar en la figura 24. De un lado, el origen del talco y la clorita está relacionado con rocas carbonatadas y suelos del norte de la plataforma kárstica de la península,

---

<sup>93</sup> Estos procesos de pedogénesis son los que controlan la formación de un suelo, es decir, son los procesos a partir de los cuales se crea un suelo.

asociados con rocas dolomíticas. Estos se forman por cristalización directa, como consecuencia de la alteración diagenética de la dolomita; por otro lado, el origen de la paligorskita-sepiolita, de tonalidad blanquecina, que aflora aislada o como depósitos dentro de las rocas calizas, se asocia a la cristalización directa de las aguas marinas de salinidad elevada o a la diagénesis de la dolomita.

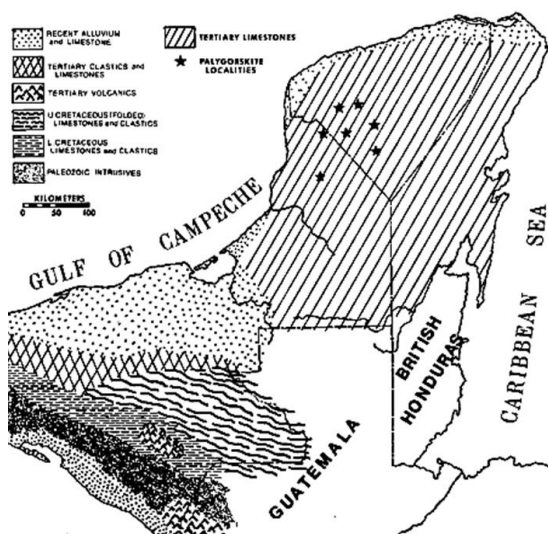


Figura 24. Mapa geológico de la Península de Yucatán donde se muestra la distribución geográfica de las localidades donde aparecen los afloramientos más reconocidos de arcillas tipo paligorskita: *Maxcanú*, *Umán*, *Muna*, *Sacalum*<sup>94</sup>, *Ticul*, *Chapab*, *Uxmal* (localidades dispersas por la Sierra de Ticul). Autor: Isphording, W.C, 1984

Es importante resaltar que trabajos anteriores que han investigado las arcillas de la Península de Yucatán, se centran en el estudio de los depósitos de paligorskita (llamada *sak lu'um*<sup>95</sup> “tierra blanca”, en maya yucateca), los cuales

<sup>94</sup> La palabra *Sacalum* es una castellanización de la palabra *sak lu'um* del maya yucateca que quiere decir “terra blanca”. Es el nombre de la localidad que se localiza en el nordeste de Ticul (estado de Yucatán) (Arnold, D.E. *et al.* 2007).

<sup>95</sup> Según la terminología de suelos: Leptosol gléyico lítico (calcáreo) (**LPglli(ca)**) (WRB, 2006) → *sak lu'um* (MSC) (Bautista, F. *et al.*, 2006). Suelos inorgánicos o minerales, con arraigo limitado debido a la rocosidad somera. Suelos de color gris claro, arcilla arenosa, muy poca profundidad (3-17 cm), moderadamente muy drenados, sobre roca caliza laminar.



señalan la importancia de esta arcilla como ingrediente de la cultura precolombina para la manufactura del *azul maya*<sup>96</sup> (Gettens, R.J. y Stout, G.L., 1946; Shepard, A.O., 1962; Sánchez del Río, M. *et al.*, 2011), que es un pigmento azul sobradamente utilizado por los antiguos mayas en las pinturas murales, la escultura y la cerámica (De Yta, A. *et al.*, 1977; Littmann, R. *et al.*, 1982; Torres, M., 1988; Roundhill, S. *et al.*, 1989; Yacamán, J. *et al.*, 1996; Chiari, G. *et al.*, 2003; Fois, E. *et al.*, 2003; Hubbard, B. *et al.*, 2003; Sánchez del Río, M. *et al.*, 2004; Doménech, A. *et al.*, 2009; Sánchez del Río, M. *et al.*, 2009), utilizado predominantemente durante el período Clásico y el Posclásico, desde el norte de la Península de Yucatán hasta las tierras altas de Guatemala y México central (Arnold, D.E. *et al.*, 2007), lo que prueba su uso por otras culturas prehispánicas de la Antigua Mesoamérica, entre ellas la teotihuacana. Estos resultados sugieren que la paligorskita posee otras propiedades físicas que la distinguen de otras arcillas y que este hecho era conocido por los mayas mucho antes de la llegada de los primeros europeos (Bradley, F., 1940; Gettens, J., 1962; Van Olphen, H., 1967; Arnold, D.E., 1967a, 1967b, 1971, 1991, 2000 y 2005; Arnold, D.E. *et al.*, 1975, 1976, 2007 y 2008; Littman, R., 1980, 1982; Isphording, C., 1984; Doménech-Carbó, T. *et al.*, 2006; Polette-Niewold, À. *et al.*, 2007; Doménech, A. *et al.*, 2009; Cecil, G., 2010; Sánchez del Río, M. *et al.*, 2011).

En uno de estos últimos estudios, realizado por Arnold, D.E. *et al.* (2007), después de analizar 33 muestras de paligorskita escogidas a partir de fuentes etnográficas y extraídas de la Península de Yucatán (México) y El Petén (Guatemala), se determina que se utilizaron 7 depósitos diferentes de arcilla susceptibles de haber sido explotados para la fabricación del pigmento *azul maya*: *Yo' Sah kab*, *Uxmal*, *Chapab*, *Sacalum*, *Maxcanú*, *Mama* y en el sur de El Petén. Estos resultados dan apoyo a la idea que han podido existir más localizaciones de depósitos de paligorskita, a parte de los conocidos del norte de la Península de Yucatán, para la manufactura del *azul maya*, apoyando la hipótesis de Littman (1980) (Cecil, G., 2010).

---

<sup>96</sup> El primero en denominar la paligorskita como componente del *azul maya* fue Shepard, a comienzos de los años 60 del siglo XX (Shepard, A.O., 1962), cuando el mineral se denominaba attapulgita (Bradley, W.F., 1940). El *azul maya* es un inusual pigmento que posee una estructura molecular que combina un colorante orgánico (índigo, obtenido de la planta *Indigofera suffruticosa*, conocida localmente como *anyil* o *xiuquilitl*) y una matriz arcillosa de paligorskita (Arnold, D.E. *et al.*, 2007; Sánchez del Río, M. *et al.*, 2009).

## 1.1.2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 1.1.2.1. Materias primas de las áreas arqueológicas estudiadas

Las materias primas consideradas en la presente investigación pertenecen, por una parte, a tres canteras (P1, P2 y P3) y a una *sascabera* (S1), posibles sitios de explotación de la materia prima utilizada para la manufactura del mortero de las capas de preparación de los estucos de los sitios arqueológicos del área de estudio, tal y como se detalla a continuación (consultar la figura 27: localización geográfica del área de extracción de las materias primas):

Material pétreo (**P1**) extraído de la cantera situada en la periferia del sitio arqueológico de *Chacmultún* (estado de Yucatán).

Material pétreo (**P2**) extraído de la cantera situada en la periferia del sitio arqueológico de *Santa Rosa Xtampak* (estado de Campeche).

Material pétreo (**P3**) extraído de la cantera asociada al sitio arqueológico de *Katjún* (cerca de la localidad de *Xpujil*, estado de Campeche).

Material pétreo (**S1**) extraído de la *sascabera* del entorno del sitio arqueológico de *Acanceh* (estado de Yucatán).

Por otra parte, se considera caracterizar once muestras de sedimentos arcillosos procedentes de tres de las localidades donde aparecen los afloramientos más reconocidos de arcillas tipo paligorskita, en la época prehispánica y en la actualidad, según evidencias históricas y etnográficas, tal como se referencia en el apartado de antecedentes de esta investigación. La subdivisión de las muestras por localidades y su codificación es la que sigue (Figura 25 y 26):

Sedimento arcilloso (**C1**) extraído de la cueva de *Sak lu'um* (tierra blanca), de la localidad de *Sak lu'um*, al norte del estado de Yucatán, aproximadamente a 80 Km al sur de la ciudad de Mérida. Los diferentes estudios demuestran que esta cueva habría sido una fuente importante de arcilla desde tiempos prehispánicos. Se han extraído nueve muestras de sedimento arcilloso de esta cueva, a diferentes profundidades, que se han codificado tal como sigue: C1-1, C1-2, C1-3, C1-19, C1-33, C1-34, C1-35, C1-36 y C1-37.

Sedimento arcilloso (**C2**) extraído de la cueva de la localidad de *Muna*, al norte del estado de Yucatán. Los diferentes estudios hacen referencia al uso de esta

arcilla para confeccionar los colores de la cerámica. La muestra de sedimento arcilloso se ha codificado como C2-7.

Sedimento arcilloso (**C3**) extraído de la cueva de *Actun Hi*, de la localidad de Ticul, al norte del estado de Yucatán. Los diferentes estudios señalan la importancia de estos depósitos como ingrediente para la cerámica desde tiempos precolombinos hasta la actualidad. La muestra de sedimento arcilloso se ha codificado como C3-18.



Figura 25. De izquierda a derecha, fotografías de la cueva de *Sak lu'um* (*Sak lu'um*, estado de Yucatán) y de la cueva de *Actun Hi* (Ticul, estado de Yucatán), respectivamente. Fotografías cedidas: M<sup>a</sup> Luisa Vázquez de Ágredos y publicadas en Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L. (2010).

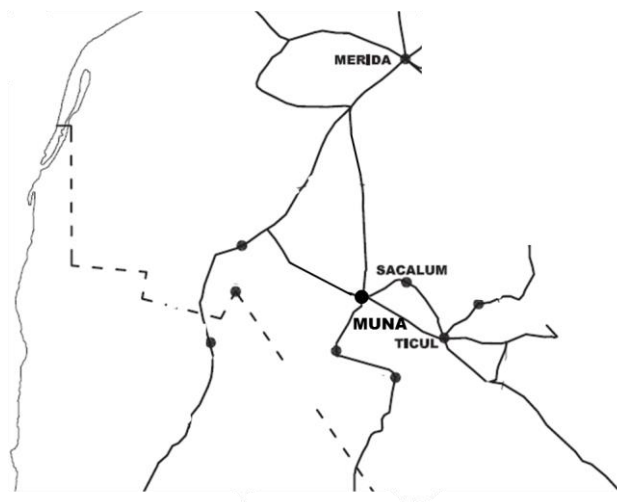


Figura 26. Ubicación geográfica de las tres localidades de donde se han extraído las muestras de sedimento arcilloso: *Sak lu'um* (Sacalum), *Muna* y Ticul. Autor dibujo: Sánchez del Río, M. *et al.*, 2007, modificado por el autor de la tesis.

### 1.1.2.2. Estucos de los sitios arqueológicos seleccionados

Las capas de preparación de los estucos considerados en esta investigación pertenecen a obras que fueron ejecutadas en el período Clásico maya (ca.300-950/1000 d.C) en tres subregiones<sup>97</sup> diferentes de la región de las Tierras Bajas Mayas del Norte, de la Península de Yucatán (México), tal como se detalla a continuación (consultar la figura 27 y 28: localización geográfica de los sitios arqueológicos):

#### 1. Subregión del Puuc (estado de Yucatán)

Pintura mural de la estructura A de *Mulchic*<sup>98</sup> (**MU**) (Clásico Tardío; ca. 600-800 d.C).

Pintura mural de la estancia 10 del *Edificio de las Pinturas* de *Chacmultún* (**CH**) (Clásico Tardío; ca. 600-800 d.C).

Pintura mural de la estructura I palaciega de *D'zula* (**DL**) (Clásico Tardío; ca. 600-800 d.C).

#### 2. Subregión nordeste de Yucatán (estado de Yucatán)

Pintura mural de la estructura palaciega de las Pinturas de *Acanceh*<sup>99</sup> (**AC**) (Clásico Temprano; ca. 300-600 d.C)

Pintura mural de la estancia 64 de la Acrópolis de *Ek'Balam* (**EB**) (entre finales del s. VIII d.C y principios del s. IX d.C, pero siempre dentro del reinado de *Ukit Kan Lek'Tok*, que muere el 825 d.C) (transición entre el Clásico Tardío y el Terminal)

Fachada policromada de la subestructura<sup>100</sup> del Templo de la Serie Inicial de *Chichén Itzá* (**CI**) (Clásico Terminal; 878 d.C)

Fachada policromada de la estructura palaciega del grupo B de las Pinturas de *Kulubá* (**KU**) (Clásico Terminal; ca. 800-950/1000 d.C)

---

<sup>97</sup> Desde los años 80, el estudio de la arquitectura de las Tierras Bajas Mayas del Norte ha establecido tres estilos arquitectónicos ligados a tres subregiones geográficas diferentes: Puuc, Chenes y Río Bec (Muñoz, G., 2006). En esta investigación, como se puede comprobar, no se estudian los estilos de la subregión Río Bec, pero sí que se han seleccionado cuatro sitios arqueológicos que se han agrupado bajo la denominación *Subregión nordeste de Yucatán*.

<sup>98</sup> Arrancamiento de estas pinturas murales. Actualmente ubicadas en el Museo Regional de la Ciudad de Mérida.

<sup>99</sup> Pintura mural llamada *estucos de Breton* (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006) que ha desaparecido. Actualmente está ubicada en cajas y se está buscando su localización original en el sitio arqueológico. Eduard Selser y Adela Breton la documentaron a finales del s. XIX.

<sup>100</sup> Originalmente había sido un templo en el exterior. Las muestras corresponden a la fachada estucada de este templo.

### 3. Subregión Chenes (estado de Campeche)

Pintura mural de la estructura I de *El Tabasqueño* (ET) (Clásico Tardío; ca. 600-800 d.C)

Pintura mural de la estructura I de *Dzibilnocac* (DZ) (Clásico Tardío; ca. 600-800 d.C)

Fachada policromada<sup>101</sup> del palacio *Boca de Serpiente* de *Santa Rosa Xtampak* (SR) (transición entre el Clásico Tardío y el Terminal; ca. 800-950/1000 d.C).

Para la clasificación y la denominación de los estucos estudiados se sigue el criterio decidido en el momento de analizar las primeras muestras pictóricas mayas en el Laboratorio de Análisis Físicoquímicos y Control Medioambiental de Obras de Arte del Instituto de Restauración del Patrimonio (IRP) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006 y 2010).

Los estucos se referencian utilizando una codificación que identifica: la localización geográfica del sitio arqueológico de extracción de la muestra del estuco (*Mulchic* (MU), *D'zula* (DL), *Kulubá* (KU), *Acanceh* (AC), *Chacmultún* (CH), *Ek'Balam* (EB), *Chichén Itzá* (CI), *Sta. Rosa Xtampak* (SR), *El Tabasqueño* (ET) y *Dzibilnocac* (DZ)); el color de la capa pictórica del fragmento de pintura mural extraído (amarillo (1), azul (2), blanco (3), gris (4), naranja (5), negro (6), rojo (7), ocre (8), verde (9) y rosa (10)); la tonalidad del color de la capa pictórica (A, B, C, D, E, etc.); y, la capa de preparación de la pintura mural extraída para el estudio, es decir, en el supuesto de no disponer de toda la estratigrafía del estuco se especifica la capa de preparación obtenida. Por ejemplo: mortero (mo) y enlucido (en).

La selección de los estucos estudiados se justifica atendiendo a los siguientes criterios y con la finalidad de obtener una mayor variedad de tipologías: se intenta diferenciar tradiciones técnicas en las capas de preparación en contextos regionales, subregionales, locales y concretos. Es por esto, que en esta selección de estucos se busca tener las muestras representativas procedentes de un mismo contexto regional, subregional, local o concreto; todos los estucos pertenecen al período Clásico (ca. 300 d.C. – 1000 d.C), que corresponde a la esplendor de la Civilización Maya, el cual se subdivide en tres períodos, el Clásico Temprano (ca. 300 d.C – 600 d.C), el Clásico Tardío (ca. 600 d.C – 850 d.C) y el Clásico Terminal (ca. 850 d.C – 1000 d.C); y, se intenta hacer la selección de los estucos teniendo en cuenta la localización de este en el edificio, fachada exterior estucada policromada o estuco de las paredes de las estancias interiores.

---

<sup>101</sup> Estuco de la esquina de la parte interior de la cornisa de la fachada exterior del edificio.

A continuación, en la tabla 7 se presenta el sitio arqueológico relacionado con la localización de extracción, la tipología arquitectónica, el período histórico y la codificación de las muestras de estuco generada para el estudio:

Tabla 7. Localización de extracción, tipología arquitectónica, período histórico y codificación de la toma de las muestras seleccionadas para la investigación. Acrónimos: SITIO ARQUEOLÓG.; sitio arqueológico; T.A: tipología arquitectónica; CÓDIGO MUEST.: código muestras; a: palacio; b: templo

<b>SITIO ARQUEOLÓG.</b>	<b>LOCALIZACIÓN</b>	<b>T.A</b>	<b>CÓDIGO MUEST.</b>	<b>PERÍODO HISTÓRICO</b>
<b>S.R. Xtampak</b>	<i>Boca de Serpiente</i>	a	SR-7	Tardío-Terminal
<b>S.R. Xtampak</b>	<i>Boca de Serpiente</i>	a	SR-en	Tardío-Terminal
<b>El Tabasqueño</b>	Estructura I	b	ET-2A	Clásico Tardío
<b>El Tabasqueño</b>	Estructura I	b	ET-7A	Clásico Tardío
<b>El Tabasqueño</b>	Estructura I	b	ET-9B	Clásico Tardío
<b>El Tabasqueño</b>	Estructura I	b	ET-9/7	Clásico Tardío
<b>Dzibilnocac</b>	Estruct. I, estancia 4	b	DZ-2	Clásico Tardío
<b>Dzibilnocac</b>	Estruct. I, estancia 4	b	DZ-7	Clásico Tardío
<b>Chacmultún</b>	Estructura I	a	CH-en/mo	Clásico Tardío
<b>Chacmultún</b>	Estructura I	a	CH-7	Clásico Tardío
<b>D'zula</b>	Estruct. I, estancia 1	a	DL-mo/en	Clásico Tardío
<b>D'zula</b>	Estruct. I, estancia 1	a	DL-7	Clásico Tardío
<b>Mulchic</b>	Estructura A	a	MU-6	Clásico Tardío
<b>Mulchic</b>	Estructura A	a	MU-7	Clásico Tardío
<b>Mulchic</b>	Estructura A	a	MU-8A	Clásico Tardío
<b>Mulchic</b>	Estructura A	a	MU-9A	Clásico Tardío
<b>Ek'Balam</b>	Estruct. I, estancia 64	a	EB-mo	Tardío-Terminal
<b>Ek'Balam</b>	Estruct. I, estancia 64	a	EB-2	Tardío-Terminal
<b>Ek'Balam</b>	Estruct. I, estancia 64	a	EB-3	Tardío-Terminal
<b>Ek'Balam</b>	Estruct. I, estancia 64	a	EB-5A	Tardío-Terminal
<b>Ek'Balam</b>	Estruct. I, estancia 64	a	EB-7	Tardío-Terminal
<b>Chichén Itzá</b>	Subestruct., s. inicial	b	CI-2	Clásico Terminal
<b>Chichén Itzá</b>	Subestruct., s. inicial	b	CI-2D	Clásico Terminal
<b>Chichén Itzá</b>	Subestruct., s. inicial	b	CI-7	Clásico Terminal
<b>Chichén Itzá</b>	Subestruct., s. inicial	b	CI-8B	Clásico Terminal
<b>Chichén Itzá</b>	Subestruct., s. inicial	b	CI-9A	Clásico Terminal
<b>Kulubá</b>	Estructura, grupo B	a	KU-3	Clásico Terminal
<b>Kulubá</b>	Estructura, grupo B	a	KU-5	Clásico Terminal
<b>Kulubá</b>	Estructura, grupo B	a	KU-7	Clásico Terminal
<b>Acanceh</b>	Pintura mural	a	AC-1	Clásico Temprano
<b>Acanceh</b>	Pintura mural	a	AC-2	Clásico Temprano
<b>Acanceh</b>	Pintura mural	a	AC-7/7A	Clásico Temprano
<b>Acanceh</b>	Pintura mural	a	AC-9	Clásico Temprano

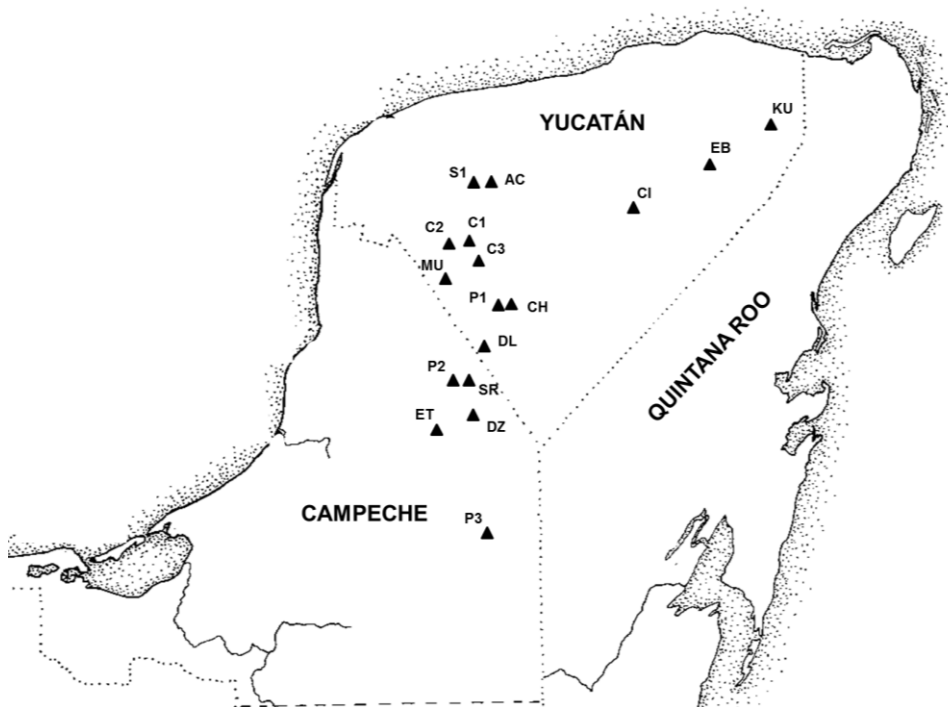


Figura 27. Mapa de la región de las Tierras Bajas Mayas del Norte con la localización geográfica del área de extracción de las materias primas y de los sitios arqueológicos. Acrónimos: Materias primas: P1: cantera *Chacmultún*; P2: cantera *Sta. Rosa Xtampak*; P3: cantera de *Katjún*; S1: *sascabera de Acanceh*; C1: *cueva de Sak lu'um*; C2: *cueva de Muna*; C3: *cueva de Ticul*. Sitios arqueológicos: MU: *Mulchic*; DL: *D'zula*; KU: *Kulubá*; AC: *Acanceh*; CH: *Chacmultún*; EB: *Ek'Balam*; CI: *Chichén Itzá*; SR: *Sta. Rosa Xtampak*; ET: *El Tabasqueño*; DZ: *Dzibilnocac*.





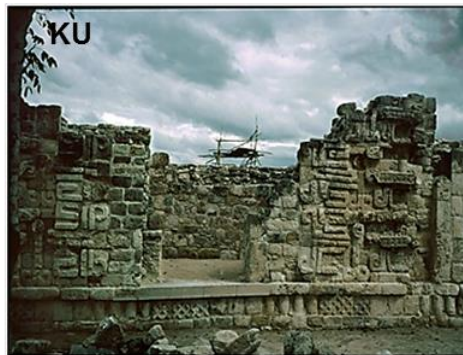
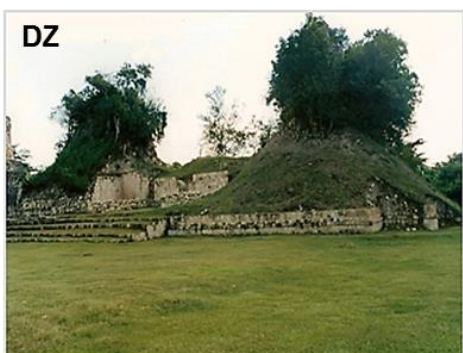






Figura 28. Fotografías de los sitios arqueológicos seleccionados. SR: palacio *Boca de Serpiente* de *Sta. Rosa Xtampak* y detalle de la ubicación de extracción de las muestras (parte inferior de la cornisa de la fachada policromada); ET: estuco de una de las estancias de la Estructura I de *El Tabasqueño*; DZ: visión de la Estructura I de *Dzibilnocac*. En la parte interior del templo se encuentra la estancia 4 decorada con estucos; CH: visión del palacio o de la Estructura I de *Chacmultún*. En la parte interior del palacio se encuentran los estucos; DL: estuco de la estancia 1 de la estructura I palaciega, en *D'zula*; EB: vista de la plaza oeste de *Ek'Balam* donde se encuentra la Acrópolis. Visión de la entrada de la tumba del rei *Ukit Kan Le'k Tok*. Las muestras consideradas en esta investigación proceden del interior de la estancia 64; CI: estructura de *Chichén Itzá* donde se encuentra la Subestructura de la serie inicial que originalmente había estado un templo, durante el Clásico Terminal; KU: fachada policromada de la estructura palaciega del grupo B, en *Kulubá*; AC: vista de un palacio, en *Acanceh*; MU: estuco de la estancia de la estructura A palaciega, en *Mulchic*. Fuente: fotografías cedidas por Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L. y publicadas en Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L. (2010).

### 1.1.2.3. Instrumentación

Los estudios y la caracterización químico-mineralógica, tanto de las materias primas de las áreas arqueológicas estudiadas como de los morteros de las capas de preparación de los estucos de los sitios arqueológicos seleccionados, se han realizado con las siguientes técnicas instrumentales de análisis:

#### *Microscopía óptica (MO)*

El análisis por microscopía óptica se realiza con una lupa estereoscópica LEICA S8APO (Leica. Heidelberg, Germany). Objetivos (0.63x, 1x, 1,25x, 2x). Aumentos desde 10x hasta 80x. Luz polarizada. Campo claro. Cámara fotográfica digital acoplada e iluminación por fibra óptica bilateral.

Para la observación de las muestras a través de la lupa estereoscópica, estas se embuten en resina de poliéster y se pulen hasta obtener una sección transversal de las mismas.

### *Microscopía óptica de polarización o petrográfica (MOP)*

El análisis por microscopía óptica de polarización se realiza con un microscopio óptico LEICA DMR (Leica. Heidelberg, Germany). Objetivos (4x, 10x, 20x, 40x). Utilizando luz reflejada polarizada con una magnificación que oscila de 25x a 400x. Las muestras se cortan en prismas rectangulares (dados) y son desbastados por una de las caras, utilizando polvo de carburo de silicio de diferente textura de grano y mezclado con agua sobre vidrios esmerilados. La cara pulida del dado se engancha en el porta utilizando resina de poliéster (SERYFIX, Struers). Posteriormente, se realiza un primer corte del dado con la cortadora, consiguiendo una lámina de 100 µm de espesor; así sucesivamente hasta llegar a 30 µm de espesor de la lámina delgada. Se acaba el proceso con un pulido mecánico, mediante una máquina pulidora (KNUTH-ROTOR 2, Struers, Erkrath, Alemania) y un desbastado a mano. Por último, las muestras se someten a una tinción selectiva en carbonatos (Alizarina roja-S + Ferricianuro potásico) (Lindholm, C. *et al.*, 1972), para facilitar la identificación de los minerales carbonatados. Las diferentes coloraciones resultantes se exponen en la tabla siguiente (Tabla 8):

Tabla 8. Tabla de identificación del teñido de minerales carbonáticos (Gómez-Gras, D., 1999)

<b>MINERAL</b>	<b>COLOR TEÑIDO CON ALIZARINA ROJA-S</b>	<b>COLOR TENIDO CON FERRICIANURO POTÁSICO</b>	<b>COMBINACIÓN RESULTANTE EN LA LÁMINA DELGADA</b>
calcita	de rosa a rojo	-----	<b>de rosa a rojo</b>
calcita ferrosa	de rosa a rojo	de azul claro a oscuro según el contenido en hierro	<b>de violeta a azul</b>
dolomita	-----	-----	<b>sin color</b>
dolomita ferrosa (ankerita)	-----	de azul muy claro	<b>de azul muy claro (turquesa)</b>
siderita	-----	de azul oscuro a marrón	<b>de azul oscuro a marrón</b>

### *Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX)*

El análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) se realiza con un microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-6300 (Jeol LTD. Tokio, Japan). Resolución 3.5 nm. Aumentos 20-20000X. Voltaje de aceleración 0.5-30 kV; intensidad de corriente  $2 \times 10^{-9}$  A.; distancia de trabajo 15 mm. Portamuestras 200 mm diam. max. Fotografía negativa (6x7) e imagen digital. Adherido a un sistema de microanálisis: un espectrómetro de energía dispersiva (EDX) LINK ISIS-200 (Oxford Instrumentos. Bucks, England). Detección desde el boro hasta el uranio. Resolución 138 ev. Análisis cualitativo y semiquantitativo. Mapas de elementos. Se parte de las secciones estratigráficas confeccionadas para la observación microscópica de las muestras a través de la lupa estereoscópica. Las muestras se recubren con carbono para eliminar los efectos de carga. El análisis elemental se realiza en paralelo con el examen morfológico de las muestras. El análisis cualitativo se realiza de manera puntual, a partir de *linescan* y *mapping*. El microanálisis cuantitativo se lleva a cabo usando el método ZAF, que se basa en *la corrección de la matriz de efecto multi-elemental* que tiene lugar en la determinación simultánea de la concentración de cada elemento presente en un material multi-elemental. Este método teórico proporciona una corrección de la intensidad de los rayos-x de cada elemento presente en el material mediante la aplicación de una serie de factores de corrección para el efecto de número atómico (que describe la profundidad de penetración de electrones y la fracción de electrones que retrodispersan de la muestra), la corrección de absorción (que describe la absorción de los rayos-x en la matriz como función de la composición y la profundidad de penetración de los electrones) y la corrección de fluorescencia (que describe la fluorescencia secundaria de un elemento por la de los otros presentes). En esta investigación, el tiempo de contaje ha sido 100 s por los elementos mayores y menores. Los estándares utilizados han sido los siguientes minerales: albita (Na), MgO (Mg), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Al), cuarzo (Si), GaP (P), FeS<sub>2</sub> (S), MAD-10 feldespato (K), Fe (Fe), Mn (Mn), wollastonita (Ca), Ti (Ti), PbF<sub>2</sub> (Pb), Zr (Zr), Cr (Cr), Ni (Ni), V (V), Cu (Cu), Ag (Ag), Hg (HgTe), Ba (BaF<sub>2</sub>). Las concentraciones se han calculado por estequiometría de porcentajes de elementos generados por el software ZAF (Oxford-Link-Isis EDX instrumento).

La composición química media de las muestras que están compuestas por varias fases minerales microcristalinas, se corresponde con el valor medio obtenido a partir de mediciones cuantitativas por triplicado de un área de la muestra, de unas 100  $\mu\text{m}^2$  de superficie. En paralelo, se realizan mediciones puntuales cuantitativas sobre la superficie de los granos y agregados

individuales, los cuales proporcionan la composición química de las diferentes fases mineralógicas contenidas en la muestra. La precisión de las mediciones se da mediante la desviación estándar. El límite de detección de los elementos estudiados es de 0,01%.

#### *Difractometría de rayos-X (DRX)*

La difracción de rayos-x se lleva a cabo a partir de un difractómetro de rayos-x BRUKER AXS D5005 (Bruker AXS, Germany). Radiación Cu K $\alpha$  (40 kV y 40 mA), monocromador de haz difractado, detector contador de centelleo. Este aparato dispone de portamuestras automático que permite realizar análisis de rutina hasta un total de 40 muestras, grietas automáticas; y portamuestras giratorio (15-120 rpm.). Los patrones de difracción se recogen cubriendo 5-80° 2 $\theta$  con un tiempo de exposición de 0,8 s. Programa Diffrac Plus 5.0 para el procesamiento de datos. La preparación de las muestras consiste en pulverizarlas y, posteriormente, colocar estas en el portamuestras del aparato perfectamente compactas con una superficie llana.

#### *Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)*

El análisis por espectroscopía de infrarrojo se realiza con un espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier VERTEX 70 (Bruker Optics) con un sistema de reflexión atenuada (ATR) y con un detector FR-DTGS con recubrimiento para estabilizar la temperatura. Número de rastreo acumulados: 32; resolución: 4 cm<sup>-1</sup>. Software OPUS. Para tal finalidad, las muestras seleccionadas se deben moler hasta conseguir pulverizarlas.

### **1.1.2.4. Pretratamiento de las capas de preparación de los estucos para la identificación de las arcillas y la instrumentación específica empleada**

#### **1.1.2.4.1. Determinación del porcentaje de residuo insoluble del mortero de cal mediante ataque ácido**

La metodología analítica más simple propone la disolución de la muestra en un ácido, habitualmente ácido clorhídrico, a concentraciones y a temperaturas varias según los autores (Álvarez, J.Y. *et al.*, 1999 y 2006; Montoya, C. *et al.*, 2004). Según el estudio realizado por Álvarez *et al.* (1999), en el que compara

la determinación del porcentaje de residuo insoluble en ácido clorhídrico (1:5), en caliente y en frío, para morteros de cal, este determina que el ataque caliente<sup>102</sup> es más eficaz que el ataque a temperatura ambiente para disolver la fase conglomerante del mortero. Aun así, también comenta que, si se cree en la posibilidad de la presencia, a la fase conglomerante del mortero, de ciertos silicatos hidráulicos es mejor optar por el método en frío. Por este motivo, en esta investigación se opta para realizar el método en frío y establecer una modificación del método, tal como se esquematiza en la tabla 9.

Tabla 9. Etapas de pretratamiento de las capas de preparación de los estucos seleccionados Álvarez, J.I. *et al.*, 2006; Alonso, J., 2009)

Etapa	DENOMINACIÓN	PROCEDIMIENTO
1	Condicionamiento de la muestra	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Separación mecánica del conglomerante del mortero de cal: disgregación manual, no molida.</li> <li>- Tamizar la muestra obtenida con el tamiz de malla &lt; 63 micras.</li> <li>- Llevar a sequedad en la estufa (60 °C) hasta peso constante.</li> </ul>
2	Ataque ácido	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Separación de mg (entre 50-500 mg) de muestra<sup>103</sup>.</li> <li>- Añadir 25 ml de disolución d'HCl (1:3) 12M, manteniendo la agitación durante 30 minutos.</li> <li>- Al cabo de este período de tiempo, los carbonatos reaccionan en su totalidad con el ácido, transformándose en CO<sub>2</sub>, que se desprende produciendo una característica efervescencia. Cuando disminuya la efervescencia añadir un poco más de ácido, hasta que la reacción se termine (Alonso, J., 2009).</li> <li>- Finalizada la reacción, comprobar que el medio es ácido con un papel indicador o por no presentar efervescencia al añadir unas gotas más de ácido (Alonso, J., 2009).</li> </ul>
3	Separación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Después, se filtra el residuo a través de un papel de filtro y se neutraliza con H<sub>2</sub>O desionizada.</li> <li>- El conjunto resultante (residuo insoluble+filtro) se lleva a sequedad en la estufa (60 °C) hasta peso constante. Dejar que se enfríe.</li> </ul>
4	Cálculos	<p>% Residuo insoluble = <math>(c-c')/m \times 100</math>, donde: c: peso del filtro con residuo insoluble; c': peso del filtro (tara); m: peso inicial de la muestra en gr (Álvarez, J.I. <i>et al.</i>, 2006)</p>

<sup>102</sup> Digestión al baño maría (80 °C) durante 30 minutos y posterior agitación mecánica de la suspensión resultante durante 5 minutos (Álvarez, J.I. *et al.*, 2006).

<sup>103</sup> Al tratarse de muestras arqueológicas, el tamaño de la muestra es muy pequeña. Esto hace que el volumen de muestra disponible sea aleatorio y haya una alta dispersión de cantidad de muestra para realizar el ataque ácido.

#### 1.1.2.4.2. Instrumentación específica para el estudio de las arcillas presentes en los estucos

##### *Microdifracción de rayos-x ( $\mu$ -DRX)*

El análisis por microdifracción de rayos-x se realiza con un difractómetro Bruker-AXS D8-Discover. Equipado con haz incidente paralelo (*Göbel mirror*), un goniómetro vertical  $\theta$ - $\theta$ , una etapa motorizada XYZ y un GADDS (*General Área Diffraction System*). Las muestras se colocan directamente en el soporte de la muestra y el área de interés se selecciona con la ayuda de un sistema de enfoque de vídeo-láser. Un sistema colimador de rayos-x permite analizar áreas de 500  $\mu\text{m}$ . El difractómetro de rayos-x funciona a 40 kV y 40 mA para generar la radiación  $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ . El detector GADDS es 30x30 cm con un sensor CCD de 1024x1024 píxeles. Se recogen *frames* (patrones de DRX 2D) que cubren 23-77° 2 $\theta$  desde dos posiciones diferentes del detector, a una distancia de 15 cm de la muestra. El tiempo de exposición es 300 s por *frame* y se integra para generar la 2 $\theta$  convencional vs. la intensidad del difractograma. La identificación de los minerales se consigue mediante la comparación del difractograma de la DRX con la base de datos ICDD (versión 2007) utilizando el software Diffraction Plus Evaluation (Bruker 2007). Escala de la imagen: pequeñas líneas de separación corresponden a  $\approx 100 \mu\text{m}$ .

##### *Microscopía electrónica de transmisión (MET)*

El análisis por microscopía electrónica de transmisión se realiza con un microscopio electrónico de transmisión, Philips CM10 (FEI, OLYMPUS) con una cámara de visión Keen y un sistema de imagen suave, que se utiliza operando a 100 kV. Para la observación de las muestras obtenidas, se separan pocos microgramos de muestra y se diluyen en 2 gotas de disolvente orgánico, en este caso dicloroetano. A continuación, se busca la máxima dispersión sumergiendo la solución en un baño de ultrasonidos, 30 s<sup>104</sup>. Transcurridos estos segundos, se deposita 1 gota de solución dispersa sobre una rejilla MET<sup>105</sup>. Finalmente, la muestra de solución dispersa se lleva a sequedad bajo una luz infrarroja y ya está lista para ser observada por MET.

---

<sup>104</sup> Más de 30 s no es recomendable, puesto que al tratarse de minerales arcillosos, estos se vuelven a hinchar con la temperatura desprendida del baño de ultrasonidos.

<sup>105</sup> Tratada previamente con una capa de polímero con orificios, para mejorar las imágenes obtenidas.

A continuación, se presentan dos tablas resumen donde se relacionan las muestras estudiadas con las técnicas instrumentales de análisis utilizadas en esta investigación. Primero, las muestras de las materias primas del entorno geológico estudiadas (Tabla 10) y, seguidamente, las muestras de las capas de preparación de los estucos de los sitios arqueológicos seleccionados (Tabla 11):

Tabla 10. Tabla resumen de las muestras de las materias primas estudiadas relacionadas con las técnicas instrumentales de análisis que se han utilizado en esta investigación. Acrónimos: REF.: referencia de las muestras de las materias primas

<b>REF.</b>	<b>MO</b>	<b>MOP</b>	<b>DRX</b>	<b>FT-IR</b>
<b>P1</b>	+	+	-	-
<b>P2</b>	+	+	-	-
<b>P3</b>	+	+	-	-
<b>S1</b>	+	+	-	-
<b>C1-1</b>	+	-	-	-
<b>C1-1</b>	+	-	+	+
<b>C1-2</b>	+	-	+	+
<b>C1-3</b>	+	-	+	+
<b>C1-19</b>	+	-	+	+
<b>C1-33</b>	+	-	+	+
<b>C1-34</b>	+	-	+	+
<b>C1-35</b>	+	-	+	+
<b>C1-36</b>	+	-	+	+
<b>C1-37</b>	+	-	+	+
<b>C2-7</b>	+	-	+	+
<b>C3-18</b>	+	-	+	+

Tabla 11. Tabla resumen de las muestras de las capas de preparación de los estucos de los sitios arqueológicos estudiados relacionados con las técnicas instrumentales de análisis y los estudios que se utilizan en el apartado 1.1.3 de esta investigación. Acrónimos: REF.: referencia de las muestras de las capas de preparación de los estucos; ORG: descripción organoléptica; MO: estudio estratigráfico mediante la microscopía óptica; GRA: estudio granulométrico; HCl: determinación del porcentaje de residuo insoluble del mortero de cal mediante ataque ácido

REF.	ORG	MO	GRA	MOP	DRX	SEM	HCl	μDRX	TEM
SR-7	+	+	-	-	-	-	-	-	-
SR-en	+	+	-	+	+	+	+	+	+
ET-2A	+	+	-	-	+	+	+	+	+
ET-9B	+	+	-	+	+	-	+	+	-
ET-9/7	+	+	-	-	+	-	+	-	-
DZ-2	+	+	-	+	+	+	+	+	+
CH-en/mo	+	+	-	+	+	+	+	+	+
DL-mo/en	+	+	-	+	+	+	+	+	+
MU-6	+	+	-	+	+	+	+	+	+
MU-7	+	+	-	-	+	-	+	-	-
MU-8A	+	+	-	-	-	-	-	-	-
MU-9A	+	+	-	-	-	-	-	-	-
EB-mo	-	-	+	-	+	-	+	+	-
EB-2	+	+	-	+	+	-	+	+	+
EB-3	-	-	+	-	+	-	+	+	-
EB-5A	+	+	-	-	+	+	+	-	-
EB-7	+	+	-	-	+	-	+	-	-
CI-2	+	+	-	+	+	-	+	+	+
CI-2D	-	-	-	-	+	-	+	-	-
CI-7	+	+	-	-	-	+	-	-	-
CI-8B	-	-	-	-	+	-	+	-	-
CI-9A	+	+	-	-	-	-	-	-	-
KU-3	+	+	+	-	+	-	+	+	+
KU-5	+	+	+	-	+	-	+	+	-
KU-7	+	+	-	+	-	+	+	-	-
AC-1	+	+	+	+	+	+	+	+	-
AC-2	-	-	+	-	+	-	+	+	+
AC-7/7A	+	+	-	-	+	-	+	-	-
AC-9	+	+	-	-	+	-	-	-	-



### **1.1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **1.1.3.1. Caracterización de las materias primas del entorno geológico**

##### **1.1.3.1.1. Materias primas de la cal y del árido**

###### **1.1.3.1.1.1. Descripción de las características morfológicas y de las texturas petrográficas de las materias primas**

Con el propósito de caracterizar morfológica y petrográficamente las materias primas de las áreas arqueológicas se ha llevado a cabo un estudio mediante, la microscopía óptica, de sus muestras de mano y la microscopía óptica de polarización, de sus correspondientes láminas delgadas. Para esto, se han extraído fragmentos representativos de las mismas.

Primeramente, las muestras de mano de las materias primas se han descrito mediante una lupa estereoscópica, con la finalidad de determinar sus características morfológicas: la textura, la tonalidad, el hábito, el tamaño y la distribución de los granos, etc. En segundo lugar, las láminas delgadas obtenidas se han caracterizado mediante un microscopio óptico de polarización, con la finalidad de determinar sus características petrográficas. Este estudio nos permite observar sus componentes texturales, como los granos, la matriz, el cemento y la porosidad, y, también, permite clasificar e interpretar el material pétreo.

Para la descripción morfológica y petrográfica se ha definido un modelo de ficha con los siguientes campos (Gómez-Gras, D., 1999 modificada por el autor): referencia de la materia prima (codificación de la muestra); lugar de explotación (especifica la cantera o la *sascabera* de explotación); microfotografías, mediante las técnicas instrumentales de análisis ya presentadas (la microscopía óptica (MO) y la microscopía óptica de polarización (MOP)); características morfológicas: la textura, la tonalidad, el hábito, el tamaño y la distribución de los granos. En este campo se hace una aproximación a la clasificación de la muestra de mano a partir de la que propone Pettijohn, H. (1957) de acuerdo con los procesos generadores del material pétreo; componentes texturales: granos (esqueléticos, no-esqueléticos), matriz (composición y tamaño de grano), cemento (producto de la precipitación química de las especies minerales), porosidad (parámetro que mide los espacios vacíos del material pétreo); clasificación textural, de acuerdo con la textura deposicional (Dunham, J., 1962 ampliada por Embry, A. F. *et al.*, 1971) y de acuerdo con su maduración textural (Folk, L., 1959 y 1962).

A continuación, se presentan las fichas morfológicas y petrográficas confeccionadas para cada una de la materia prima seleccionada.

<b>Referencia materia prima</b>	<b>material pétreo (P1)</b>
<b>Lugar de explotación</b>	cantera situada en la periferia del sitio arqueológico de <i>Chacmultún</i> (estado de Yucatán)

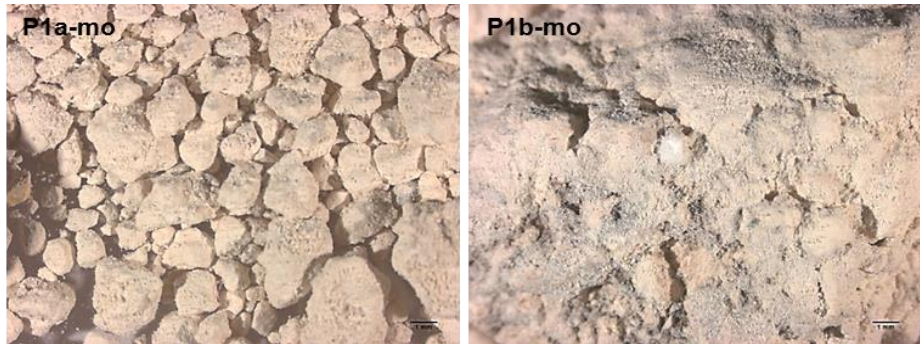
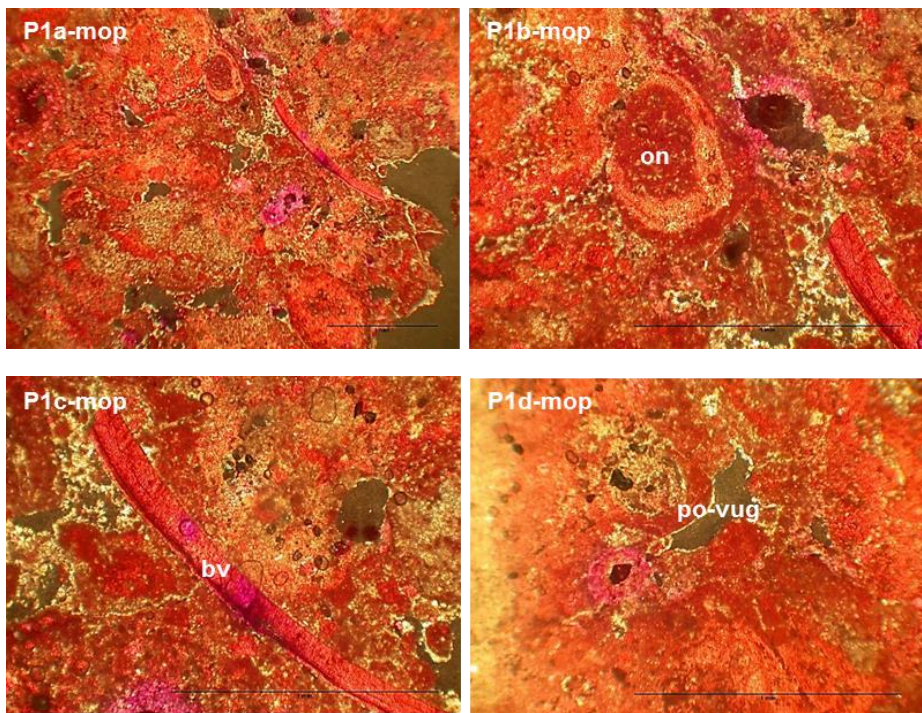


Figura 29. Microfotografías MO (P1), de izquierda a derecha, P1a-mo: (0,8x); P1b-mo: (0,8x)

<b>Características morfológicas</b>	material pétreo con clastos detríticos, de tonalidad blanquecina-grisácea.	
	<b>Pettijohn (1957)</b>	calcarenita de grano grueso



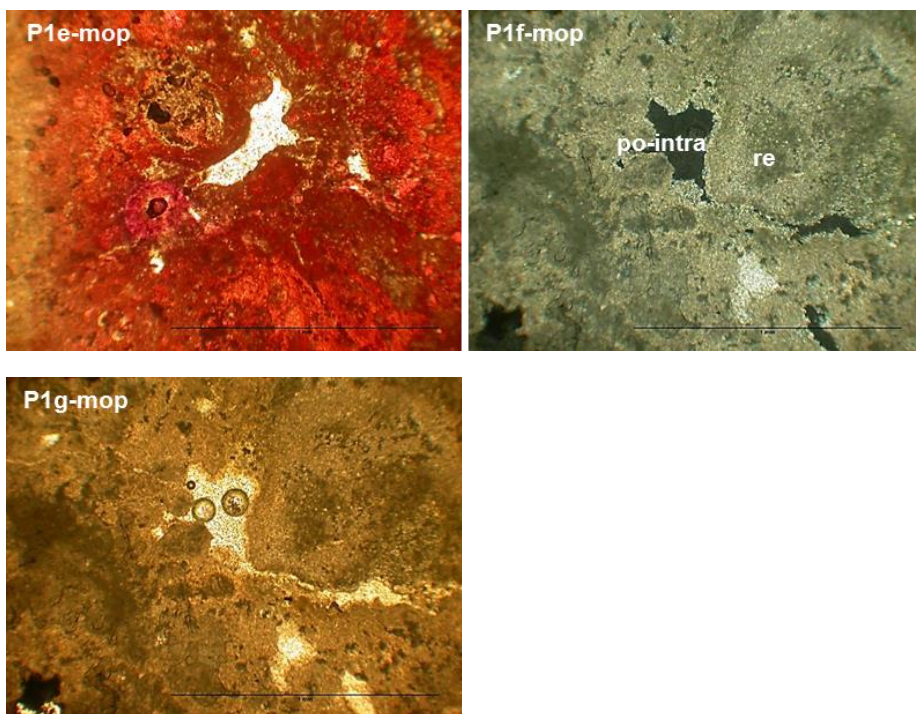


Figura 30. Microfotografías MOP (P1) (tinción selectiva en carbonatos: Alizarina roja-S + ferricianuro potásico), de izquierda a derecha y de arriba abajo, P1a-mop: visión genérica (4x, NC); P1b-mop: oncoide extraclasto (on) (10x, NC); P1c-mop: fragmento de bivalvo (bv) (10x, NC); P1d-mop: porosidad vug (po-vug) (10x, NC); P1b-mop: P1d-mop amb NP (10x, NP); P1f-mop: estructura relictas (rel) y porosidad intraclasto (po-intra) (10x, NC); P1g-mop: P1f-mop con NP (10x, NP)

<b>Componentes texturales</b>	<b>esqueléticos</b>	oncoides (envueltas de carbonato de calcio de crecimiento algal), fragmento de molusco (bivalvo); perforaciones de bioturbación que provocan aureolas de descalcificación (calcita ferrosa); se observan estructuras relictas por presencia de organismos que se han micritizado diagenéticamente.
	<b>no esqueléticos</b>	se puede observar algún nódulo ferruginoso con componentes arcillosos.
<b>Matriz</b>	carbonatada de tamaño microesparítica (4-16 $\mu\text{m}$ ) y micrítica (< 4 $\mu\text{m}$ )	
<b>Cemento</b>	microesparítico de tipo <i>drusy</i> . En las esquinas de los poros se produce un revestimiento de cemento microesparítico.	
<b>Porosidad</b>	porosidad <i>vug</i> (de disolución diagenética); porosidad intraclasto	
<b>Clasificación textural</b>	<b>Dunham (1962)</b>	<i>wackestone</i>
	<b>Folk (1962)</b>	biomicrita



<b>Referencia materia prima</b>	<b>material pétreo (P2)</b>
<b>Lugar de explotación</b>	cantera situada en la periferia del sitio arqueológico de <i>Santa Rosa Xtampak</i> (estado de Campeche).

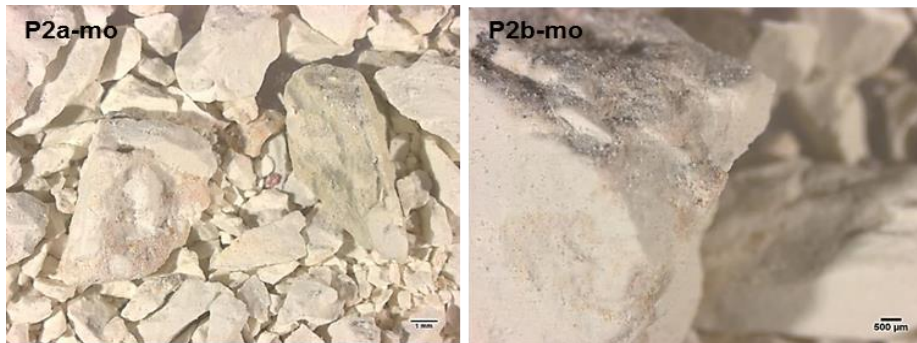


Figura 31. Microfotografías MO (P2), de izquierda a derecha, P2a-mo: (0,8x); P2b-mo: (1,25x)

<b>Características morfológicas</b>	material mixto arcilloso-carbonatado, de color blanco con bandeados verdosos y rojizos.
	<b>Pettijohn (1957)</b>   arcillita silicificada

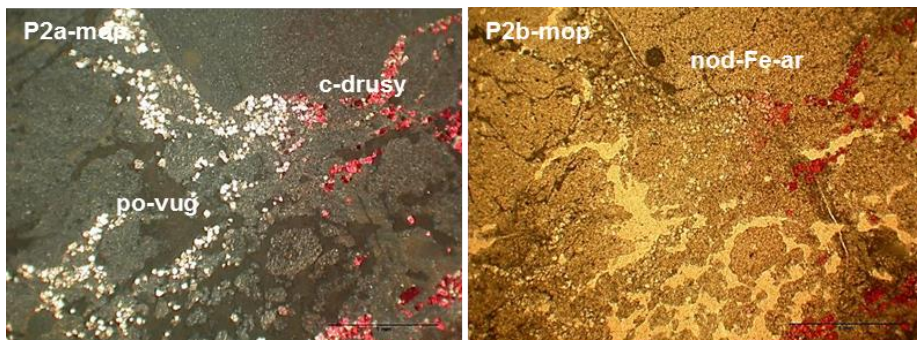


Figura 32. Microfotografías MOP (P2) (tinción selectiva en carbonatos: Alizarina roja-S + ferricianuro potásico), de izquierda a derecha, P2a-mop: visión genérica, porosidad tipo vug (po-vug) y cemento tipo drusy (c-drusy) (4x, NC); P2b-mop: P2a-mop con NP (4x, NP)

<b>Componentes texturales</b>	<b>esqueléticos</b>	no se observan
	<b>no esqueléticos</b>	se puede observar algún nódulo ferruginoso con componentes arcillosos de tamaño $\leq 100 \mu\text{m}$ .
<b>Matriz</b>	minerales de las arcillas y silícicos, criptocristalinos	
<b>Cemento</b>	cristales de calcita esparítica que rellenan una porosidad de disolución, posiblemente de tipo kárstico, o de una fracción orgánica dispersa en el sedimento original.	
<b>Porosidad</b>	porosidad <i>vug</i> (de disolución diagenética)	
<b>Clasificación textural</b>	<b>Dunham (1962)</b>	-----
	<b>Folk (1962)</b>	-----

<b>Referencia materia prima</b>	<b>material pétreo (P3)</b>
<b>Lugar de explotación</b>	cantera asociada al sitio arqueológico de <i>Katjún</i> (cerca de la localidad de <i>Xpujil</i> , estado de Campeche).

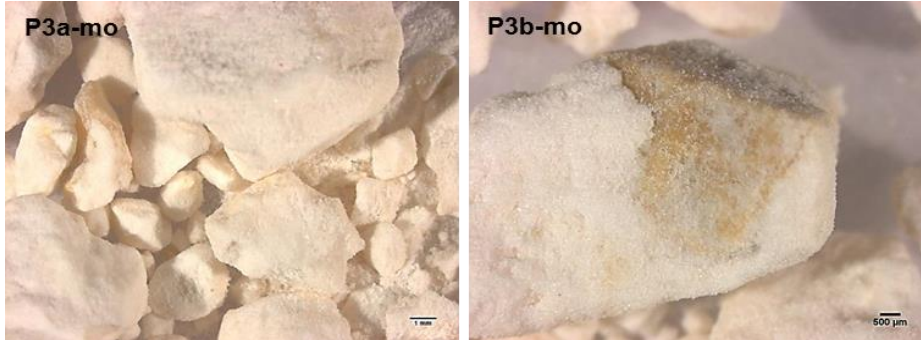
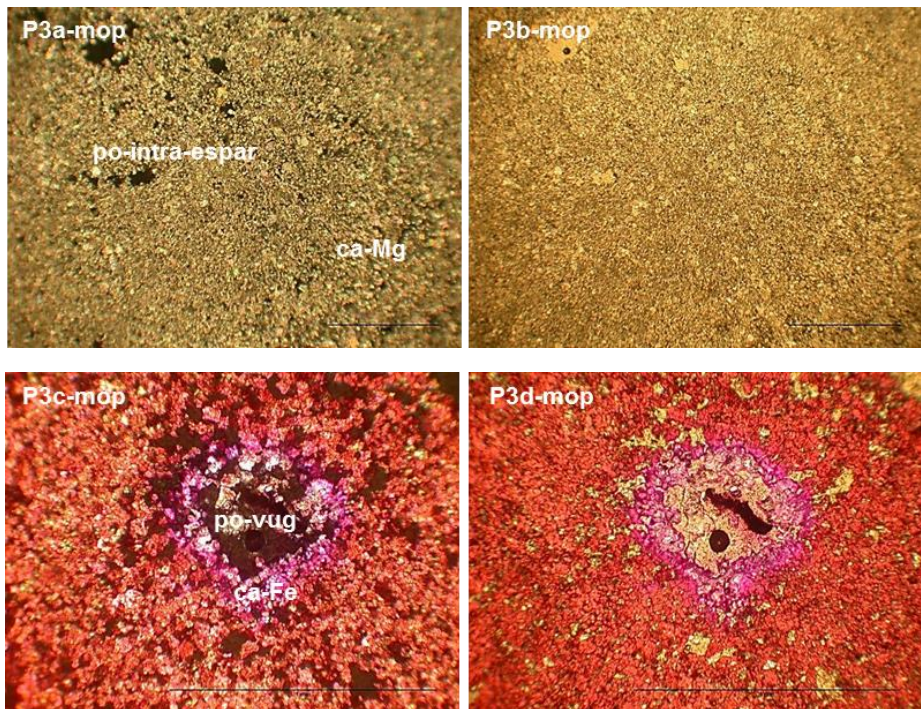


Figura 33. Microfotografías MO (P3), de izquierda a derecha, P3a-mo: (0,8x); P3b-mo: (1,25x)

<b>Características morfológicas</b>	material calcáreo arenoso de grano fino (< 0,125 mm) con trozos de rizocreaciones (marcas de raíces de una planta), de tonalidad blanquecina-amarillenta.
	<b>Pettijohn (1957)</b>   calcarenita de grano fino





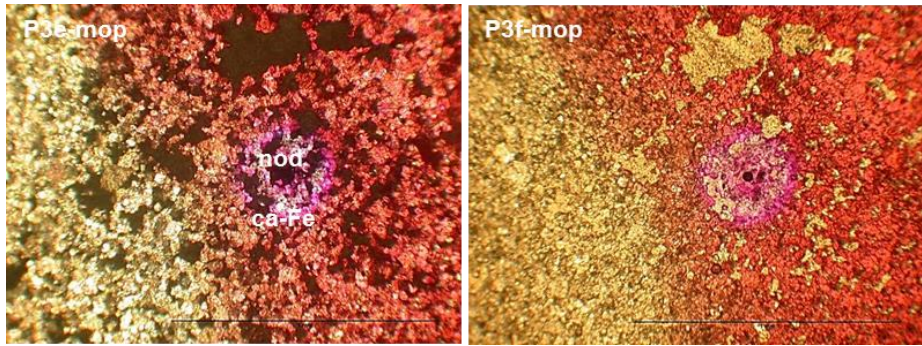


Figura 34. Microfotografías MOP (P3) (tinción selectiva en carbonatos: Alizarina roja-S + ferricianuro potásico), de izquierda a derecha y de arriba abajo, P3a-mop: visión genérica con cristales de calcita magnesiana (ca-Mg) con colores de interferencia de tercer orden (Michel-Lévy Color Chart) y porosidad intraesparítica (po-intra-espar) (4x, NC); P3b-mop: P3a-mop con NP (4x, NP); P3c-mop: porosidad tipo vug (po-vug) rodeada por calcita ferrosa (último estadio de precipitación) (ca-Fe) (10x, NC); P3d-mop: P3a-mop con NP (10x, NP); P3e-mop: nódulo (nod) provocado por una raíz de planta relleno por calcita ferrosa (ca-Fe) (10x, NC); P3f-mop: P3e-mop con NP (10x, NP)

<b>Componentes texturales</b>	<b>esqueléticos</b>	no se observan
	<b>no esqueléticos</b>	nódulos rellenos de esparita recristalizada y pequeños nódulos arcillo-ferrosos que provienen de las rizocreaciones (marcas de raíces de planta) o de las perforaciones por bioturbación.
<b>Matriz</b>	carbonatada de tamaño esparítica (> 16 µm)	
<b>Cemento</b>	esparítico de tipo <i>blocky</i> que corresponde a una fase de cimentación diagenética que ha transformado un sedimento micrítico original	
<b>Porosidad</b>	porosidad <i>vug</i> (de disolución diagenética); porosidad intraesparítica	
<b>Clasificación textural</b>	<b>Dunham (1962)</b>	<i>wackestone-packstone</i>
	<b>Folk (1962)</b>	bioesparita

<b>Referencia materia prima</b>	<b>material pétreo (S1)</b>
<b>Lugar de explotación</b>	sascabera del entorno del sitio arqueológico de <i>Acanceh</i> (estado de Yucatán).

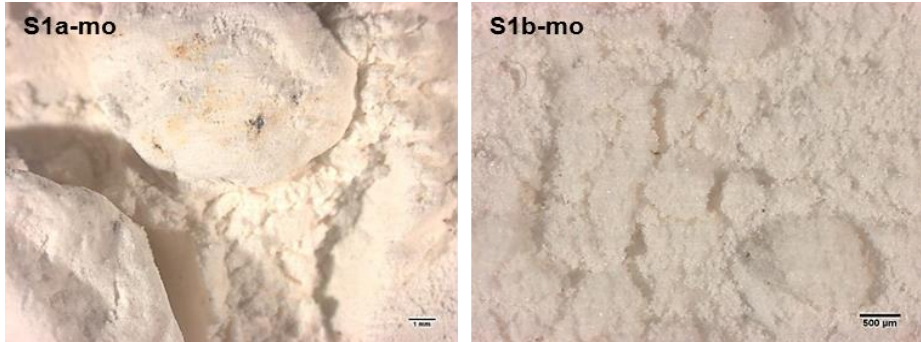
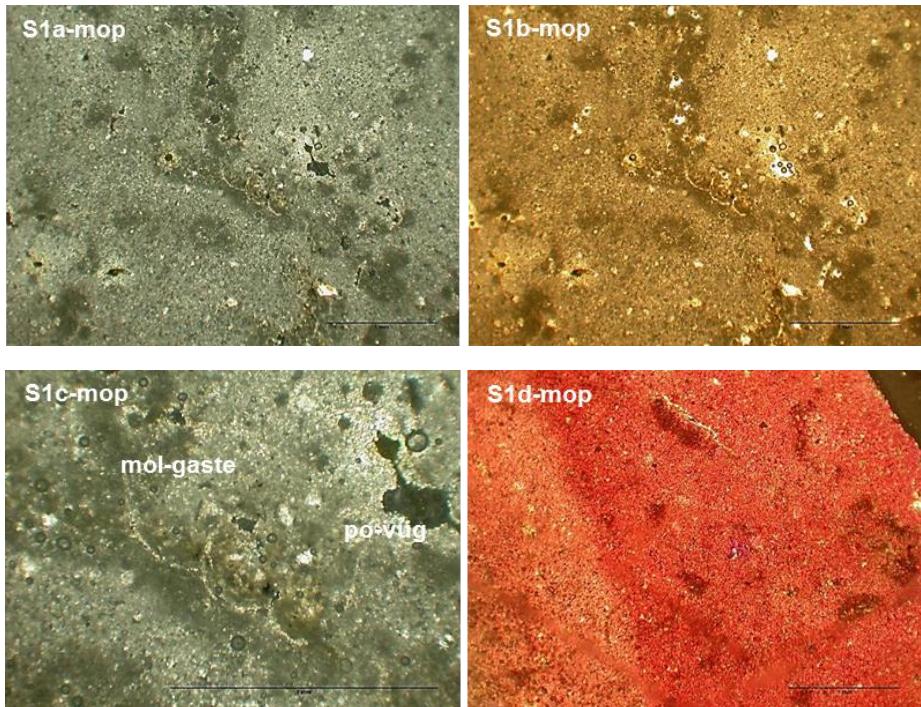


Figura 35. Microfotografías MO (S1), de izquierda a derecha, S1a-mo: (0,8x); S1b-mo (1,25x)

<b>Características morfológicas</b>	material calcáreo limo-arenoso de grano fino-medio (rango 250-125 µm) con restos de fósiles, cristales de cuarzo y una pequeña proporción de materiales arcillosos de diferente naturaleza, de tonalidad blanquecina-amarillenta.
	<b>Pettijohn (1957)</b>   calcarenita de grano fino



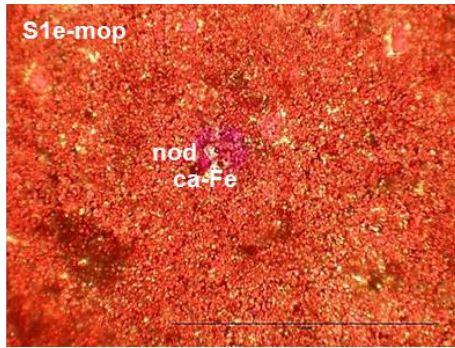


Figura 36. Microfotografías MOP (S1) (tinción selectiva en carbonatos: Alizarina roja-S + ferricianuro potásico), de izquierda a derecha y de arriba abajo, S1a-mop: visión genérica (4x, NC); S1b-mop: S1a-mop con NP (4x, NP); S1c-mop: molde de gasterópodo (mol-gaste) y porosidad tipo vug (po-vug) (10x, NC); S1d-mop: visión genérica (4x, NC); S1e-mop: nódulo (nod) provocado por una raíz de planta relleno por calcita ferrosa (ca-Fe) (ca-Fe) (10x, NP)

<b>Componentes texturales</b>	<b>esqueléticos</b>	se observa un molde de molusco (gasterópodo).
	<b>no esqueléticos</b>	nódulos rellenos de esparita recristalizada y pequeños nódulos arcillo-ferrosos que provienen de las rizocreciones (marcas de raíces de planta) o de las perforaciones por bioturbación; cristales de cuarzo.
<b>Matriz</b>	carbonatada de tamaño esparítica (> 16 μm)	
<b>Cemento</b>	esparítico que corresponde a una fase de cimentación diagenética que ha transformado parcialmente un sedimento micrítico-arcilloso original; además, se observa una segunda fase de cemento esparítico que rellena las paredes de los poros.	
<b>Porosidad</b>	porosidad <i>vug</i> (de disolución diagenética); porosidad intraesparítica	
<b>Clasificación textural</b>	<b>Dunham (1962)</b>	<i>wackestone-packstone</i>
	<b>Folk (1962)</b>	bioesparita



A partir de la caracterización morfológica y petrográfica de las materias primas de las áreas arqueológicas estudiadas se puede establecer un esquema resumen de los resultados analíticos, como el que sigue a continuación (Tabla 12):

Tabla 12. Tabla resumen de los resultados de la descripción morfológica y la caracterización petrográfica de las materias primas del entorno geológico. Acrónimos: R.M: referencia muestra; GRANU.; granulometría; P1: material pétreo de la cantera situada en la periferia del sitio arqueológico de *Chacmultún* (estado de Yucatán); P2: material pétreo de la cantera situada en la periferia del sitio arqueológico de *Santa Rosa Xtampak* (estado de Campeche); P3: material pétreo de la cantera asociada al sitio arqueológico de *Katjún* (cerca de la localidad de *Xpujil*, estado de Campeche); S1: material pétreo de la *sascabera* del entorno del sitio arqueológico de *Acanceh* (estado de Yucatán)

R.M	DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA			CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA	
	TONALIDAD	GRANU.	PETTIJOHN (1957)	DUNHAM (1962)	FOLK (1962)
P1	blanquecina-grisácea	gruesa	calcarenita de grano grueso	<i>wackestone</i>	biomicrita
P2	blanca con bandeados verdosos-rojizos	limo-arcillosa	arcillita silicificada	----	----
P3	blanquecina-amarillenta	fina	calcarenita de grano fino	<i>wackestone-packstone</i>	bioesparita
S1	blanquecina-amarillenta	fina-mediana	calcarenita de grano fino	<i>wackestone-packstone</i>	bioesparita

La descripción morfológica de las muestras de mano de la materia prima estudiada nos permite clasificarla según Pettijohn, H. (1957) como CALCARENITAS DE GRANO GRUESO (de 500  $\mu\text{m}$  a 1 mm), la muestra P1 y como CALCARENITAS DE GRANO FINO (de 125  $\mu\text{m}$  a 250  $\mu\text{m}$ ), las muestras P3 y S1. Esta terminología nos aporta una información sobre el proceso de génesis del material (Pettijohn, H., 1957). En este caso, nos informa que esta materia prima forma parte del grupo de las CALCÁREAS II, materiales generados por procesos mecánicos (fragmentación, transporte). En cambio, la muestra P2 es diferente de las otras, originalmente es un sedimento de carácter mixto, formado por minerales de las arcillas y carbonatos, que ha pasado por un proceso diagenético intenso de silicificación y, una posterior disolución kárstica ha permitido la infiltración y/o precipitación de cristales de calcita esparítica.

La caracterización petrográfica de las láminas delgadas P1, P3 y S1 de la materia prima estudiada nos permite clasificarla, por una parte, según la clasificación de Folk, L. (1959, 1962), en primer lugar, como ROCAS CALIZAS ALOQUÍMICAS (con >10% de grandes), ya que Folk establece una clasificación de las rocas calizas teniendo en cuenta las proporciones relativas de los tres constituyentes básicos del material. Por este motivo, la muestra P2 no se puede clasificar según esta clasificación, ya que no es una roca caliza. En segundo lugar, nos permite subdividir las muestras en dos subgrupos: la muestra P1, que se puede clasificar como roca caliza micrítica (espacio intergranular ocupado mayoritariamente por micrita) con bioclastos - BIOMICRITA-; y las muestras P3 y S1, que se pueden clasificar como rocas calizas esparíticas (espacio intergranular ocupado mayoritariamente por esparita) con bioclastos -BIOESPARITA-.

Por otra parte, la clasificación de Dunham, J. (1962), ampliada por Embry, F. *et al.* (1971), también nos aporta una cierta diferenciación entre el material pétreo calcáreo estudiado. En este caso, toda la materia prima estudiada, menos la muestra P2, forma parte del grupo de carbonatos con textura deposicional reconocible. Concretamente, a uno de los subgrupos que determina Dunham: *WACKESTONE*, material de textura matriz-soportada con matriz micrítica y con más del 10% de granos, para la muestra P1. Aun así, las muestras P3 y S1, están definidas como *WACKESTONE-PACKSTONE*, es decir, un material que se encuentra entre una textura matriz-soportada y una textura grano-suportada con matriz micrítica.

Además, para acabar de afinar la clasificación de las muestras de materia prima estudiadas, hay que recurrir a dos clasificaciones más para poder denominarlas correctamente: la primera es la clasificación a partir del rango composicional entre calcita y dolomita, que nos permite cuantificar la dolomitización del material pétreo a través del porcentaje de óxido de magnesio (MgO) con respecto al de óxido de calcio (CaO); la segunda es la clasificación de las rocas intermedias o mixtas (Vatán, A., 1967), que estudia la presencia de material detrítico arcilloso ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que acompaña las rocas calizas. Por este hecho, se ha realizado la composición elemental de las muestras a partir de la microanálisis de rayos-x, mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX). Los resultados obtenidos se muestran en valores medios de concentración para cada elemento expresados como porcentaje de óxidos ( $\text{mm}^{-1}$ ) y la desviación estándar correspondiente, tal como se muestra en la tabla 13.

Por un lado, el análisis porcentual confirma que el reemplazo de calcita (a través del %CaO) por dolomita (a través del %MgO) no se está efectuando en ningún caso de las muestras de materia prima estudiadas. Por tanto, la denominación de estos materiales según la clasificación del rango composicional entre calcita y dolomita es ROCA CALIZA (< 10% de dolomita). Por otra lado, el análisis porcentual confirma la presencia de minerales arcillosos (a través de la suma del %SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), en diferentes proporciones, de todas las muestras de materia prima estudiadas. Por lo tanto, la denominación de estos materiales según la clasificación de las rocas intermedias o mixtas (Vatán, A., 1967) es diferente en cada muestra estudiada: ROCA CALIZA, para la muestra S1, ya que el rango porcentual para esta denominación oscila de 0-5%; ROCA CALIZA DÉBILMENTE MARGOSA, para las muestras P1 y P3, ya que el rango porcentual para esta denominación oscila de 5-15%. Por lo que respecta a la muestra P2, el porcentaje de óxido de silicio (%SiO<sub>2</sub>) es de 63,42%. Este porcentaje supera cualquier valor teórico de minerales arcillosos (Palmorari, C. *et al.*, 1985). Por este motivo, se cree que este material se ha silicificado en algún momento de su historia geológica, por lo que, se propone denominarlo ARCILLITA CARBONATADA SILICIFICADA.

Tabla 13. Tabla de los valores medios de porcentaje de óxido y la seva desviación estándar (entre paréntesis) obtenidos por SEM-EDX de las muestras de materia prima estudiadas. Acrónimo: REF.: referencia de la materia prima

REF.	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Si <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
P1	-	1,08 (0,06)	1,30 (0,13)	4,81 (0,39)	-	92,42 (0,58)	-	0,39 (0,11)
P2	0,16 (0,06)	2,22 (0,06)	17,26 (0,42)	63,42 (1,88)	11,52 (0,15)	4,19 (2,64)	0,28 (0,04)	0,95 (0,13)
P3	-	0,89 (0,04)	2,64 (0,25)	7,23 (0,53)	0,69 (0,20)	88,55 (0,48)	-	-
S1	-	-	0,51 (0,05)	1,84 (0,40)	-	97,43 (0,35)	-	0,22 (0,04)

En resumen, teniendo en cuenta tanto las características morfológicas como el análisis porcentual de los óxidos anteriormente mencionados, las muestras de materia prima estudiadas se pueden denominar de la siguiente manera (Tabla 14):

Tabla 14. Denominación de las muestras de la materia prima estudiada, según las características morfológicas y el análisis porcentual de los óxidos

REF. MUESTRA	DENOMINACIÓN DE LA MATERIA PRIMA ESTUDIADA
P1	calcarenita débilmente margosa de grano grueso
P2	arcillita silicificada carbonatada
P3	calcarenita débilmente margosa de grano fino
S1	calcarenita de grano fino

### 1.1.3.1.1.2. Contextualización geológica de las materias primas estudiadas

Las muestras de materia prima de las áreas arqueológicas estudiadas no se correlacionan, ni con la cartografía geológica de la Península de Yucatán (*Carta Geológico-Minera. Estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Escalera 1:500.000. Servicio Geológico Mexicano, 2007 (SGM, 2007b)*), que se muestra en las figuras 7 y 10, ni con los litotipos que constituyen las unidades estratigráficas características de la zona de estudio, descritas en la tabla 1, de época del Paleoceno-Eoceno o de época del Plioceno-Mioceno, dependiendo de la zona de la Península de Yucatán<sup>106</sup> que se observa. La única excepción se puede atribuir a la muestra P2, la cual a partir de las descripciones petrográficas realizadas se denomina arcillita silicificada carbonatada y se puede correlacionar con la serie estratigráfica de la Fm. Icaiché, de época del Paleoceno.

Por una parte, las características morfológicas (la textura, la tonalidad, el hábito, el tamaño y la distribución de los granos) y las texturas petrográficas (la matriz, el cemento y la porosidad) de la mayoría de las muestras de materia prima estudiadas, se corresponden a las partes más externas del relieve o de la cobertura de la Península de Yucatán. Estos materiales pétreos se parecen sobre todo a las capas de sustrato rocoso descritas en los estudios realizados por Estrada-Medina, H. *et al.* (2008), donde se definen tres estratos superficiales de sustrato rocoso característicos de la zona, llamados localmente *laja* o *chaltún*, *sascab* y *coquina*; y, por otro lado, Cabadas, H. *et al.* (2010) realizan series estratigráficas de diferentes *sascaberas* de explotación, en el nordeste y en el noroeste de la Península de Yucatán (consultar las figuras 15 y 17). Estas series estratigráficas se corresponden a las facies litológicas del período del Cuaternario antiguo (época del Pleistoceno), excepto la muestra P2

<sup>106</sup> Punto desarrollado en profundidad en el subapartado *La estructura geológica de la península de Yucatán*.

ya mencionada, que en general, es un período que no se cartografía en las cartas geológicas, por diferentes motivos: debido a la escala de representación del mapa y porque, en estos tipos de representaciones cartográficas se acostumbra a representar el sustrato geológico del relieve no el de la cobertura. Así pues, a causa a las premisas mencionadas, en la cartografía geológica de la Península de Yucatán (SGM, 2007b)), el período del Cuaternario antiguo nada más queda cartografiado en el cordón litoral de la península.

Cuando menos, en algún caso, según la profundidad de explotación del material pétreo, se podían extraer fragmentos de roca del sustrato geológico estratigráficamente más antiguo, que se correspondería con las unidades estratigráficas descritas en la tabla 1, de edades paleocenas-eocenas o pliocenas-miocenas. Tal como queda reflejado, con frecuencia, en la composición mineral de los estucos mayas, caracterizados por diferentes autores a lo largo de los años 90 del s.XX y hasta el 2010 del s.XXI (Magaloni, D., 1996, 2001; Hansen, E., *et al.*, 1995, 1997, 2002; Mateos, F.Y., 1997; Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006 y 2010; García-Solís *et al.*, 2006; Goodall, À., *et al.* 2007; Villaseñor, I., *et al.*, 2008, 2009, 2010; Villaseñor, Y, 2010) y como se caracterizará más adelante en el apartado 1.1.3.2 (*Caracterización de los estucos de la pintura mural maya*).

Por otra parte, se puede hacer una correlación de las descripciones morfológicas de las muestras de materia prima estudiadas en esta investigación con los estudios de campo realizados por Duch (1988) en el estado de Yucatán, donde describe morfológicamente diferentes estratos de coraza calcárea exterior (*laja* o *chaltún*) y de *sascab*. En general, las muestras P1 y P3, se pueden correlacionar con los tipo de *laja*, descritos por él, la de tonalidad blanco-grisácea y la de tonalidad blanco-amarillenta, respectivamente (consultar la tabla 2); y, la muestra S1, se puede correlacionar con el *sascab* tipo 2, de tonalidad blanca a blanco-amarillenta (consultar la tabla 3), extraída de las *sascaberas* locales, en el estado de Yucatán. En cambio, la muestra P2, se puede correlacionar con la formación geológica nombrada Fm. Icaiché, de época del Paleoceno, ya que esta serie estratigráfica se asienta geográficamente en la zona donde se localiza la cantera de explotación del material pétreo, situada en la periferia del sitio arqueológico de *Sta. Rosa Xtampak* (estado de Campeche). Pero hay que señalar que, pese a la coincidencia litológica, la muestra P2 está meteorizada y karstificada, hecho que nos indica que el estrato de explotación está próximo a la cobertura.

Además, en la mayoría de estas muestras de materia prima, se observa la presencia de granos pedogenéticos representados por nódulos arcillo-ferrosos

que provienen de las rizocreaciones (marcas de raíces de las plantas) o de las perforaciones por bioturbación (Gómez-Gras, D., 1999), muy característicos de la parte superior de los horizontes de *calcretas* o *caliches*, que nos confirman el origen subsuperficial de las materias primas de las áreas arqueológicas estudiadas. Se debe tener en cuenta, que este sustrato de *caliche* ya fue definido, el año 1975, por López-Ramos, E., el cual ya determinó que éste cubre una gran parte de la Península de Yucatán y que se forma indiscriminadamente sobre casi todas las rocas del subsuelo. Posteriormente, ya a finales del s.XX y a comienzos del s.XXI, otros investigadores le hacen referencia en sus estudios (Tucker, M.E. *et al.*, 1990; Cabadas, H. *et al.*, 2010; Bautista, F. *et al.*, 2011a; Solleiro-Rebolledo, E. *et al.*, 2011).

Aun así, el ambiente sedimentario de formación de las materias primas estudiadas es diferente en cada caso, ya que el registro sedimentario y el estratigráfico es muy variado según la ubicación geográfica de extracción del material pétreo estudiado, complicando la interpretación paleoambiental de los mismos. Así pues, a partir de las texturas petrográficas observadas, se puede determinar que la muestra P1 se formó en un ambiente sedimentario de laguna-playa (*lagoon-sea*). En cambio, las muestras P2, P3 y S1 son más difíciles de asignar en un ambiente sedimentario de formación, ya que están muy transformadas por procesos diagenéticos y/o pedogenéticos que les enmascaran las texturas petrográficas originales. Cuando menos, parecen haberse formado en un ambiente sedimentario más continental, lacustre, kárstico o similar.

Así pues, a partir de todos los resultados expuestos hasta el momento, tiene sentido pensar que estos materiales pétreos más superficiales, procedentes de las *sascaberas* y/o las canteras locales, como la muestra P2, próximas a los sitios arqueológicos, fueron los explotados por los técnicos mayas, para manufacturar la cal del mortero de las capas de preparación de los estucos, ya que posiblemente, estos materiales calcáreos, eran los más accesibles para ellos. Así pues, en primer lugar, se simplifica todo el proceso de extracción y de transporte del material pétreo; en segundo lugar, se puede reducir la temperatura de cocción en el proceso de calcinación del material pétreo, ya que estos materiales superficiales tienen una dureza menor; y, en tercer lugar, se favorece la compatibilidad de la cal (cal viva) respecto del árido (*sascab*) en el proceso de mezcla en seco de estos materiales, antes de pasar a la fase de hidratación (Magaloni, D., 1997, 2001), ya que estos son de una naturaleza geológica y composición mineralógica similares.

En este sentido, Schreiner (2001, 2003), ya describe tres tipos de rocas calizas: un tipo de roca caliza suave y porosa que generalmente se encuentra cerca de la superficie por toda la región de las Tierras Bajas Mayas, y que se llama *sascab tunich*, *sascaboso* o *hel bach*; otro tipo de roca caliza un poco más dura que también se encuentra en la superficie y que era la que preferían para quemar en las caleras para la manufactura de la cal, llamada *sac ebach* o *ebach*, *sac tunich* y piedra blanca, dependiendo del lugar; finalmente, un tipo de rocas más duras, no porosas y cristalinas, llamadas *tunich*, *taman tunich*, piedra de cerro y piedra de fuego, que no eran consideradas aptas para la quema, ya que requerían temperaturas más altas para ser calcinadas. También es importante señalar que la materia prima P2, dada su composición silicificada, puede favorecer la neoformación de compuestos de carácter hidráulico durante la quema de la materia prima para manufacturar cal. Es decir, la calcinación de una mezcla de calcita y minerales de composición silícica, sea o no intencionada, da lugar a la formación de óxido de calcio – CaO- y de silicatos cálcicos (alita y belita), fases hidráulicas naturales de la cal. La temperatura de cocción ha sido variable a lo largo de la historia, oscilando entorno los 700 y 800°C, para conseguir la formación de estos compuestos químicos (Alastuey, À., 1993).

En resumen, no se puede llegar a una conclusión precisa sobre el origen de los materiales pétreos con los que los técnicos mayas elaboraban la cal y el árido en época prehispánica, pero sí se puede afirmar que, en muchos casos, se utilizaban los materiales de la cobertura calcárea de la plataforma de la Península de Yucatán, teniendo en cuenta que la alta diversidad litológica de la zona de estudio, hace difícil la asignación exacta de las muestras de las materias primas estudiadas con el sustrato geológico correspondiente.

### **1.1.3.1.2. Sedimentos arcillosos**

Los métodos tradicionales de estudio de suelos y de sedimentos arcillosos consisten en descripciones de campo y en análisis de laboratorio. Las descripciones que se hacen a partir del material *in situ* son esencialmente de tipo observacional y nos permiten observar la estructura y la distribución original de los componentes en su contexto geológico, pero disponiendo de pocas herramientas, esencialmente mediante la comparación de tablas patrón preestablecidas (Splé, A. *et al.* 1990). En cambio, los análisis de laboratorio constituyen un complemento indispensable de la descripción de campo, con el fin de identificar los posibles procesos generadores de los suelos. En este sentido, la génesis de las arcillas es un proceso clave en la formación de los suelos, por ser minerales característicos del mismo, como ya se ha mencionado anteriormente. Por este motivo, el estudio de las muestras de sedimentos arcillosos seleccionadas por esta investigación se realiza a partir de una descripción macromorfológica de las muestras de mano de los sedimentos y de una caracterización mineralógica de los mismos. Cabe mencionar que en esta investigación no se opta por hacer un estudio micromorfológico (estudio a escala microscópica de las muestras preparadas en láminas delgadas) de las muestras de sedimentos arcillosos, ya que el objetivo del estudio no es la descripción del suelo ni sus procesos de formación en cuestión, sino que se investiga la mineralogía de las arcillas que forman parte de las muestras seleccionadas.

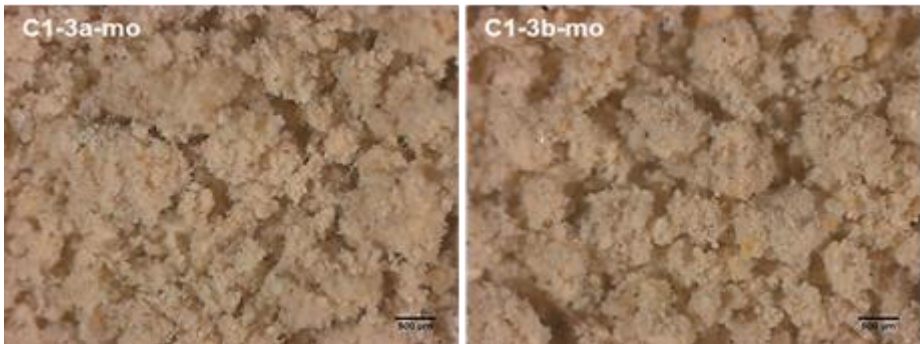
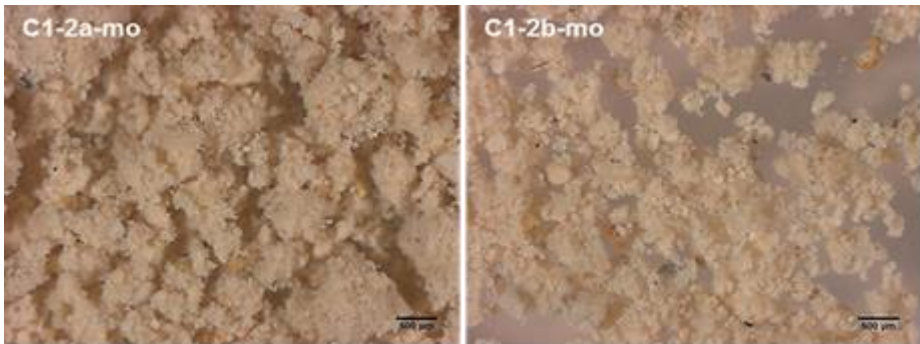
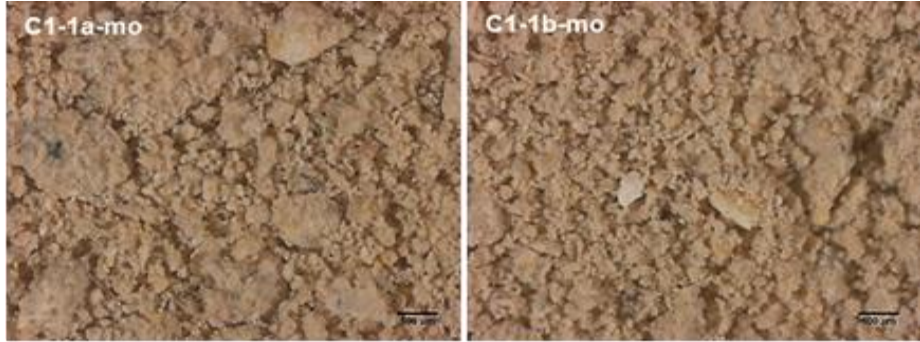
#### **1.1.3.1.2.1. Descripción macromorfológica de los sedimentos arcillosos**

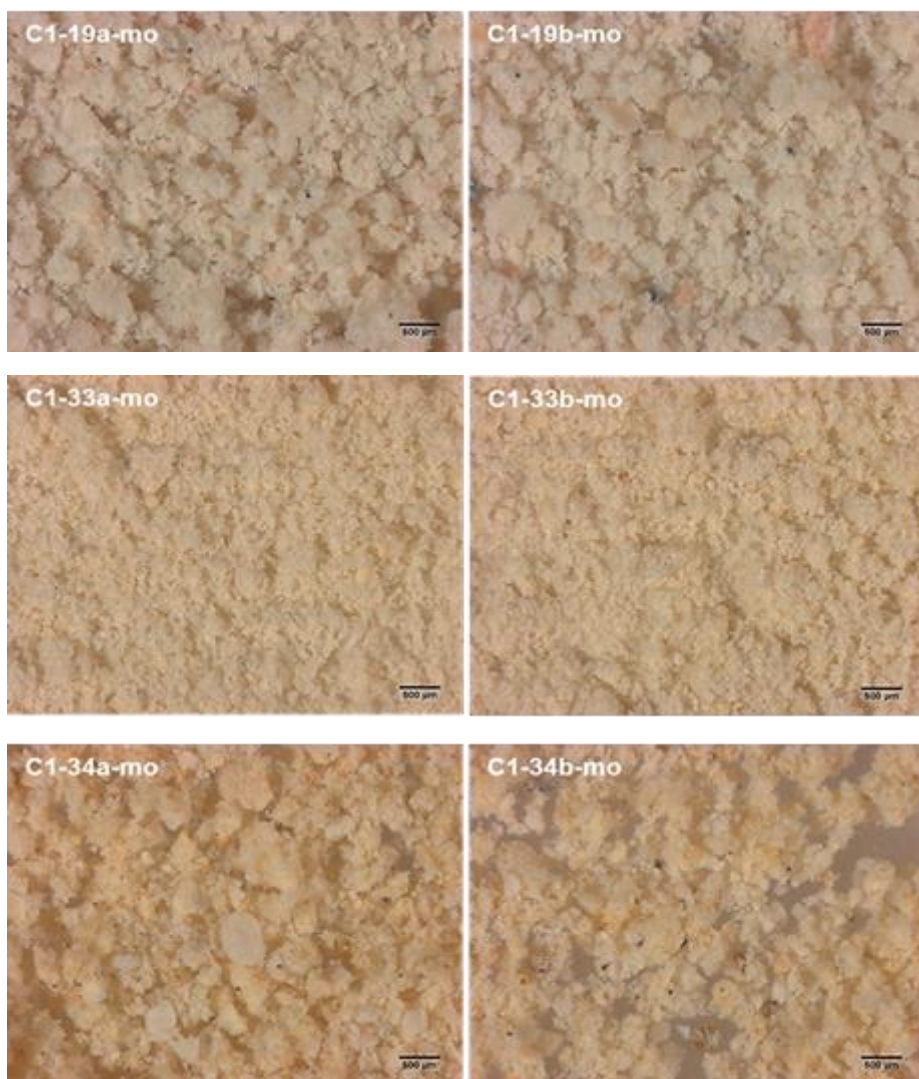
La descripción macromorfológica de las muestras de mano de los sedimentos arcillosos seleccionados, procedentes de tres de las localidades (Sak lu'um (C1), Muna (C2) y Ticul (C3)) donde aparecen los afloramientos más reconocidos de arcillas tipo paligorskita, se realiza a partir de una lupa estereoscópica con la finalidad de determinar sus características morfológicas: la textura, la tonalidad, el hábito, el tamaño y la distribución de los granos, etc.

A continuación, se presentan tres fichas confeccionadas para las muestras de sedimentos arcillosos seleccionados para esta investigación, que responden al lugar de extracción de las muestras.



<b>Referencia sedimento arcilloso</b>	<b>sedimento arcilloso: muestra C1-1, C1-2, C1-3, C1-19, C1-33, C1-34, C1-35 y C1-37</b>
<b>Lugar de explotación</b>	extraído de la cueva de <i>Sak lu'um</i> (tierra blanca), de la localidad de <i>Sak lu'um</i> , al norte del estado de Yucatán





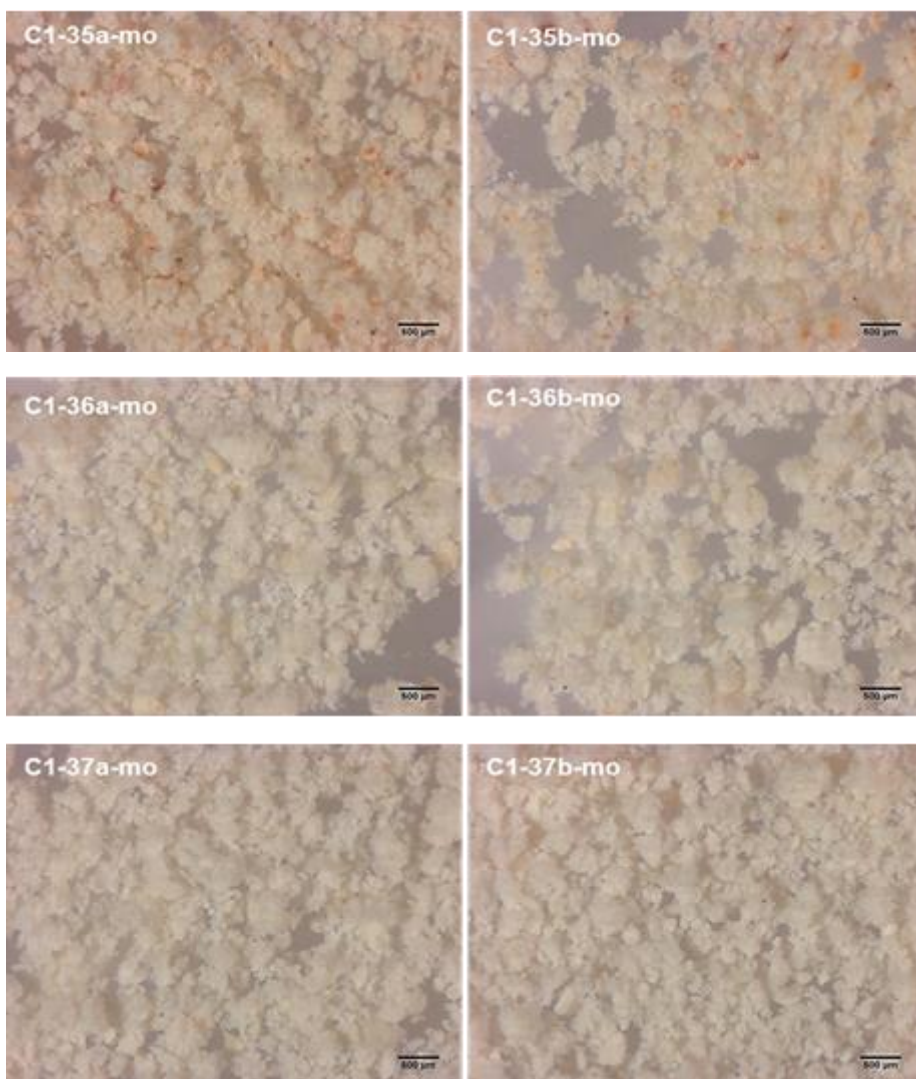


Figura 37. Microfotografías MO (C1-1, C1-2, C1-3, C1-19, C1-33, C1-34, C1-35, C1-36 y C1-37), de izquierda a derecha y de arriba abajo, C1-1a y C1-1b (1,25x); C1-2a y C1-2b (1,25x); C1-3a y C1-3b (1,25x); C1-19a y C1-19b (1,25x); C1-33a y C1-33b (1,25x); C1-34a y C1-34b (1,25x); C1-35a y C1-35b (1,25x); C1-36a y C1-36b (1,25x) y C1-37a y C1-37b (1,25x)

<b>Características macromorfológicas</b>	<b>componentes</b>	fragmentos lenticulares irregulares, de color blanco o translúcidos, de subangulosos a subredondeados, de composición carbonatada; pequeñas partículas de color oscuro y rojizas-anaranjadas, de óxidos de hierro (goethita y/o hematites) (muestras C1-2, C1-3, C1-19, C1-34, C1-35); también se observan partículas o fragmentos de color rosado, que pueden ser sales o sulfatos (muestra C1-19).
	<b>fracción arcillosa</b>	se observan partículas cilíndricas $\leq 500 \mu\text{m}$ ; pequeños cristales aciculares adheridos a la superficie de los granos.

<b>Referencia sedimento arcilloso</b>	<b>sedimento arcilloso: muestra C2-7</b>
<b>Lugar de explotación</b>	extraído de la cueva de la localidad de <i>Muna</i> , al norte del estado de Yucatán

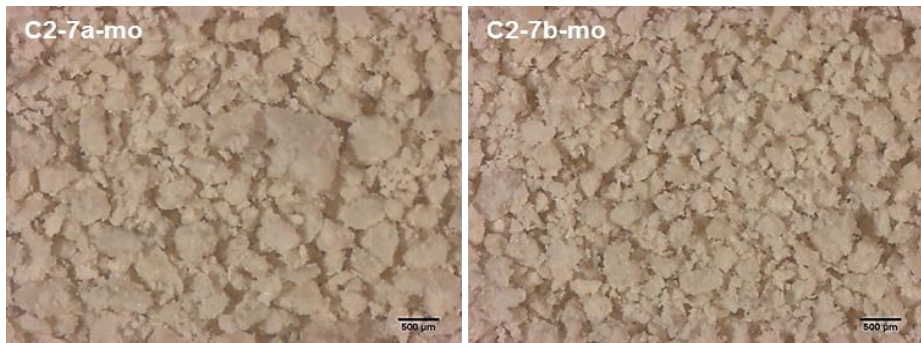


Figura 38. Microfotografías MO (C2-7), de izquierda a derecha, C2-7a y C2-7b (1,25x)

<b>Características macromorfológicas</b>	<b>componentes</b>	fragmentos lenticulares irregulares, de color blanco-grisáceo o translúcidos, de subangulosos a subredondeados, de composición carbonatada.
	<b>fracción arcillosa</b>	agregados laminares; se observa alguna partícula cilíndrica $\leq 500 \mu\text{m}$



<b>Referencia sedimento arcilloso</b>	<b>sedimento arcilloso (C3-18)</b>
<b>Lugar de explotación</b>	extraído de la cueva de <i>Actun Hi</i> , de la localidad de Ticul, al norte del estado de Yucatán

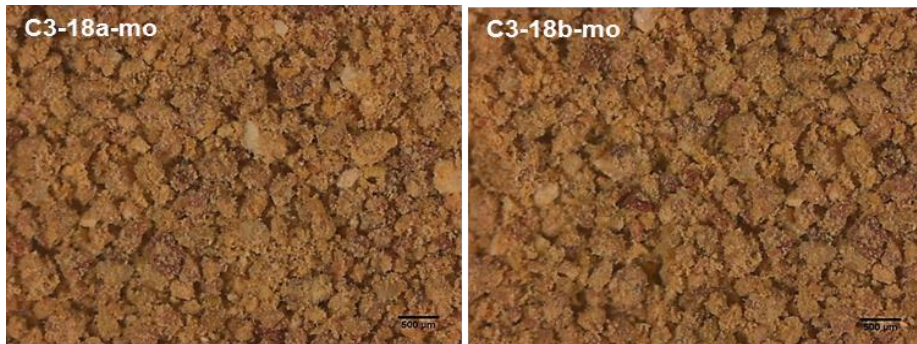


Figura 39. Microfotografías MO (C3-18), de izquierda a derecha, C3-18a y C3-18b (1,25x)

<b>Características macromorfológicas</b>	<b>componentes</b>	fragmentos lenticulares irregulares, blancos o translúcidos, de composición carbonatada, de subangulosos a subredondeados; nódulos ferruginosos y fragmentos de roca o arcillitas, que contribuyen el color marronoso.
	<b>fracción arcillosa</b>	agregados laminares; se observa alguna partícula cilíndrica $\leq 500 \mu\text{m}$

Las características macromorfológicas observadas nos permiten dividir las muestras en tres grandes grupos, que responden al lugar de extracción de los sedimentos arcillosos estudiados. Por un lado, las muestras C-1 de sedimentos arcillosos extraídas de la cueva de *Sak lu'um*, de la localidad de Sak lu'um, al norte del estado de Yucatán, se caracterizan, en general, por presentar fragmentos lenticulares irregulares, de tonalidad blanca o translúcida, con una forma que oscila de subangulosa a subredondeada, de composición carbonatada. Además, en ciertas muestras se observan pequeñas partículas de tonalidad más oscura, rojizo-anaranjadas, de composición ferrosa (minerales de goethita y/o hematites) (muestras C1-2, C1-3, C1-19, C1-34, C1-35). Cabe destacar, la presencia puntual de partículas de tonalidad rosada en la muestra C1-19, de composición sulfatada, seguramente cristales de sales o sulfatos. La fracción arcillosa de estas muestras se caracteriza por estar formada de partículas cilíndricas  $\leq 500 \mu\text{m}$  y, en menor escala, de pequeños cristales aciculares adheridos en la superficie de los granos.

Por otro lado, la muestra C2-7 de sedimento arcilloso extraída de la cueva de la localidad de *Muna*, al norte del estado de Yucatán, se caracteriza por la

presencia de los mismos componentes que las muestras de sedimento arcilloso denominadas C1, pero se diferencia de ellas por su fracción arcillosa, la cual se compone, mayoritariamente de agregados laminares y de alguna partícula cilíndrica  $\leq 500 \mu\text{m}$ .

Por último, la muestra C3-18 de sedimento arcilloso extraída de la cueva de *Actun Hi*, de la localidad de Ticul, al norte del estado de Yucatán, se caracteriza por su tonalidad marronosa, que viene dada por la presencia de nódulos ferruginosos y de fragmentos de roca o arcillitas. También se observan, coincidiendo con el resto de las muestras estudiadas, fragmentos de composición carbonatada. La fracción arcillosa de esta muestra coincide con la de la muestra C2-7.

#### **1.1.3.1.2.2. Caracterización químico-mineralógica de los sedimentos arcillosos**

La caracterización químico-mineralógica de las muestras de sedimentos arcillosos seleccionadas se ha llevado a cabo teniendo en cuenta dos técnicas instrumentales de análisis: la difracción de rayos-x (DRX), siendo esta la técnica más usada para determinar las especies minerales mayoritarias presentes en las muestras de sedimentos arcillosos, sin pretratamiento; la espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR), para caracterizar la estructura química de las muestras y, a veces, siendo necesaria para caracterizar mezclas de arcillas complejas, en particular, cuando se dispone de pequeñas cantidades de muestra, como en el campo de la arqueometría (Madejová, J. *et al.*, 2002). Los análisis de estas técnicas instrumentales son considerados cualitativos y semicuantitativos. Además, a modo de ejemplo, se ha determinado la morfología de la muestra C1-1 de sedimento arcilloso, mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM) con imágenes de electrones secundarios (ES).

##### *Difracción de rayos-x (DRX)*

Los resultados de las especies minerales mayoritarias, que se detectan en los difractogramas obtenidos del análisis de las muestras de sedimentos arcillosos seleccionadas a través de la difracción de rayos-x, se muestran en la tabla 15 siguiente:

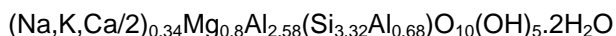
Tabla 15. Especies minerales mayoritarias de los difractogramas obtenidos del análisis de la muestras de sedimentos arcillosos a través de la difracción de rayos-x. Acrónimos: REF. S.A: referencia de las muestras de sedimentos arcillosos; sustancia mineral mayoritaria: +++; sustancia mineral moderadamente mayoritaria: ++; sustancia mineral poco presente: +; sustancia mineral no presente: -; d: distancias características entre los planos de la red cristalina de las especies minerales detectadas.

REF. S.A.	ESPECIES MINERALES MAYORITARIAS OBTENIDAS			d (Å)
	paligorskita	montmorillonita-clorita	dolomita	
C1-1	+++	+	++	paligorskita: <u>10,44</u> ; 4,466; 4,262; 2,539  dolomita: <u>2,886</u> ; 2,192; 1,786; 1,781
C1-2	+++	+	++	
C1-3	+++	+	++	
C1-19	+++	+	-	
C1-33	+	+	+++	
C1-34	+++	+	-	
C1-35	+++	+	-	
C1-36	+++	+	-	
C1-37	+++	+	-	
C2-7	+	+++	++	
C3-18	+	+++	++	montmorillonita-clorita: 15,00; 4,97; <u>4,53</u> ; 2,54

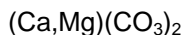
*Fórmulas estructurales teóricas de las especies minerales detectadas en los difractogramas:*

De acuerdo con la estructura propuesta por Bradley, W.F. (1940), la fórmula teórica de la paligorskita es:  $\text{Si}_9\text{Mg}_5\text{O}_{20}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  y la fórmula propuesta por (Mineralogical Society of America. Handbook of Mineralogy (2001) es:  $(\text{Mg},\text{Al})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

De la montmorillonita-clorita es:



De la dolomita es:



La figura 40 presenta los difractogramas de rayos-x más característicos de las muestras de los sedimentos arcillosos estudiados.

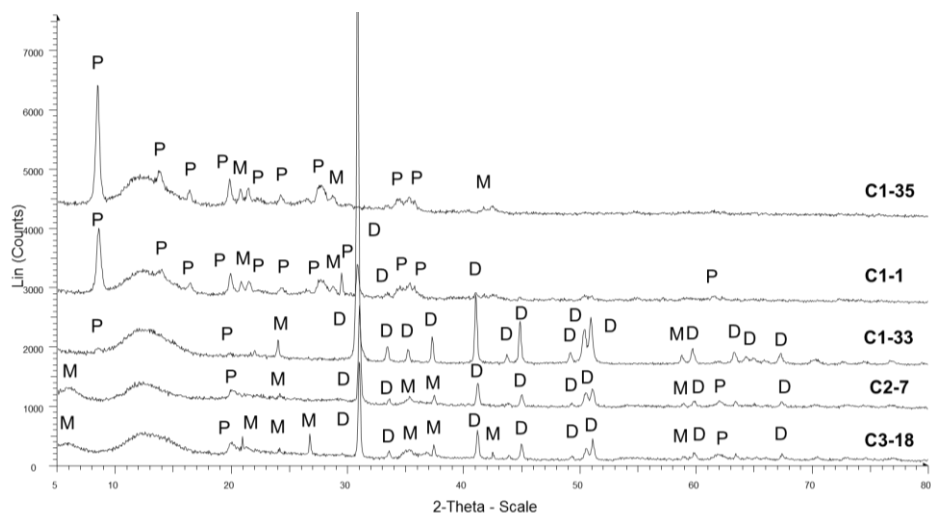


Figura 40. Difractogramas de rayos-x más característicos de las muestras de sedimentos arcillosos siguientes: difractograma C1-35, representativo de las muestras C1-19, C1-34, C1-36 y C1-37; difractograma C1-1, representativo de las muestras C1-2, C1-3; difractograma C1-33; difractograma C2-7; y, difractograma C3-18. Acrónimos de las especies minerales detectadas: P: paligorskita; M: montmorillonita; D: dolomita.

En general, los resultados obtenidos nos indican la presencia mayoritaria de minerales de la familia de las arcillas (paligorskita y montmorillonita-clorita) asociados a la dolomita, un carbonato cálcico-magnésico que en los difractogramas se reconoce porque posee un pico principal ubicado a 2,88 Å. Los minerales de arcilla presentes forman parte de dos grupos de minerales de la arcilla diferenciados, en función de su estructura cristalina. Por una parte, la paligorskita forma parte de las arcillas fibrosas; químicamente es un aluminosilicato magnésico hidratado y en los difractogramas se identifica por poseer un pico principal ubicado a 10,44 Å (Guistetto, R. *et al.*, 2004<sup>107</sup>; Mineralogical Society of America. Handbook of Mineralogy, 2001<sup>108</sup>). Por otra parte, la montmorillonita forma parte de las arcillas laminares de la familia de las esmectitas; químicamente es un aluminosilicato magnésico sódico-cálcico hidratado. En este caso, se presenta interestratificada con la clorita, grupo de aluminosilicatos característico de los filosilicatos y en los difractogramas se reconoce porque posee un pico principal ubicado a 4,53 Å (Mineralogical Society of Americano. Handbook of Mineralogy, 2001).

<sup>107</sup> La muestra de paligorskita que sirve para realizar el difractograma y sacar los espaciados cristalinos a Guistetto, R. *et al.* (2004) es de la mina de *Lorenzo Pech*, cerca de la localidad de *Ticul*, en el camino de *Chapab*, México.

<sup>108</sup> Fuente: [www.handbookmineralogy.org](http://www.handbookmineralogy.org)



Específicamente, en primer lugar, las muestras de sedimentos arcillosos C1-1, C1-2 y C1-3, extraídas de la cueva de *Sak lu'um*, están compuestas mayoritariamente de paligorskita acompañada de dolomita y, en menor proporción, de montmorillonita-clorita; las muestras C1-19, C1-34, C1-35, C1-36 y C1-37 están compuestas mayoritariamente de paligorskita y, en menor proporción, de montmorillonita-clorita; y, la muestra C1-33 está compuesta mayoritariamente de dolomita acompañada, en menor proporción, de paligorskita y de montmorillonita-clorita. Estos resultados indican que estas muestras de sedimentos arcillosos forman parte del grupo de las arcillas primarias que se forman por la cristalización directa, el tipo genérico de arcillas que se encuentran en la Península de Yucatán, que están formadas por talco, clorita, paligorskita-sepiolita y capas mixtas de caolinita-montmorillonita (Isphording, C., 1984; Pablo-Galán, L., 1996). El origen de la paligorskita, que aflora aislada o como depósitos dentro de las rocas calizas, se asocia a la cristalización directa de las aguas marinas de salinidad elevada o a la diagénesis de la dolomita (Isphording, C., 1984; Pablo-Galán, L., 1996). La segunda hipótesis explicaría la presencia o la ausencia de dolomita en las muestras estudiadas, en diferentes proporciones, dependiendo de la muestra analizada. O sea, semicuantitativamente hablando, las muestras que no presentan dolomita son aquellas que han sufrido una alteración diagenética absoluta y el material se ha transformado totalmente a paligorskita (muestras C1-19, C1-34, C1-35, C1-36 y C1-37); las muestras que presentan una cierta proporción de dolomita son aquellas en las que el proceso de alteración diagenética no ha concluido (muestras C1-1, C1-2 y C1-3); y, las muestras que presentan mayoritariamente dolomita respecto paligorskita son aquellas en las que el proceso de alteración diagenética está a la fase inicial (muestra C1-33). La ausencia de minerales detríticos, confirma que la paligorskita no ha sufrido transporte y que se ha formado por procesos *in situ*, corroborando también la hipótesis que se origina por la cristalización directa. Además, la paligorskita es un tipo de arcilla que aparece en la naturaleza asociada a otras especies minerales de la familia de las arcillas, como la illita/esmectita, la esmectita, la illita y la clorita (Pablo-Galán, L. 1996), tal como determinan los difractogramas del conjunto de estas muestras, donde se detecta la presencia de montmorillonita-clorita, en menor proporción. El origen de la clorita está relacionado a rocas carbonatadas y a suelos del norte de la plataforma kárstica de la península, asociados a rocas dolomíticas. Ésta se forma por cristalización directa, como consecuencia también de la alteración diagenética de la dolomita (Isphording, C., 1984; Pablo-Galán, L., 1996).

Las microfotografías, de la muestra de sedimento arcilloso C1-1, realizadas mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM) con electrones

secundarios (ES), confirman el crecimiento de paligorskita de morfología fibrosa-cilíndrica en dolomita romboédrica producida por un proceso de alteración diagenética de la dolomita (Figura 41).

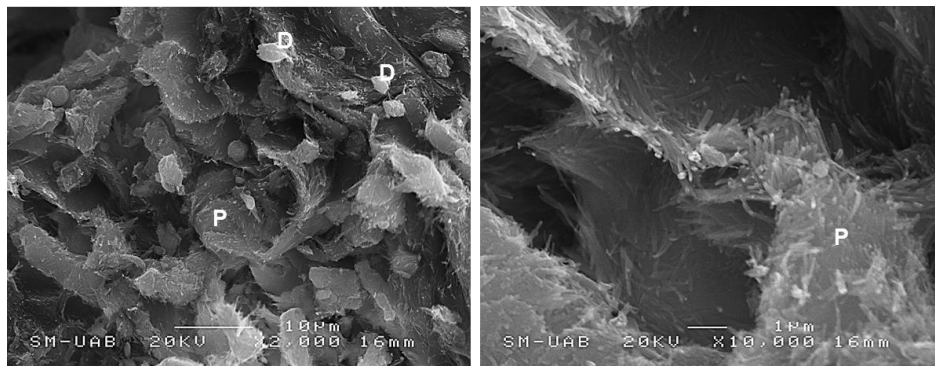


Figura 41 Microfotografías de SEM, en electrones secundarios (ES) de la muestra de sedimento arcilloso C1-1, de izquierda a derecha, 2.000x y 10.000x. Acrónimos: P: abanicos fibrosos de paligorskita; D: dolomita romboédrica.

En segundo lugar, las muestras de sedimentos arcillosos C2-7 y C3-18, extraídas de las cuevas de las localidades de *Muna* y de *Ticul*, respectivamente, comparten las especies minerales detectadas en los difractogramas. Estas muestras están compuestas mayoritariamente de montmorillonita-clorita y, en menor proporción, de dolomita y paligorskita. Estos resultados indican que estas muestras de sedimentos arcillosos forman parte de las arcillas detríticas que se forman por la sedimentación de detritus, en su mayoría restringidas a las áreas de cuencas de polje dispersas por la sierra de Ticul y formadas por arcillas esmectitas asociadas a cuarzo detrítico, óxidos de hierro y, en menor proporción, caolinita. Además, la presencia, en cierta medida, de dolomita en los difractogramas resultantes de estas muestras responde a la naturaleza carbonatada del sustrato rocoso de la Península de Yucatán. Pese a la alta variedad litológica que presenta (Butterlin, J. *et al.*, 1960; López Ramos, E., 1979; Aguayo, J.E. *et al.*, 1980; Floras, S. *et al.*, 1994; de Pablo-Galàn, L., 1996; Castro, J., 2002) y la exigua proporción de paligorskita presente, se puede asociar a la incipiente alteración diagenética de la dolomita, como en el caso de las muestras C-1. Por último, no se detecta la presencia de cuarzo detrítico, ni de óxidos de hierro asociados a la montmorillonita-clorita. Sin embargo, la presencia de óxidos de hierro (goethita y/o hematites) se observa en la descripción macromorfológica de la muestra C3-18.

### *Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)*

La determinación de la composición química de las muestras de sedimento arcilloso, se lleva a cabo a partir de la interpretación de sus espectros de infrarrojo. Los espectros muestran bandas de absorción en las regiones características de los minerales de la familia de las arcillas, confirmando los resultados obtenidos por la difracción de rayos-x. Concretamente, los espectros obtenidos se dividen en dos grupos que separan las muestras en aquellas en que el mineral arcilloso característico es la paligorskita (muestras C1: C1-1, C1-2, C1-3, C1-19, C1-33, C1-34, C1-35, C1-36 y C1-37) y aquellas en que es la montmorillonita-clorita (muestras C2-7 y C3-18).

#### *Interpretación de los espectros de infrarrojo de las muestras de sedimento arcilloso C1 (cueva de Sak lu'um)*

La posición de las bandas identificadas en los espectros de los sedimentos arcillosos C1 estudiados es similar para todas las muestras, porque todas ellas comparten la paligorskita como especie mineral arcillosa característica, pero con algunas diferencias con sus intensidades respecto las especies minerales que la acompañan. La presencia de dolomita en diferentes proporciones hace oscilar la intensidad de la paligorskita.

En primer lugar, el espectro de la muestra C1-33 presenta la totalidad de las bandas de absorción correspondientes a la dolomita, destacando las frecuencias de vibración que se consideran diagnóstico, a 1413, 874 y 727  $\text{cm}^{-1}$ , las cuales están asociadas al complejo aniónico correspondiente a los carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (Gunasekaran, S. *et al.*, 2006; Makreski, P. *et al.*, 2003) (Tabla 16 y 17); mientras que, por otra parte, los espectros de las muestras C1-1, C1-2 y C1-3 también presentan las bandas de absorción de la dolomita, pero en menos intensidad; y, por último, las muestras C1-19, C1-34, C1-35, C1-36 y C1-37 no presentan la dolomita en sus espectros. En la figura 42 se muestran los espectros de las muestras C1-1, C1-33 y C1-35 representativas de las tres situaciones expuestas.

Tabla 16. Frecuencias de vibración diagnósticas de la dolomita presentes mayoritariamente en el espectro de la muestra C1-33. Acrónimos: mf: muy fuerte; f: fuerte; m: mediana; (ag): aguda; (an): ancha

<b>FRECUENCIAS DE VIBRACIÓN DIAGNÓSTICO Dolomita</b>		
<b>Frecuencias <math>\nu</math> (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Asignación y comentarios</b>
1413	mf (an)	$\nu_3$ – vibración de tensión asimétrica asociada al grupo $\text{CO}_3^{2-}$
874	f (ag)	$\nu_2$ – vibración de flexión asimétrica asociada al grupo $\text{CO}_3^{2-}$ ; vibración de flexión fuera de plano asociada al catión $\text{Mg}^{2+}$
727	m (ag)	$\nu_4$ – vibración de flexión simétrica asociada al grupo $\text{CO}_3^{2-}$

Tabla 17. Frecuencias de vibración del espectro de la dolomita de la muestra C1-33, comparadas con las de dos estudios más. Acrónimos: (1). Gunasekaran, S. *et al.*, 2006; (2). Hunt, G.R. *et al.*, 1971; (3). este trabajo de investigación – muestra C1-33.

<b>FRECUENCIAS DE VIBRACIÓN DEL ESPECTRO Dolomita - muestra C1-33</b>			
<b><math>\nu</math> (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>\nu</math> (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>\nu</math> (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Asignación y comentarios</b>
(1)	(2)	(3)	
2923	-----	2893	2 $\nu_3$
2525	2530	2533	2 $\nu_2 + \nu_4$
1881	1818	1819	$\nu_1 + \nu_4$
1446	1450	1413	$\nu_3$ – vibración de tensión asimétrica asociada al grupo $\text{CO}_3^{2-}$
-----	-----	-----	$\nu_1$ – vibración de tensión simétrica asociada al grupo $\text{CO}_3^{2-}$
881	853	874	$\nu_2$ – vibración de flexión asimétrica asociada al grupo $\text{CO}_3^{2-}$
729	730	727	$\nu_4$ – vibración de flexión simétrica asociada al grupo $\text{CO}_3^{2-}$

En segundo lugar, el espectro de la muestra C1-35 (Figura 42) permite determinar las bandas de absorción características de la paligorskita, ya que esta es una de las muestras que el mineral arcilloso no está asociado a la dolomita. A continuación, se detallan las frecuencias de vibración características de la paligorskita (Van der Marel, W. *et al.*, 1976; Augsburger, S. *et al.*, 1998; Suárez, M. *et al.*, 2006) (Tabla 18): (a). las bandas de absorción a 3612, 3580, 3540, 3372 y 3272 cm<sup>-1</sup> corresponden al grupo hidroxilo (OH<sup>-</sup>) y a los diferentes tipo de agua (de coordinación y zeolítica) del modo siguiente: la banda 3612 cm<sup>-1</sup> se asigna a la vibración de tensión del grupo hidroxilo unido a los diferentes cationes de la red cristalina, en una coordinación octaédrica; las bandas 3580 y 3540 cm<sup>-1</sup> corresponden al agua coordinada en los canales y las

bandas 3372 y 3272  $\text{cm}^{-1}$  pertenecen al agua zeolítica (agua físicamente absorbida); (b). la banda de absorción a 1654  $\text{cm}^{-1}$  se asigna a la vibración de flexión asimétrica asociada al grupo HOH del agua coordinada y absorbida; (c). las bandas de absorción a 1191, 1110, 1087, 1036 y 972  $\text{cm}^{-1}$  se asignan a la vibración de tensión asimétrica asociada al grupo terminal O'-SiO<sub>3</sub> y al grupo puente Si-O-Si; (d). la banda de absorción a 910  $\text{cm}^{-1}$  se asigna a la vibración de tensión simétrica asociada al grupo terminal O'-SiO<sub>3</sub> y a la vibración de flexión asociada al grupo terminal Al<sub>2</sub>-OH y (Al,Fe)-OH; (e). la banda de absorción a 789  $\text{cm}^{-1}$  se asigna a la vibración de flexión asociada al grupo terminal (Mg,Al)-OH, Fe<sub>2</sub>-OH y (Mg, Fe)-OH; (f). las bandas de absorción a 732 y 638  $\text{cm}^{-1}$  esconden vibraciones en coordinación octaédrica M-O, donde M = Al, Mg; (g). la región de las bandas de absorción entre 600 y 400  $\text{cm}^{-1}$  es una región compleja de asignar, con contribuciones de vibraciones de flexión asociadas a los grupos terminales Si-O-Si y O'-SiO<sub>3</sub>.

Tabla 18. Frecuencias de vibración diagnósticas de la paligorskita presentes mayoritariamente en el espectro de la muestra C1-35. Acrónimos: mf: muy fuerte; f: fuerte; m: mediana; d: débil; md: muy débil; (ag): aguda; (an): ancha; (h): hombro; (c): cuello (Augsburger, M.S. *et al.*, 1998)

<b>FRECUENCIAS DE VIBRACIÓN DIAGNÓSTICO Paligorskita</b>		
<b>Frecuencias <math>\nu</math> (<math>\text{cm}^{-1}</math>)</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Asignación y comentarios</b>
3612	d (ag)	$\nu(\text{M}_2)\text{-OH}$ M = Mg, Al, Fe
3580	(h)	$\nu_1 + \nu_3$ agua de coordinación
3540	d (ag)	
3372	(c)	$\nu_1 + \nu_3$ agua zeolítica
3272	(c)	
1654	d (ag)	$\delta(\text{H}_2\text{O})$ (total)
1191	d (ag)	$\nu_{\text{as}}(\text{Si-O-Si})$
1110	(h)	$\nu_{\text{as}}\text{SiO}_3$
1087	(h)	
1036	(h)	
972	mf (ag)	
910	m (ag)	$\nu_s\text{SiO}_3 + \delta(\text{Al}_3\text{-OH}) + \delta(\text{Al,Fe})\text{-OH}$
789	md (an)	$\delta(\text{Fe}_2\text{-OH}) + \delta(\text{Mg,Al})\text{-OH} + \delta(\text{Mg,Fe})\text{-OH}$
732	md (an)	$\nu(\text{Al, Mg-O})$
638	d (ag)	$\nu_s(\text{Si-O-Si}) + \nu(\text{Mg, Al-O})$
580	(h)	$\delta\text{SiO}_3 + \delta(\text{Si-O-Si})$
511	f (ag)	

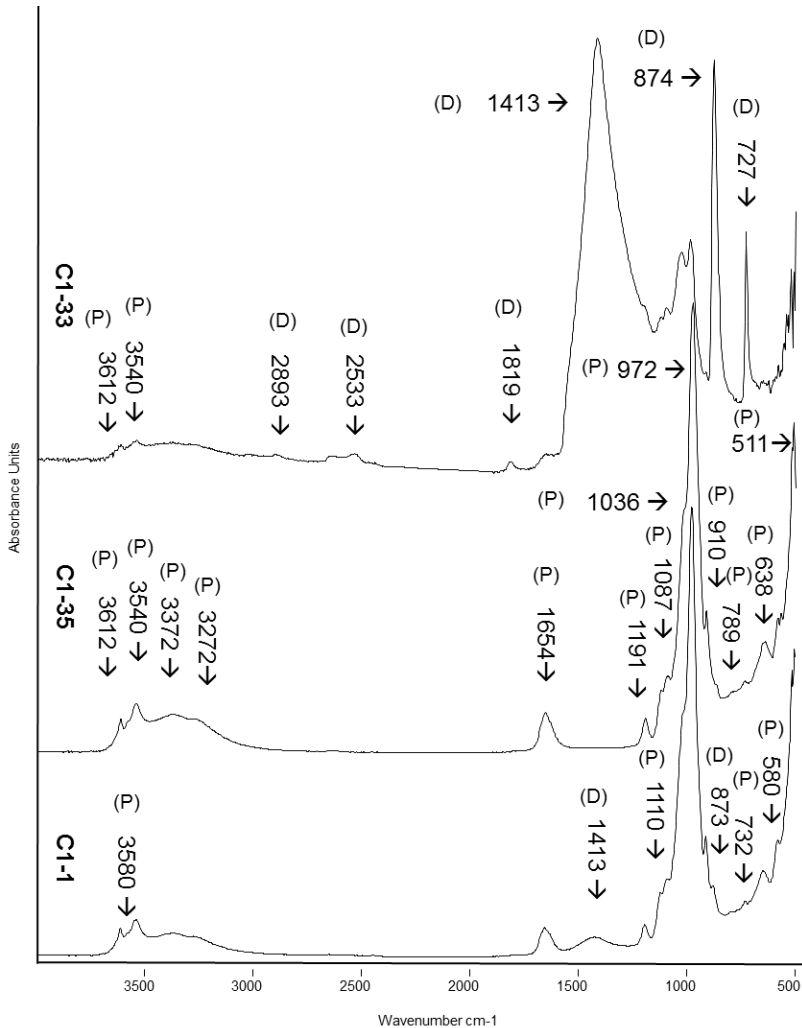


Figura 42. Espectros de las muestras C1-1, C1-35 y C1-33 representativas de las muestras de sedimento arcilloso estudiadas. Acrónimos: (P): paligorskita; (D): dolomita

*Interpretación de los espectros de infrarrojo de las muestras de sedimento arcilloso C2-7 (cueva de Muna) y C3-18 (cueva de Ticul)*

La posición de las bandas identificadas en los espectros de sedimentos arcillosos C2 y C3 estudiados es similar para ambas muestras, porque todas ellas comparten la montmorillonita-clorita como especie mineral arcillosa característica, pero con pequeñas diferencias con sus intensidades respecto

las especies minerales que le acompañan. La presencia, en diferentes proporciones, de dolomita y de paligorskita hace oscilar la intensidad de la montmorillonita-clorita.

Los dos espectros de las muestras C2-7 y C3-18 (Figura 43) presentan las bandas de absorción diagnóstico correspondientes a la dolomita, a 1425, 874 y 727  $\text{cm}^{-1}$ , las cuales están asociadas al complejo aniónico correspondiente a los carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (Gunasekaran, S. *et al.*, 2006; Makreski, P. *et al.*, 2003). Por otra parte, presentan las bandas de absorción características de la Al-Mg-montmorillonita-clorita, quedando confirmada la presencia, en estas muestras, de minerales de la arcilla interestratificados (Van der Marel, W. *et al.*, 1976), ya que la banda de absorción a 3621  $\text{cm}^{-1}$  detectada es típica de montmorillonitas ricas en Al y las bandas de absorción a 911  $\text{cm}^{-1}$  (AlAlOH) y a 835  $\text{cm}^{-1}$  (AlMgOH) confirman la sustitución parcial, en coordinación octaédrica, de Al respecto de Mg. Además, en los espectros se observa una región con bandas de absorción entre 1100 a 1000  $\text{cm}^{-1}$ , las cuales se asignan a la vibración de tensión asociada al grupo Si-O. A continuación, se detallan las frecuencias de vibración características de la Al-Mg-montmorillonita-clorita (Van der Marel, W. *et al.*, 1976; Madejová, J., *et al.*, 2002) de las muestras C2-7 y C3-18 (Tabla 19):

Tabla 19. Frecuencias de vibración diagnósticas de la Al-Mg-montmorillonita-clorita presentes mayoritariamente en los espectros de las muestras C2-7 y C3-18. Acrónimos: mf: muy fuerte; m: mediana; d: débil; md: muy débil; (ag): aguda; (h): hombro; (c): cuello (Madejová, J., *et al.*, 2002)

<b>FRECUENCIAS DE VIBRACIÓN DIAGNÓSTICO Al-Mg-montmorillonita-clorita</b>		
<b>C2-7</b>	<b>C3-18</b>	
<b>Frecuencias <math>\nu</math> (<math>\text{cm}^{-1}</math>) e intensidades</b>		<b>Asignación y comentarios</b>
3622 d(ag)	3621 d(ag)	vibración de tensión asociada al grupo $\text{OH}^-$
3386 (c)	3385 (c)	$\nu_1 + \nu_3$ agua zeolítica
1630 d(ag)	1631 d(ag)	$\delta(\text{H}_2\text{O})$ (total)
1114 d(a)	1106 (h)	vibración de tensión asociada al grupo Si-O
988 mf(a)	992 mf(ag)	
912 m(ag)	911 m(ag)	vibración de flexión asociada al grupo AlAlOH
835 md(ag)	835 (h)	vibración de flexión asociada al grupo AlMgOH

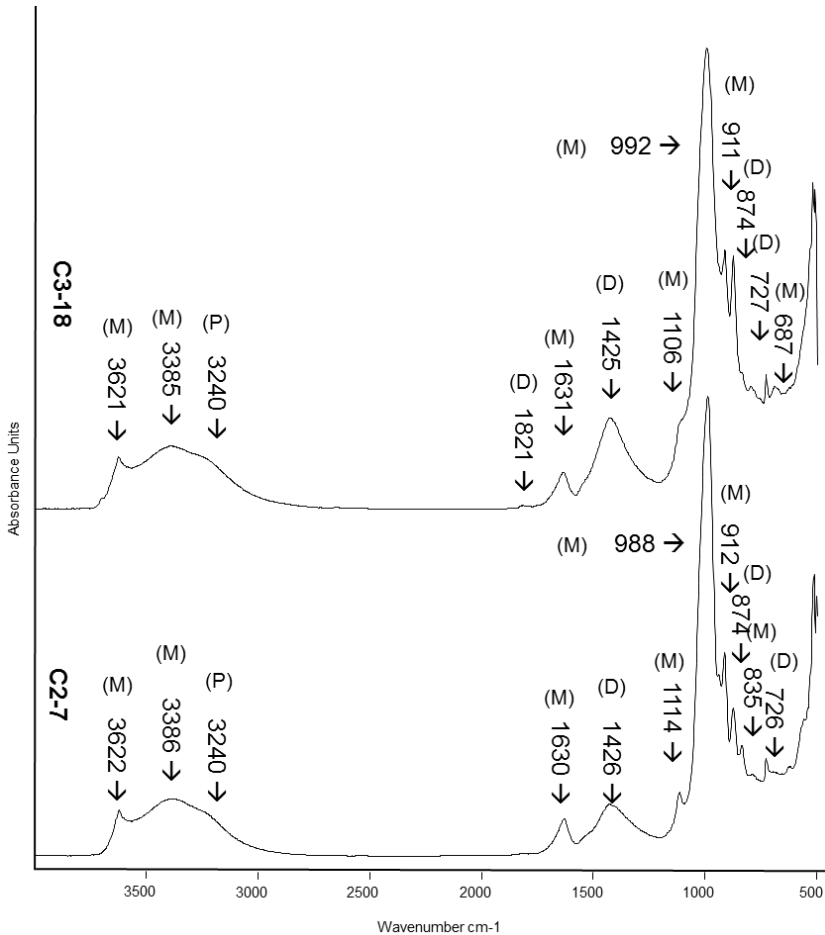


Figura 43. Espectros de las muestras de sedimento arcilloso C2-7 y C3-18 estudiadas. Acrónimos: (M): Al-Mg- montmorillonita-clorita; (P): paligorskita; (D): dolomita

### 1.1.3.1.2.3. Paisaje edáfico de los sedimentos arcillosos estudiados

Tal como desarrolla Bautista, F. *et al.* (2011b) en su estudio sobre la regionalización edáfica de la Península de Yucatán, en esta investigación se utiliza el término paisaje edáfico para contextualizar las muestras de sedimento arcilloso estudiadas con la distribución edáfica del estado de Yucatán, ya que la totalidad de las muestras provienen de este estado, concretamente de la localidad de *Sak lu'um*, de *Muna* y de *Ticul*. Este concepto de paisaje edáfico implica criterios morfológicos y pedogenéticos y factores genéticos, temporales



topográficos, litológicos, hidrológicos y climáticos, a partir de los cuales es posible caracterizar e identificar la diversidad edáfica existente en el estado. En este sentido, se utilizan las descripciones macromorfológicas de los sedimentos arcillosos realizados y las facies litológicas asignadas de la zona de extracción de las muestras, para correlacionar las muestras con el paisaje edáfico correspondiente.

Por tanto, teniendo en cuenta, la edad geológica de las facies litológicas asignadas a las tres localidades de extracción de los sedimentos arcillosos, época del Eoceno, se puede determinar que el edafopaisaje, que se formó en esta época en la planicie kárstica de la Península de Yucatán, fue LV/CM/LP (Bautista, F. *et al.*, 2011b) (Figura 44).

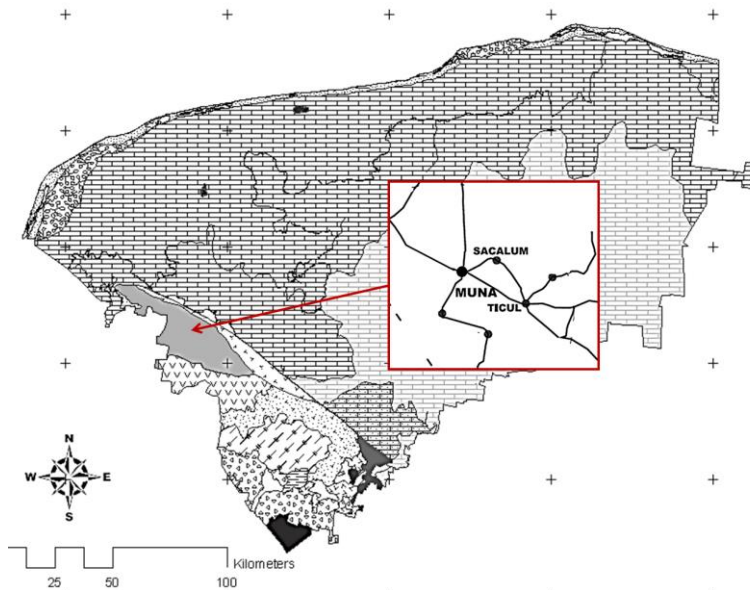


Figura 44. Mapa geopedológico del estado de Yucatán donde se caracteriza que en la zona geográfica de las localidades de *Sak lu'um*, *Muna* y *Ticul* el edafopaisaje es LV/CM/LP. Autor dibujo: Bautista, F. *et al.*, 2011b, modificado per el autor

Así pues, a partir de estas premisas, de las descripciones macromorfológicas de las muestras de sedimento arcilloso realizadas, de las características de diagnóstico del suelo de los grupos de referencia mayas (MSC, 2010) y de la correspondencia con los grupos de suelos de referencia (GSR) (WRB, 2006 y 2007) (Bautista, F. *et al.*, 2010b) se puede afinar más con la contextualización del paisaje edáfico y determinar que: las muestras de la localidad de *Sak lu'um* corresponden a leptosol gléyico lítico (calcáreo) (**LPglli(ca)**) según los GSR y a

*Sak lu'um* según los MSC; la muestra de la localidad de *Ticul* corresponde a luvisol (**LV**) según los GSR y a *K'ankab lu'um* según los MSC; y, la muestra de *Muna* es difícil de asignarle un tipo de paisaje edáfico, ya que las características macromorfológicas, sobre todo el croma de esta, blanco-grisáceo, no coincide con las descripciones tipológicas del edafopaisaje que corresponde a la zona que nos ocupa. Aunque, el que sí que se puede decir es que la caracterización químico-mineralógica nos determina que esta muestra forma parte de suelos interstratificados de montmorillonita-clorita rica en Al y Mg, arcilla detrítica que se forma por el transporte y la sedimentación de detritus.

### **1.1.3.2. Caracterización de los estucos de la pintura mural maya**

#### **1.1.3.2.1. Capas de preparación de los estucos**

El estudio de las capas de preparación de los estucos ha partido de su descripción organoléptica, para seguir con su estudio estratigráfico mediante la microscopía óptica (MO) y una descripción petrográfica mediante la microscopía óptica de polarización (MOP). A parte, se ha realizado un análisis granulométrico, de una serie de muestras seleccionadas previamente, para poder determinar la dosificación del mortero usado para la manufactura de estas capas de preparación. La caracterización químico-mineralógica se ha realizado mediante la difracción de rayos-x (DRX) y la microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX).

##### **1.1.3.2.1.1. Descripción organoléptica**

La descripción organoléptica de las capas de preparación de los estucos de los sitios arqueológicos estudiados permite establecer dos grandes grupos de morteros, en función de la tonalidad del conglomerante, blanco u ocre, y en función de la existencia o no de diversidad de tonalidades del árido, tal como sigue (Figura 45a y b). Por una parte, los morteros de las capas de preparación que presentan una tonalidad más blanquecina del conglomerante son las que corresponden a las muestras de estuco de los sitios arqueológicos de *Ek'Balam* (EB), de *Chichén Itzá* (CI) y de *Kulubá* (KU), los cuales también responden a una tonalidad homogénea del árido seleccionado, similar a la del conglomerante. Por otra parte, por lo que respecta a los morteros de las capas de preparación que presentan una tonalidad más ocre del conglomerante, se debe establecer una subdivisión entre, los de tonalidad ocre más clara, que corresponden a las muestras de estucos de los sitios arqueológicos de *El Tabasqueño* (ET), de *Dzibilnocac* (DZ), de *D'zula* (DL) y de *Acanceh* (AC), que al mismo tiempo, tienen un árido de tonalidades variadas, frente de los de tonalidad ocre más fuerte, que corresponden a las muestras de estucos de los sitios arqueológicos de *Sta. Rosa Xtampak* (SR), de *Chacmultún* (CH) y de *Mulchic* (MU), que al mismo tiempo, tienen un árido de tonalidad homogénea, similar a la del conglomerante.

En primera instancia, se puede suponer que la diferencia de tonalidad, dada en el conglomerante, puede ser debida a la diversidad de tonalidades que nos ofrece la diversidad litológica de la Península de Yucatán, desde rocas calizas con tonalidades blancas, blanco-grisáceas, blanco-amarillentas, crema y, incluso, rojizas (Duch, J., 1988). A parte, la observación de una tonalidad

homogénea del árido se da, a grandes rasgos, cuando el material seleccionado para dicha función tan sólo es el *sascab*, el cual puede adquirir diferentes tonalidades dependiendo de la zona de extracción, desde tonalidades blancas, blanco-amarillentas, amarillas y rojizas (Duch, J., 1988; Villaseñor, I., 2010). También, la observación de un árido de colores diversos se correlaciona más con el uso de nuevos elementos asociados al *sascab*, tal como se especifica en el apartado 1.1.1.4 (*La composición mineral de los estucos en la zona maya*) (Magaloni, D., 1996, 2001; Hansen, E., *et al.*, 1995, 1997, 2002; Mateos, F.Y., 1997; Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006 y 2010; García-Solís *et al.*, 2006; Goodall, Á., *et al.* 2007; Villaseñor, I., *et al.*, 2008, 2009, 2010; Villaseñor, I., 2010); así como al aprovechamiento de los materiales disponibles localmente (Barba, L., 2013) y, en menor medida, a una tecnificación por parte de los mayas que se fue diferenciando en los diferentes períodos históricos prehispánicos.

*Descripciones organolépticas de los estucos de la figura 45a y b*

**SR-7:** capa pictórica de color rojo muy erosionada. Presencia de eflorescencias salinas que provocan su alteración; capa de preparación de mortero de color ocre claro compacto con poco árido. Presencia de subflorescencias que provocan la descohesión de los componentes del mortero. Además, se observan restos vegetales en el interior de la capa; **SR-en:** capa superficial de alteración de aspecto marronoso. Se ven restos vegetales cubriendo una capa compacta marronosa, de aspecto cristalino; capa de preparación de mortero de color ocre claro compacta y con poco árido; **ET-2A:** capa pictórica de color azul-aigua. El color prácticamente es inapreciable, solo se pueden observar pequeños restos, en la parte izquierda. La pérdida del color, nos deja ver el bruñido realizado en el mortero destinado a recibirlo; capa de preparación intermedia de mortero de color blanco bastante resistente; capa de preparación interna de mortero, también de aspecto blanquecino. La diferencia entre las dos capas de preparación de mortero, a simple vista, viene marcada por una línea divisoria de ejecución de trabajo; **ET-9B:** capa pictórica de color verde aceituna. El color de esta capa, se está escamando. La pérdida del color, nos deja ver el bruñido realizado en el mortero destinado a recibirlo; capa de preparación intermedia de mortero de color blanco bastante resistente. El árido de esta capa presenta diferentes tonalidades; capa de preparación interna de mortero, también de aspecto blanquecino. La diferencia entre las dos capas de preparación de mortero, a simple vista, viene marcada por una línea divisoria de ejecución de trabajo; **ET-9/7:** capa pictórica, por la parte izquierda de color rojo y, por la parte derecha de color verde azul. El color de esta capa, se está escamando. La pérdida del color, nos deja ver el bruñido realizado en el mortero destinado a recibirlo; capa de preparación interna de mortero de color blanco bastante resistente. El árido de esta capa presenta diferentes tonalidades; **DZ-2:** capa pictórica de color azul. El color de esta capa, se está escamando. La pérdida del color, nos deja ver el bruñido realizado en el mortero destinado a recibirlo; capa de preparación intermedia de mortero de color blanco bastante resistente. El árido de esta capa presenta diferentes tonalidades; capa de preparación interna de mortero con un aspecto similar al de la capa intermedia: de color blanco con árido de diferentes tonalidades. La diferencia entre las dos capas de preparación de mortero, a simple vista, viene marcada por una línea divisoria de ejecución de trabajo;



Figura 45a. Fotografías de la sección transversal de las muestras de estucos de los sitios arqueológicos seleccionados: SR, ET, DZ, CH, DL y MU

**CH-en/mo:** capa superficial de mortero de color blanco translúcido, muy compacta, de aspecto cristalino. No se observa la presencia de árido. En la superficie, se aprecian restos de eflorescencias salinas; capa interna de mortero de color ocre bastante compacto y resistente, con muy poca cantidad de árido. En la parte de abajo de la muestra, se observan eflorescencias salinas que cubren, prácticamente, toda la superficie; **DL-mo/en:** capa de preparación de mortero de color blanco bastante compacto y cristalino, con muy poca cantidad de árido, la cual está totalmente alterada por depósitos salinos pulverulentos, de aspecto blanquecino; **MU-6**<sup>109</sup>: capa pictórica de color negro. El color de esta capa, se está escamando. La pérdida del color, nos deja ver un color ocre, subyacente al negro; capa de preparación intermedia de mortero de color blanco bastante resistente. El árido de esta capa de preparación presenta diferentes tonalidades; capa de preparación interna de mortero de color ocre, de aspecto poroso. El árido presente en esta capa se ve de tonalidad también ocre. La diferencia entre las dos capas de mortero, a simple vista, viene marcada por el color; **MU-7:** capa pictórica de color rojo oscuro. A lo largo de toda esta capa pictórica se observa la presencia de pequeños cristales de sales; capa de preparación interna de mortero de color ocre, de aspecto poroso. El árido presente en esta capa de preparación se ve de tonalidad ocre; **MU-8A:** capa pictórica de color amarillo ocre con una línea de dibujo negro. Se observa que la capa pictórica se está escamando dejando a la luz el bruñido de la capa de mortero subyacente; capa de preparación interna de mortero de color ocre, de aspecto poroso. El árido presente en esta capa de preparación se ve de tonalidad ocre; **MU-9A:** capa pictórica de color verde. Se observa que la capa pictórica se está escamando dejando a la luz el bruñido de la capa de mortero subyacente; capa de preparación interna de mortero de color ocre, de aspecto poroso. El árido presente en esta capa de preparación se ve de tonalidad ocre; **EB-2:** capa pictórica de color azul. Se observa que la capa pictórica se está escamando dejando a la luz una capa de color naranja y, subyacente a esta, el bruñido de la capa de mortero que recibe el color. Por tanto, en este caso, es probable que se observen dos capas pictóricas; capa de preparación interna de mortero de color blanco, resistente y poco poroso; **EB-5A:** capa pictórica de color rojo-anaranjado. El color de esta capa, se está escamando. La pérdida del color nos deja ver el bruñido del mortero subyacente; capa de preparación intermedia de mortero de color blanco bastante resistente. El árido de esta capa de preparación presenta una tonalidad bastante homogénea; capa de preparación interna de mortero de color *beige*, de aspecto bastante resistente. El árido presente en esta capa de preparación también se ve de tonalidad homogénea. La diferencia entre las dos capas de preparación de mortero, a simple vista, viene marcada por el color; **EB-7:** capa pictórica de color rojo oscuro. El color de esta capa, se está escamando. La pérdida del color nos deja ver el bruñido del mortero subyacente; capa de preparación intermedia de mortero de color blanco bastante resistente. El árido de esta capa de preparación presenta una tonalidad bastante homogénea; capa de preparación interna de mortero de color *beige*, de aspecto bastante resistente. El árido presente en esta capa de preparación presenta tonalidades diferentes. La diferencia entre las dos capas de preparación de mortero, a simple vista, viene marcada por el color; **CI-2:** capa pictórica de color azul. El color de esta capa, se está escamando. La pérdida del color nos deja ver el bruñido del mortero subyacente; capa de preparación interna de mortero de color blanco resistente. El árido de esta capa de preparación presenta una tonalidad bastante homogénea;

---

<sup>109</sup> En las muestras MU-6, MU-7: El color rojo que se observa siguiendo el contorno de la muestra es rotulador. Estos restos se han podido originar durante la manipulación de las muestras al ser catalogadas por el museo en el que se ubican.

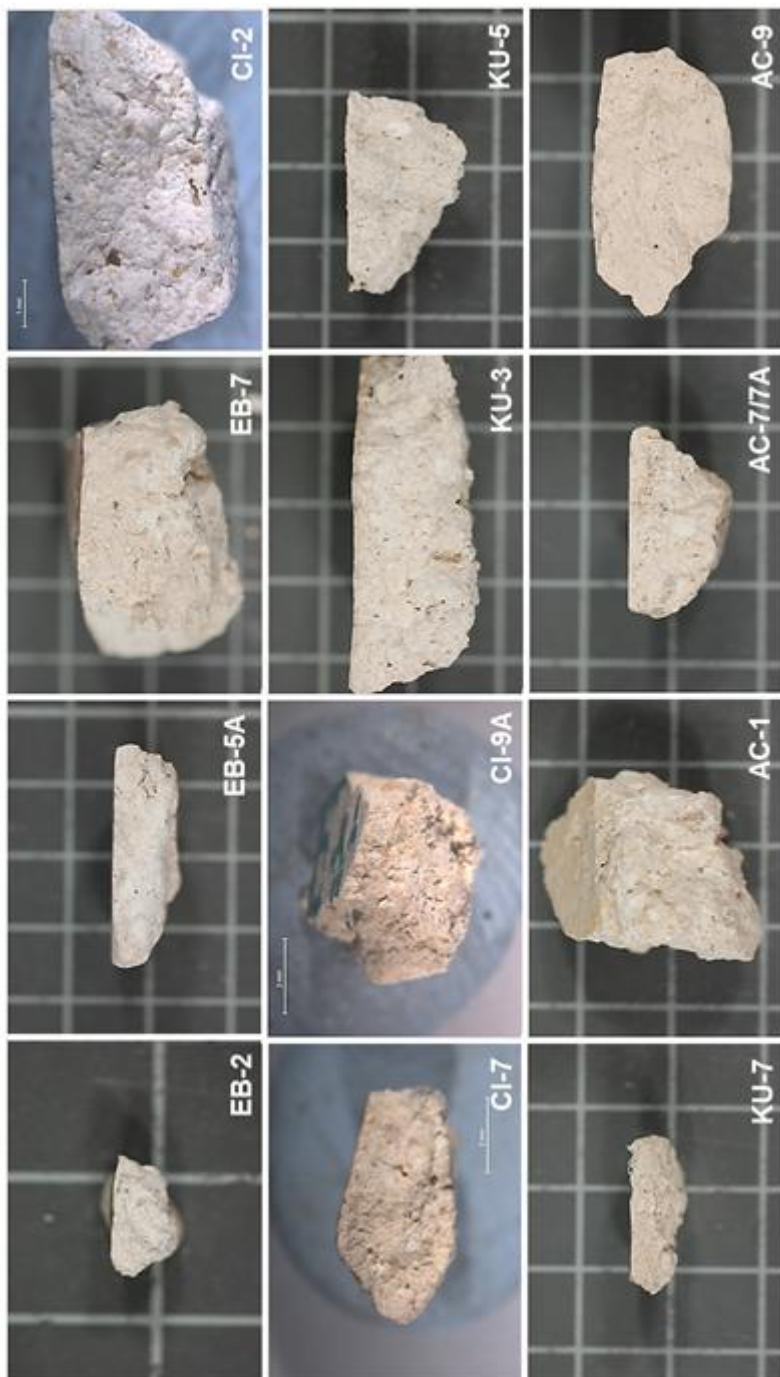


Figura 45b. Fotografías de la sección transversal de las muestras de estucos de los sitios arqueológicos seleccionados: EB, CI, KU y AC

**CI-7:** capa pictórica de color rojo. El color de esta capa, se está escamando. La pérdida del color nos deja ver el bruñido del mortero subyacente; capa de preparación interna de mortero de color blanco bastante resistente. El árido de esta capa de preparación presenta una tonalidad bastante homogénea; **CI-9A:** capa pictórica de color verde. El color de esta capa, se está escamando. La pérdida del color nos deja ver el bruñido del mortero subyacente; capa de preparación interna de mortero de color blanco bastante resistente. El árido de esta capa de preparación presenta una tonalidad bastante homogénea; **KU-3:** capa pictórica de color blanco. La observación del acabado bruñido de esta capa nos plantea la posibilidad de que se trate de una capa que ha perdido toda la policromía o de una capa de preparación de mortero pensada como enlucido sin color; capa de preparación interna de mortero de color ocre bastante compacto. El árido de esta capa de preparación presenta una tonalidad bastante homogénea. Se pueden observar la presencia de restos vegetales distribuidos, aleatoriamente, por la capa de preparación interna del mortero y en la parte de abajo de la muestra; **KU-5:** capa pictórica de color amarillo-naranja. Esta capa presenta una descamación del color y unos pequeños orificios de alteración; capa de preparación interna de mortero de tonalidad blanquecina bastante resistente. El árido de esta capa de preparación presenta una tonalidad bastante homogénea. Se pueden observar la presencia de restos vegetales distribuidos, aleatoriamente, por la capa de preparación interna del mortero y en la parte de abajo de la muestra; **KU-7:** capa pictórica de color rojo oscuro. Esta capa presenta una descamación del color y una alteración provocada por eflorescencias salinas y restos vegetales, por toda la capa; capa de preparación interna de mortero de tonalidad ocre bastante resistente. El árido de esta capa de preparación presenta una tonalidad bastante homogénea. Se pueden observar la presencia de restos vegetales distribuidos, aleatoriamente, por la capa de preparación interna del mortero y en la parte de bajo de la muestra; **AC-1:** capa pictórica de color amarillo intenso. Esta capa presenta una descamación del color y una alteración provocada por unos pequeños orificios; capa de preparación interna de mortero de tonalidad ocre claro, bastando resistente y poroso. El árido de esta capa de preparación presenta tonalidades diversas y un tamaño de grano grueso; **AC-7/7A:** capa pictórica de color rojo intenso sobre rojo anaranjado claro. Esta capa presenta una descamación del color; capa de preparación interna del mortero de tonalidad ocre claro, bastante resistente y poroso. El árido de esta capa de preparación presenta una tonalidad bastante homogénea y un tamaño de grano de medio a grueso; **AC-9:** capa pictórica de color verde claro. Esta capa presenta una pérdida casi total del color por descamación, dejando a la luz el bruñido del mortero subyacente; capa de preparación interna del mortero de tonalidad ocre claro, bastante resistente y poroso. El árido de esta capa de preparación presenta tonalidades diversas y un tamaño de grano de fino a medio.



### 1.1.3.2.1.2. Estudio estratigráfico

El estudio estratigráfico mediante la microscopía óptica de las secciones transversales elaboradas a partir de las muestras de estucos de los sitios arqueológicos seleccionados por una parte, permite distinguir con claridad las diferentes capas de preparación de mortero que configuran la estratigrafía del estuco, la relación entre ellas, el tipo de contacto que las separa, su adherencia entre sí y su espesor. Por otra parte, se puede determinar la tonalidad, la forma, el tamaño de los granos del árido y la distribución de este respecto del conglomerante. Por último, la tonalidad del conglomerante, como está distribuido, su homogeneidad y cuál es su relación con el árido.

En el momento de presentar los resultados obtenidos del estudio estratigráfico, hay que tener en cuenta que no se dispone de la sección estratigráfica completa de los estucos. Esta circunstancia, establece que hay que presentar dos capas de preparación de mortero y otros que nada más presentan una capa de preparación.

Los resultados del estudio estratigráfico confirman las observaciones organolépticas de las muestras de estuco por lo que respecta a la tonalidad del conglomerante y la del árido; por lo tanto, se mantiene la división que se establece de los estucos en el apartado anterior. Además, en términos generales, los resultados del estudio estratigráfico nos aportan la información siguiente (Figura 46a y b):

- El contacto entre las capas de preparación de los estucos es limpio, presentando una buena adherencia entre ellas. La diferencia entre las capas viene dada por la tonalidad del conglomerante.
- La media del espesor de la primera capa de preparación (capa de preparación de mortero que se encuentra justo por debajo de la capa pictórica) de los estucos es de unos 5 mm. La media del espesor de la segunda capa de preparación no se puede establecer debido a que la estratigrafía del estuco no llega al muro.
- En general, el tamaño de grano del árido del mortero se establece entre el tamaño de arena media (0,250-0,500 mm) y el tamaño de arena fina (0,250-0,125 mm) en los estucos de los sitios arqueológicos de *Sta. Rosa Xtampak*, de *El Tabasqueño*, de *Dzibilnocac*, de *Chacmultún*, de *Chichén Itzá* y de *D'zula*. Aun así, los estucos de los sitios arqueológicos de *Mulchic* y de *Ek'Balam* presentan, además, alguna partícula de tamaño de arena gruesa (0,500-1 mm)

y de tamaño de arena muy gruesa (1-2 mm), y los estucos de los sitios arqueológicos de *Kulubá* y de *Acanceh* presentan, además, grava fina (2-4 mm).

- Con respecto a la forma del árido, en general, los estucos que presentan un tamaño de grano, de arena media a arena fina, presentan una forma de grano de redondeada a subredondeada. En cambio, los estucos que presentan un tamaño de grano superior, como arena gruesa y arena muy gruesa-grava fina, presentan una forma de grano de subredondeada a subangulosa.

*Estudio estratigráfico de las capas de preparación de los estucos, de la superficie al interior, de la figura 46a i b*

**SR-7:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 2,86 mm, como mínimo; el árido usado en la manufactura de este mortero tiene una composición muy similar a la del conglomerante. Se puede apreciar sin embargo, que este responde a una distribución de tamaño de arena gruesa (0,500-1 mm) a arena media (0,250-0,500 mm), de forma subangulosa; el conglomerante tiene una tonalidad crema; **SR-en:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 3,51 mm, como mínimo; el árido usado en la manufactura de este mortero presenta una tonalidad blanquecina. Se puede apreciar que este responde a una distribución de tamaño de arena media (0,250-0,500 mm) a arena fina (0,125-0,250 mm), de forma redondeada y subredondeada; el conglomerante tiene una tonalidad crema; **ET-2A:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 5,09 mm; el árido usado en la manufactura de este mortero presenta una tonalidad variada. Se puede apreciar que este responde a una distribución tres veces más, de tamaño de arena media (0,250-0,500 mm) con respecto a una de arena fina (0,125-0,250 mm), de forma subredondeada a subangulosa; el conglomerante tiene una tonalidad blanca; segunda capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 2,5 mm, como mínimo; el árido usado en la manufactura de este mortero presenta una tonalidad variada. Se puede apreciar que este responde a una distribución de tamaño de arena media (0,250-0,500 mm), de forma subredondeada a subangulosa; el conglomerante tiene una tonalidad blanca; **ET-9B:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 6,5 mm; el árido usado en la manufactura de este mortero presenta una tonalidad variada. Se puede apreciar que este responde a una distribución, casi en su totalidad, de tamaño de arena media (0,250-0,500 mm) y algún de tamaño de arena gruesa (0,500-1 mm) y arena muy gruesa (1-2 mm), de forma subredondeada a redondeada; el conglomerante tiene una tonalidad *beige* suave; segunda capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 2,05 mm, como mínimo; el mortero de esta capa responde a las mismas características que la primera capa de preparación; **ET-9/7:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 6,51 mm; el árido usado en la manufactura de este mortero presenta una tonalidad variada. Se puede apreciar que este responde a la siguiente distribución: tres veces más de árido de tamaño de arena media (0,250-0,500 mm), respecto el de tamaño de arena fina (0,125-0,250 mm) y el de tamaño de arena gruesa-muy gruesa (0,500-2 mm). Este árido presenta formas de subredondeadas a redondeadas; el conglomerante tiene una tonalidad *beige*;

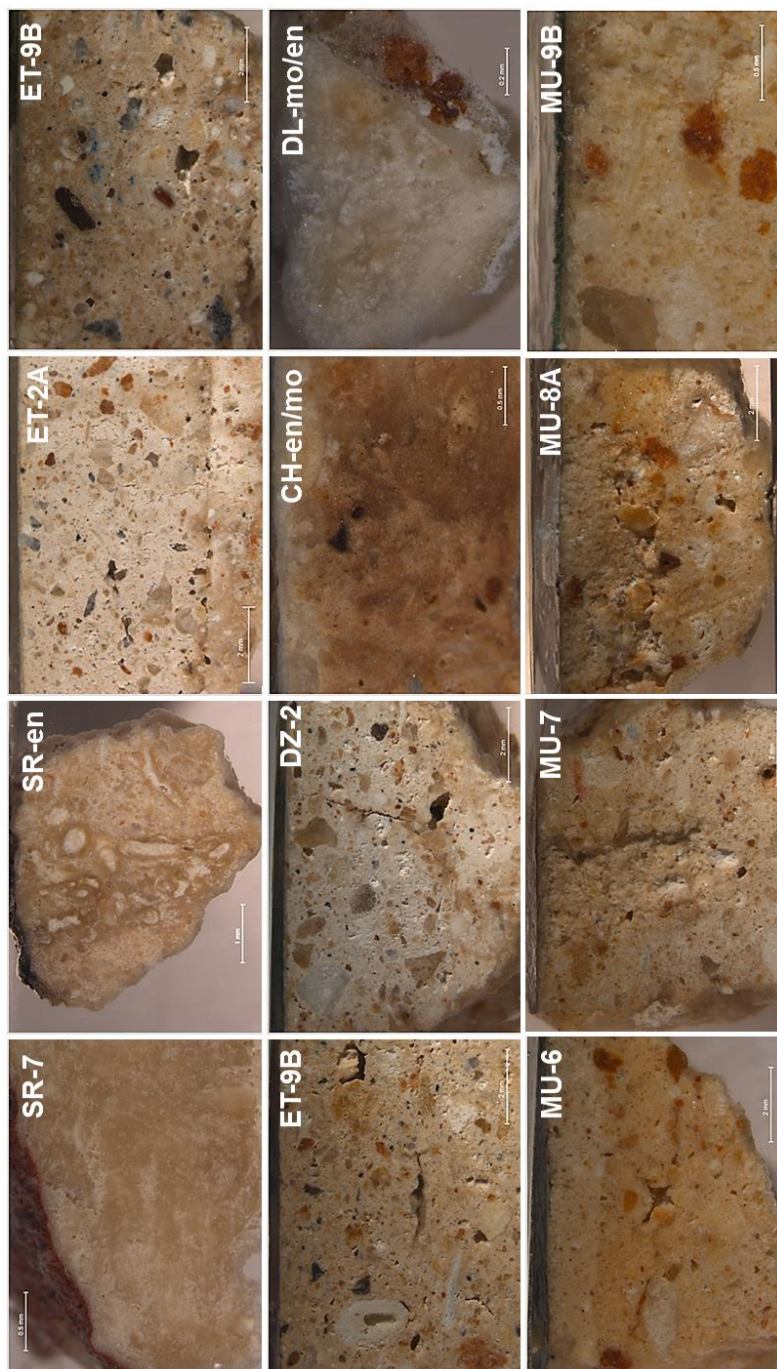


Figura 46a. Microfotografías, de la sección estratigráfica de las muestras de estucos: SR-7 (8x); SR-en (12x); ET-2A (8x), ET-9B (8x); ET-9/7 (8x); DZ-2 (8x); CH-en/mo (25x); DL-mo/en (50x); MU-6 (8x); MU-7 (8x); MU-8a (8x) y MU-9A (32x)

**DZ-2:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 0,82 mm; el árido usado en la manufactura de este mortero presenta una tonalidad variada. Se puede apreciar que este responde a una distribución equitativa entre el de tamaño de arena media (0,250-0,500 mm), el de tamaño de arena fina (0,125-0,250 mm) y el de tamaño de arena muy fina (0,0625-0,125 mm). Este árido presenta una forma de subredondeada a redondeada; el conglomerante es de tonalidad *beige*; segunda capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 0,5 mm, como mínimo; las características de este mortero son equivalentes al de la primera capa de preparación;

**CH-en/mo:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 0,08 mm; el árido usado en la manufactura de este mortero es prácticamente inexistente. Está constituida solamente por el conglomerante, de tonalidad blanca; segunda capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 2,02 mm, como mínimo; el árido usado presenta una tonalidad muy homogénea similar a la del conglomerante. Este hecho dificulta su observación. Aun así, se aprecia alguna partícula marronosa, de tamaño de arena fina (0,125-0,250 mm) y de forma subangulosa; el conglomerante tiene una tonalidad crema-marronosa;

**DL-mo/en:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 1 mm, como mínimo; el árido usado es prácticamente inexistente, solo se observan partículas rojizas. Es una capa muy compacta; el conglomerante presenta una tonalidad blanca;

**MU-6:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 1,35 mm; el árido usado en la manufactura de este mortero es de tonalidad bastante homogénea y similar a la del conglomerante; el tamaño del árido es de arena fina (0,125-0,250 mm), con una forma redondeada; la tonalidad del conglomerante es crema suave; segunda capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 4,04 mm, como mínimo; el árido usado presenta una tonalidad muy homogénea, similar a la del conglomerante. El tamaño del árido se encuentra entre la arena media (0,250-0,500 mm) y la arena fina (0,125-0,250 mm) en partes iguales prácticamente, con una forma de subredondeada a redondeada; el conglomerante es de tonalidad crema;

**MU-7:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 6,45 mm, como mínimo; el árido usado presenta una tonalidad muy homogénea, similar a la del conglomerante. El tamaño del árido se encuentra entre la arena media (0,250-0,500 mm) y la arena fina (0,125-0,250 mm) a partes iguales, con un cierto porcentaje de arena gruesa (0,500-1 mm) y de arena muy gruesa (1-2 mm), con una forma de subredondeada a redondeada; el conglomerante es de tonalidad crema;

**MU-8:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 5,18 mm, como mínimo; el árido usado presenta una tonalidad muy homogénea, similar a la del conglomerante. El tamaño del árido se encuentra entre la arena media (0,250-0,500 mm) y la arena fina (0,125-0,250 mm) a partes iguales, con un cierto porcentaje de arena gruesa (0,500-1 mm) y de arena muy gruesa (1-2 mm), con una forma de subredondeada a redondeada; el conglomerante tiene una tonalidad crema ocre;

**MU-9A:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 2,96 mm, como mínimo; el árido usado presenta una tonalidad muy homogénea, similar a la del conglomerante. El tamaño del árido de arena media (0,250-0,500 mm) es muy superior a la de tamaño de arena fina (0,125-0,250 mm) con una forma redondeada; el conglomerante tiene una tonalidad crema ocre. Hay que especificar, que además, en todas las muestras de MU se observan, como árido: nódulos blancos, fragmentos de tonalidad blanquecina, de tamaño de arena gruesa (0,500-1 mm) y partículas muy pequeñas de tonalidad rojiza;

**EB-2:** primera capa de preparación: el tamaño del espesor de la capa es de 5,00 mm, como mínimo; el árido usado presenta una tonalidad muy homogénea, similar a la del conglomerante con alguno de tonalidad más ocre. El tamaño del árido de arena media (0,250-0,500 mm) es muy superior al de tamaño de arena fina (0,125-0,250 mm) con alguno de tamaño de arena gruesa (0,500-1 mm) y de arena muy gruesa (1-2 mm), con una forma redondeada; el conglomerante tiene una tonalidad blanca;

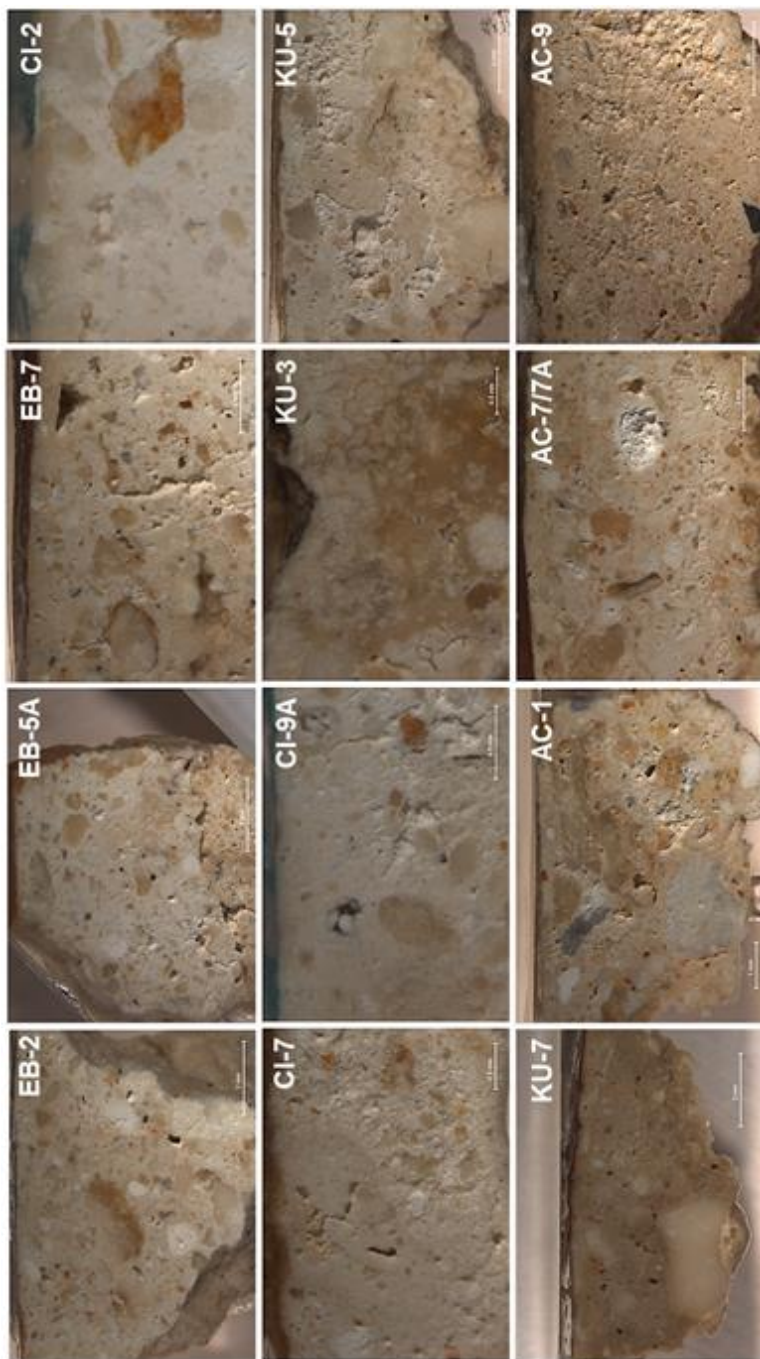


Figura 46b. Microfotografías, de la sección estratigráfica de las muestras de estucos: EB-2 (8x); EB-5A (8x); EB-7 (8x); CI-2 (10x); CI-7 (20x); CI-9A (32x); KU-3 (20x); KU-5 (8x); KU-7 (8x); AC-1 (10x); AC-7/7A (8x) y AC-9 (8x)

**EB-5A:** primera capa de preparación: el tamaño del espesor de la capa es de 4,97 mm; el árido usado presenta una tonalidad muy homogénea, similar a la del conglomerante con alguno de tonalidad más ocre. El tamaño del árido de arena media (0,250-0,500 mm) se reparte con el de tamaño de arena fina (0,125-0,250 mm) equitativamente, con alguno de tamaño de arena gruesa (0,500-1 mm) y de arena muy gruesa (1-2 mm), con una forma redondeada y subredondeada; el conglomerante tiene una tonalidad blanca; segunda capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 1,5 mm, como mínimo; el árido presenta una distribución similar a la de la primera capa de preparación, pero sin la presencia de tamaño de arena gruesa, con formas también redondeadas y subredondeadas; el conglomerante tiene una tonalidad *beige*; **EB-7:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 6,16 mm, como mínimo; el árido usado presenta una tonalidad muy homogénea, similar a la del conglomerante con alguno de tonalidad más ocre. El tamaño del árido de arena media (0,250-0,500 mm) se reparte con el de tamaño de arena fina (0,125-0,250 mm) equitativamente, con alguno de tamaño de arena gruesa (0,500-1 mm) y de arena muy gruesa (1-2 mm), con una forma redondeada y subredondeada; el conglomerante tiene una tonalidad blanca; **CI-2:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 2,75 mm, como mínimo; el árido usado presenta una tonalidad muy homogénea, similar a la del conglomerante con alguno de tonalidad más ocre. El tamaño del árido de arena media (0,250-0,500 mm) se reparte con el de tamaño de arena fina (0,125-0,250 mm) equitativamente, con una forma redondeada y subredondeada; el conglomerante tiene una tonalidad blanca; **CI-7:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 2,5 mm, como mínimo; el árido usado presenta una tonalidad muy homogénea, similar a la del conglomerante. El tamaño del árido de arena media (0,250-0,500 mm) se reparte con el de tamaño de arena fina (0,125-0,250 mm) equitativamente, con una forma redondeada y subredondeada; el conglomerante tiene una tonalidad blanca; **CI-9A:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 3 mm, como mínimo; el árido usado presenta una tonalidad muy homogénea, similar a la del conglomerante con alguno de tonalidad ocre. El tamaño del árido de arena media (0,250-0,500 mm) se reparte con el de tamaño de arena fina (0,125-0,250 mm) equitativamente, con una forma redondeada y subredondeada; el conglomerante tiene una tonalidad blanca; **KU-3:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 3,55 mm, como mínimo; el árido usado presenta una tonalidad blanca, con respecto a la del conglomerante que es de tonalidad ocre. El tamaño del árido de arena media (0,250-0,500 mm) se reparte con el de tamaño de arena gruesa (0,500-1 mm) equitativamente, con una forma redondeada; **KU-5:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 5,21 mm, como mínimo; el árido usado presenta una tonalidad similar a la del conglomerante que es de tonalidad blanca. El tamaño del árido de arena fina (0,125-0,250 mm) se reparte con el de tamaño de arena media (0,250-0,500 mm) y el de arena gruesa (0,500-1 mm) bastante equitativamente, con algún grano de arena muy gruesa (1-2 mm) y grava fina (2-4 mm), con una forma de subredondeada a subangulosa; **KU-7:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 3,5 mm, como mínimo; el árido usado presenta una tonalidad blanca con respecto a la del conglomerante que es de tonalidad marronosa. El tamaño del árido de arena media (0,250-0,500 mm) se reparte con el de tamaño de arena fina (0,125-0,250 mm) bastante equitativamente, con algún grano de arena gruesa (0,500-1 mm), con una forma de subredondeada a subangulosa; **AC-1:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 3,94 mm, como mínimo; el árido usado presenta una variedad de tonalidades, desde blancos, ocre, hasta grises. El tamaño del árido de arena media (0,250-0,500 mm) se reparte con el de tamaño de arena fina (0,125-0,250 mm) bastante equitativamente, con un porcentaje considerable de árido de tamaño de arena gruesa (0,500-1 mm), con una forma de subredondeada a subangulosa; la tonalidad del conglomerante es crema; **AC-**

**77A:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 6,28 mm, como mínimo; el árido usado presenta una variedad de tonalidades, desde blancos hasta ocre. El tamaño del árido de arena media (0,125-0,250 mm) se reparte con el de tamaño de arena fina (0,125-0,250 mm) bastante equitativamente, con un porcentaje pequeño de árido de tamaño de arena gruesa (0,500-1 mm), con una forma de subredondeada a subangulosa; la tonalidad del conglomerante es crema; **AC-9:** primera capa de preparación: la media del espesor de la capa es de 6,00 mm, como mínimo; el árido usado presenta una variedad de tonalidades, desde blancos hasta ocre. El tamaño del árido de arena media (0,125-0,250 mm) se reparte con el de tamaño de arena fina (0,125-0,250 mm) bastante equitativamente, con un porcentaje pequeño de árido de tamaño de arena gruesa (0,500-1 mm), con una forma de subredondeada a subangulosa; la tonalidad del conglomerante es crema.

### 1.1.3.2.1.3. Estudio granulométrico

El estudio granulométrico complementa el estudio estratigráfico. Este estudio permite determinar, a partir de las curvas granulométricas que se obtienen, la distribución granulométrica de los morteros de las capas de preparación de los estucos de los sitios arqueológicos seleccionados, la dosificación usada para manufacturarlos y permite establecer divergencias y/o correlaciones entre las diferentes técnicas de manufactura de éstos.

El estudio de la granulometría de los morteros de las capas de preparación de los estucos, se realiza de 6 muestras de estucos representativas de tres de los sitios arqueológicos seleccionados (*Ek'Balam, Kulubá y Acanceh*). La selección de las muestras se realiza, teniendo en cuenta, aquellas muestras de las que se dispone mayor cantidad con la finalidad de obtener unos resultados fiables. El ensayo se realiza según la norma europea UNE-EN 1015-1<sup>110</sup>. Las muestras de estucos escogidas para realizar el estudio granulométrico son: EB-mo; EB-3; KU-3; KU-5; AC-1 y AC-2.

El procedimiento experimental que se sigue para llevar a cabo el ensayo es el siguiente:

1. Secado de las muestras de estuco en la estufa a 60°C hasta obtener un peso constante.
2. Disgregación del conglomerante del árido de manera manual, de las diferentes fracciones granulométricas, previa separación de la capa pictórica de

---

<sup>110</sup> Norma UNE-EN 1015-1: *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 1: Determinación de la distribución granulométrica (por tamizado)*, 1998. AENOR.



cada muestra de estuco, hasta llegar al tamaño máximo que permite la acción manual.

3. Tamizado de las fracciones granulométricas obtenidas para cada muestra de estuco, usando el juego de tamices normativos especificados en la norma UNE-EN 1015-1. La luz de malla de la serie de tamices usados son: 2,5 mm, 1,25 mm, 1 mm, 0,8 mm, 0,25 mm, 0,125 mm, 0,1 mm, 0,080 mm y 0,063 mm. Una vez finalizado el tamizado, se obtienen, de cada muestra de estuco, las fracciones de mortero retenidas en los diferentes tamices con la luz de malla normalizada.

4. Las cantidades obtenidas en cada tamiz se pesan y se guardan por separado, para posteriores análisis.

5. El último paso, es el tratamiento de los datos obtenidos para poder calcular el porcentaje de material que pasa acumulado por cada tamiz, el porcentaje en peso de material retenido en cada tamiz y la dosificación del mortero ensayado. Las curvas granulométricas que se generan de estos datos nos sirven para establecer la distribución modal del árido de las muestras.

Las partículas se clasifican en función de su tamaño en: grava (partículas entre 2 mm y 60 mm); arena (partículas entre 60  $\mu\text{m}$  y 2 mm); limo (partículas entre 2  $\mu\text{m}$  y 60  $\mu\text{m}$ ); y, arcilla (partículas inferiores a 2  $\mu\text{m}$ ).

Los resultados granulométricos obtenidos de las muestras de estucos seleccionadas para el estudio se presentan a continuación:



### Muestra de estuco EB-mo

La curva granulométrica obtenida de la muestra de estuco EB-mo, que se muestra en la figura 47 y sumariada en la tabla 20, presenta una granulometría continua, es decir, existen fracciones de todos los tamaños, comprendidas entre la más pequeña y la más grande, observando una distribución bimodal preferencial del tamaño de grano del árido, entre el tamaño de grano de grava fina - arena muy gruesa (>2,5-1,25 mm) y el tamaño de grano de arena gruesa y media (0,25-0,8 mm). La dosificación del mortero responde a 1:3, una parte de cal por tres partes de árido.

Tabla 20. Distribución granulométrica de la muestra de estuco EB-mo. La zona sombreada se corresponde con la fracción de la muestra considerada como árido

EB-mo Tamiz luz (mm)	Peso retenido (g)		Peso retenido (%)		Pasa (%) acumulado
	Parcial (g)	Acumulado (g)	Parcial (%)	Acumulado (%)	
2,500	2,41	2,41	21,60	21,60	78,40
1,250	2,90	5,32	25,98	47,57	52,43
1,000	0,41	5,73	3,70	51,28	48,72
0,800	0,40	6,13	3,58	54,86	45,14
0,250	2,29	8,42	20,51	75,37	24,63
0,125	1,13	9,55	10,11	85,48	14,52
0,100	0,32	9,88	2,90	88,38	11,62
0,080	0,42	10,30	3,79	92,18	7,82
0,063	0,31	10,61	2,75	94,93	5,07
<0,063	0,57	11,18	5,07	100,00	0,00

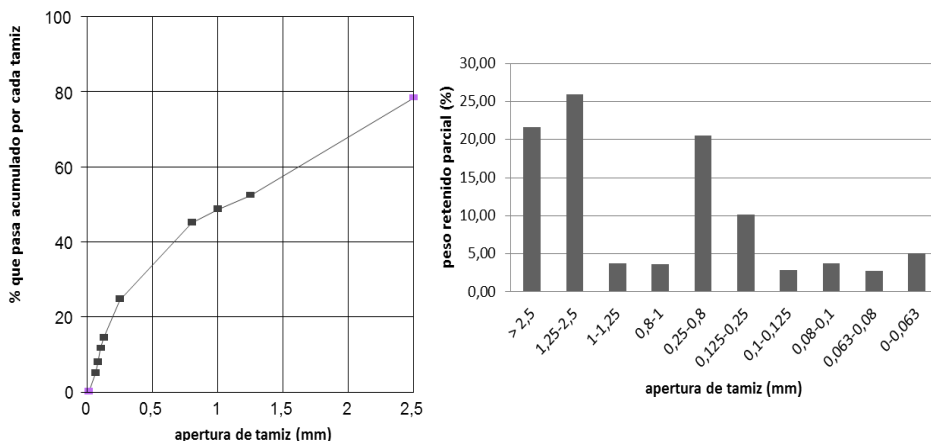


Figura 47. Curva granulométrica y porcentaje de material retenido por los tamices de la muestra de estuco EB-mo

### Muestra de estuco EB-3

La curva granulométrica obtenida de la muestra de estuco EB-3, que se muestra en la figura 48 y sumariada en la tabla 21, presenta una granulometría continua, es decir, existen fracciones de todos los tamaños, comprendidas entre la más pequeña y la más grande, observando una distribución bimodal preferencial del tamaño de grano del árido, entre el tamaño de grano de arena muy gruesa (2,5-1,25 mm) y el tamaño de grano de arena gruesa y media (0,25-0,8 mm). La dosificación del mortero responde a 1:2,5, una parte de cal por dos y medias partes de árido.

Tabla 21. Distribución granulométrica de la muestra de estuco EB-3. La zona sombreada se corresponde con la fracción de la muestra considerada como árido

EB-3 Tamiz luz (mm)	Peso retenido (g)		Peso retenido (%)		Pasa (%) acumulado
	Parcial (g)	Acumulado (g)	Parcial (%)	Acumulado (%)	
2,500	0,50	0,50	11,00	11,00	89,00
1,250	1,13	1,63	25,05	36,05	63,95
1,000	0,18	1,80	3,89	39,95	60,05
0,800	0,23	2,03	5,04	44,99	55,01
0,250	1,18	3,21	26,16	71,15	28,85
0,125	0,56	3,78	12,47	83,61	16,39
0,100	0,13	3,90	2,81	86,42	13,58
0,080	0,23	4,14	5,18	91,61	8,39
0,063	0,12	4,26	2,66	94,26	5,74
<0,063	0,26	4,52	5,74	100,00	0,00

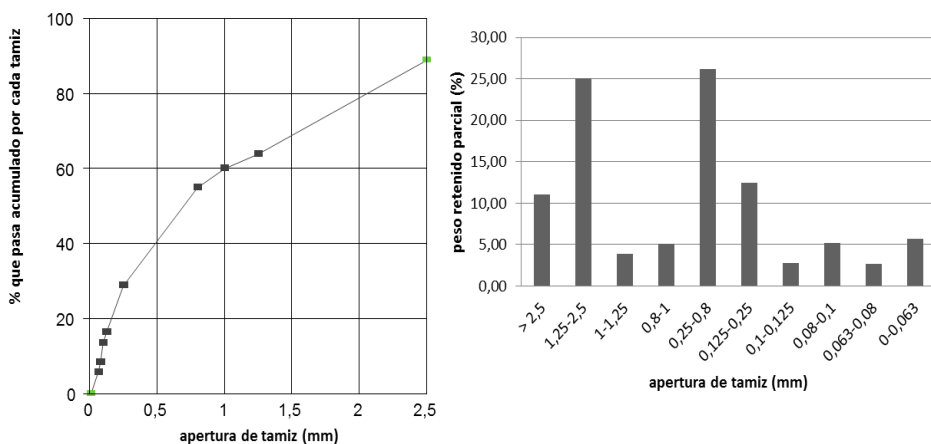


Figura 48. Curva granulométrica y porcentaje de material retenido por los tamices de la muestra de estuco EB-3

### Muestra de estuco KU-3

La curva granulométrica obtenida de la muestra de estuco KU-3, que se muestra en la figura 49 y sumariada en la tabla 22, presenta una granulometría continua, es decir, existen fracciones de todos los tamaños, comprendidas entre la más pequeña y la más grande, observando una distribución bimodal preferencial del tamaño de grano del árido, entre el tamaño de grano de grava fina – arena muy gruesa (>2,5-1,25 mm) y el tamaño de grano de arena gruesa y media (0,25-0,8 mm). La dosificación del mortero está entre 1:2,5 y 1:3, una parte de cal por casi tres partes de árido.

Tabla 22. Distribución granulométrica de la muestra de estuco KU-3. La zona sombreada se corresponde con la fracción de la muestra considerada como árido

KU-3 Tamiz luz (mm)	Peso retenido (g)		Peso retenido (%)		Pasa (%) acumulado
	Parcial (g)	Acumulado (g)	Parcial (%)	Acumulado (%)	
2,500	1,28	1,28	17,36	17,36	82,64
1,250	1,52	2,80	20,52	37,88	62,12
1,000	0,37	3,17	5,00	42,87	57,13
0,800	0,39	3,56	5,33	48,20	51,80
0,250	1,87	5,43	25,28	73,48	26,52
0,125	0,68	6,11	9,26	82,74	17,26
0,100	0,12	6,23	1,64	84,38	15,62
0,080	0,17	6,40	2,26	86,64	13,36
0,063	0,21	6,61	2,81	89,45	10,55
<0,063	0,78	7,39	10,55	100,00	0,00

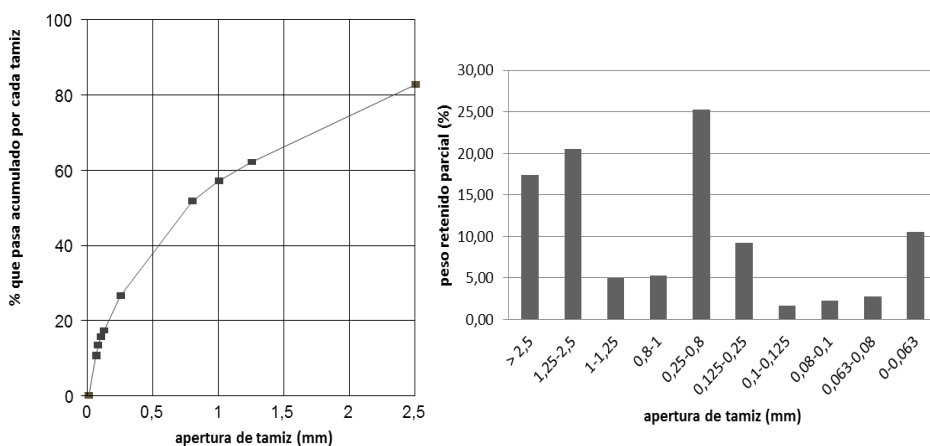


Figura 49. Curva granulométrica y porcentaje de material retenido por los tamices de la muestra de estuco KU-3

### Muestra de estuco KU-5

La curva granulométrica obtenida de la muestra de estuco KU-5, que se muestra en la figura 50 y sumariada en la tabla 23, presenta una granulometría continua, es decir, existen fracciones de todos los tamaños, comprendidas entre la más pequeña y la más grande, observando una distribución bimodal preferencial del tamaño de grano del árido, entre el tamaño de grano de arena muy gruesa (2,5-1,25 mm) y el tamaño de grano de arena gruesa y media (0,25-0,8 mm). La dosificación del mortero está entre a 1:2 y 1:2,5, una parte de cal por casi dos y medias partes de árido.

Tabla 23. Distribución granulométrica de la muestra de estuco KU-5. La zona sombreada se corresponde con la fracción de la muestra considerada como árido

KU-5 Tamiz luz (mm)	Peso retenido (g)		Peso retenido (%)		Pasa (%) acumulado
	Parcial (g)	Acumulado (g)	Parcial (%)	Acumulado (%)	
2,500	1,53	1,53	12,46	12,46	87,54
1,250	2,87	4,41	23,35	35,81	64,19
1,000	0,61	5,02	4,97	40,79	59,21
0,800	0,73	5,75	5,94	46,73	53,27
0,250	2,80	8,55	22,75	69,48	30,52
0,125	1,23	9,78	10,02	79,50	20,50
0,100	0,40	10,18	3,22	82,72	17,28
0,080	0,69	10,87	5,64	88,35	11,65
0,063	0,48	11,35	3,88	92,23	7,77
<0,063	0,96	12,31	7,77	100,00	0,00

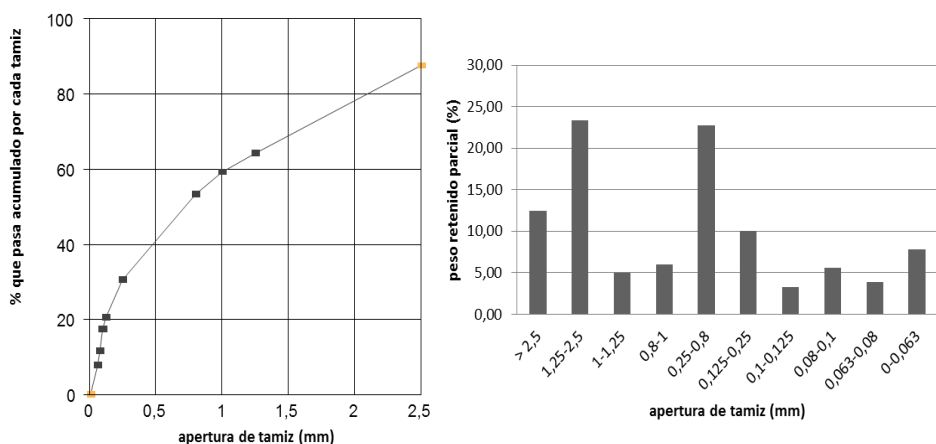


Figura 50. Curva granulométrica y porcentaje de material retenido por los tamices de la muestra de estuco KU-5

*Muestra de estuco AC-1*

La curva granulométrica obtenida de la muestra de estuco AC-1, que se muestra en la figura 51 y sumariada en la tabla 24, presenta una granulometría continua, es decir, existen fracciones de todos los tamaños, comprendidas entre la más pequeña y la más grande, observando una distribución preferencial hacia las fracciones de tamaño de grano del árido, entre el tamaño de grano de grava fina (>2,5 mm) con respecto al tamaño de grano de arena gruesa y media (0,25-0,8 mm). La dosificación del mortero responde a 1:5, una parte de cal por cinco partes de árido.

Tabla 24. Distribución granulométrica de la muestra de estuco AC-1. La zona sombreada se corresponde con la fracción de la muestra considerada como árido

AC-1 Tamiz luz (mm)	Peso retenido (g)		Peso retenido (%)		Pasa (%) acumulado
	Parcial (g)	Acumulado (g)	Parcial (%)	Acumulado (%)	
2,500	13,60	13,60	46,83	46,83	53,17
1,250	4,58	18,18	15,76	62,59	37,41
1,000	0,91	19,09	3,13	65,72	34,28
0,800	1,04	20,13	3,60	69,32	30,68
0,250	4,11	24,25	14,16	83,47	16,53
0,125	1,62	25,86	5,57	89,04	10,96
0,100	1,03	26,90	3,55	92,59	7,41
0,080	0,83	27,72	2,84	95,44	4,56
0,063	0,56	28,29	1,94	97,38	2,62
<0,063	0,76	29,05	2,62	100,00	0,00

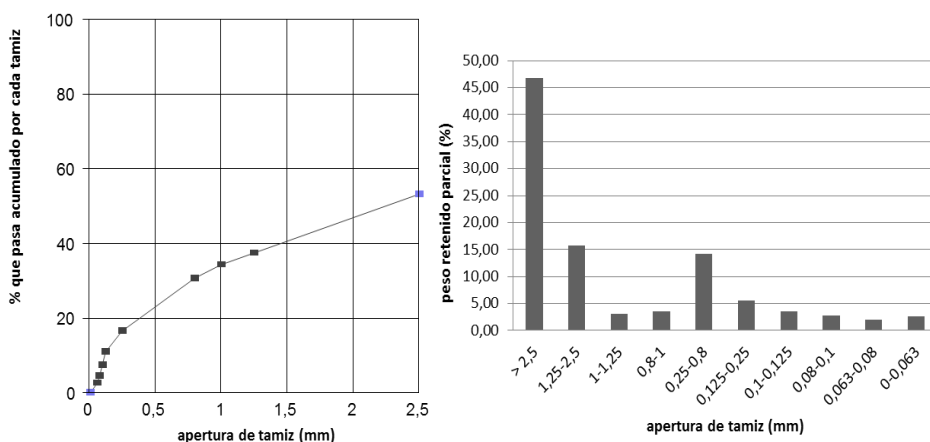


Figura 51. Curva granulométrica y porcentaje de material retenido por los tamices de la muestra de estuco AC-1

### Muestra de estuco AC-2

La curva granulométrica obtenida de la muestra de estuco AC-2, que se muestra en la figura 52 y sumariada en la tabla 25, presenta una granulometría continua, es decir, existen fracciones de todos los tamaños, comprendidas entre la más pequeña y la más grande, observando una distribución preferencial hacia las fracciones de tamaño de grano del árido, entre el tamaño de grano de arena muy gruesa (1,25-2,5 mm) con respecto al tamaño de grano de arena media y gruesa (0,25-0,8 mm). La dosificación del mortero responde a 1:2, una parte de cal por dos partes de árido.

Tabla 25. Distribución granulométrica de la muestra de estuco AC-2. La zona sombreada se corresponde con la fracción de la muestra considerada como árido

AC-2 Tamiz luz (mm)	Peso retenido (g)		Peso retenido (%)		Pasa (%) acumulado
	Parcial (g)	Acumulado (g)	Parcial (%)	Acumulado (%)	
2,500	0,41	0,41	3,33	3,33	96,67
1,250	2,07	2,49	16,63	19,96	80,04
1,000	0,54	3,02	4,31	24,27	75,73
0,800	0,79	3,81	6,35	30,62	69,38
0,250	4,37	8,18	35,09	65,71	34,29
0,125	1,95	10,13	15,64	81,35	18,65
0,100	0,91	11,04	7,32	88,68	11,32
0,080	0,65	11,69	5,23	93,91	6,09
0,063	0,28	11,97	2,26	96,17	3,83
<0,063	0,48	12,45	3,83	100,00	0,00

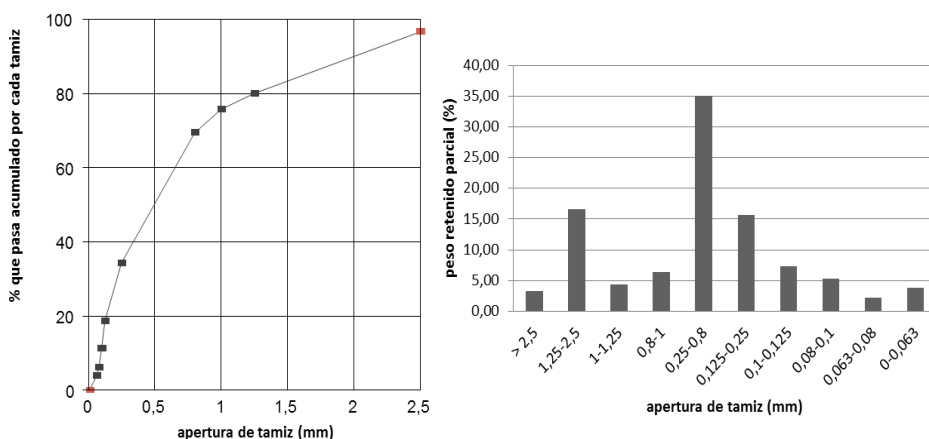


Figura 52. Curva granulométrica y porcentaje de material retenido por los tamices de la muestra de estuco AC-2

La síntesis de los resultados del estudio granulométrico de seis muestras de estuco representativas de las capas de preparación de tres sitios arqueológicos de la Península de Yucatán (*Ek'Balam*, *Kulubá* y *Acanceh*), resumida en la tabla 26, permite determinar, a grandes rasgos, que la selección del árido a la hora de manufacturar el mortero de las capas de preparación más superficiales (primera capa de preparación) se concentra en dos tamaños de grano, entre la arena gruesa y la arena media, con una dosificación del mortero que oscila entre 1:2 y 1:2,5 (muestra de estuco EB-3, KU-5, AC-2). La selección del árido del mortero de las capas de preparación más profundas (segunda capa de preparación) incorpora la grava fina y la arena muy gruesa, con una dosificación del mortero que oscila entre 1:3 y 1:5 (muestra de estuco EB-mo, KU-3, AC-1). Estos resultados se pueden correlacionar con las dosificaciones que presenta Gárate, I. (1994) en su libro *Artes de la cal*, cuando expone que las dosificaciones recomendadas para manufacturar los morteros de cal de las capas de preparación de estuco de una pintura mural, desde la superficie al interior, van de 1:2, 1:3, 1:4, respectivamente, a medida que las capas se acercan más al muro.

Tabla 26. Síntesis de los resultados del estudio granulométrico

<b>ESTRATIGRAFÍA</b>	<b>SELECCIÓN DEL ÁRIDO</b>	<b>DOSIFICACIÓN MORTERO (en masa)</b>	<b>MUESTRAS</b>
capa pictórica	-	-	-
primera capa de preparación	arena gruesa a arena media	1:2 a 1:2,5	EB-3, KU-5, AC-2
segunda capa de preparación	grava fina a arena media	1:3 a 1:5	EB-mo, KU-3, AC-1

Nota: la capa pictórica como ya se ha mencionado no se estudia en esta investigación, pero se ha colocado en la tabla 26 para visualizar la totalidad de la estratigrafía de las muestras, de superficie al interior del muro.

#### 1.1.3.2.1.4. Descripción petrográfica

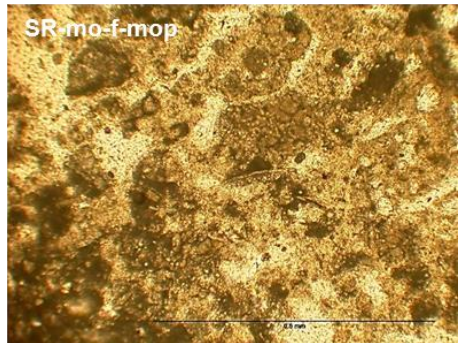
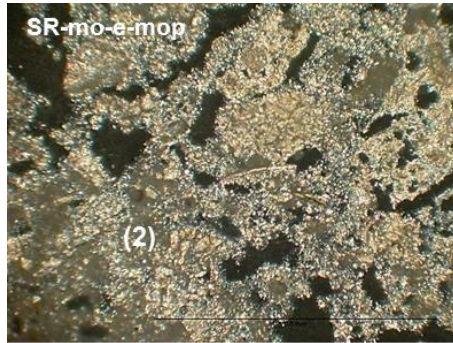
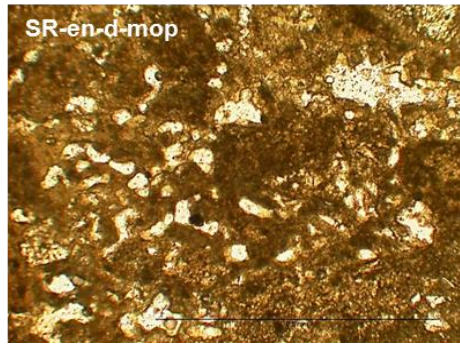
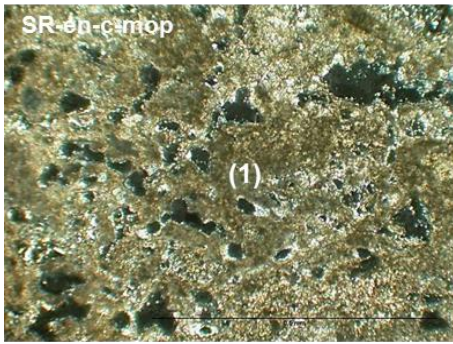
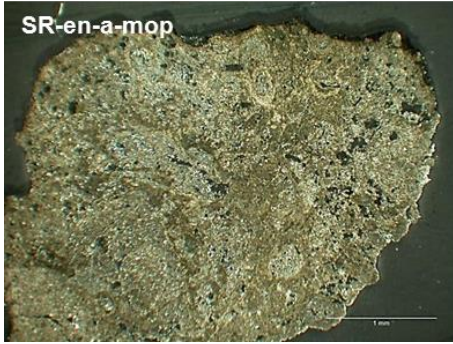
Las láminas delgadas obtenidas, de una segunda selección de las muestras de estucos, se han caracterizado mediante un microscopio óptico de polarización, con la finalidad de determinar sus características petrográficas. Este estudio, por una parte, nos permite observar y describir los componentes del mortero, el árido y el conglomerante y la relación existente entre ellos. Por otra parte, permite interpretar y establecer posibles correlaciones entre las capas de preparación de estuco de los sitios arqueológicos seleccionados, aunque la preparación de las muestras son en su totalidad de la primera capa de preparación.

Para la descripción petrográfica se ha definido un modelo de ficha con los siguientes campos: referencia del estuco (codificación de la muestra); lugar de extracción (especifica la localización de extracción y el sitio arqueológico); microfotografías, mediante la técnica instrumental de análisis ya presentada (la microscopía óptica de polarización (MOP)); conglomerante: la composición y la textura; árido: la composición, la textura, el tamaño y la forma de grano.

A continuación, se presentan las fichas petrográficas confeccionadas para cada una de las muestras de capas de preparación de los estucos seleccionados (Fichas: capas de preparación del estuco SR-en; ET-9B; DZ-2; CH-en/mo; DL-mo/en; MU-6; EB-2; CI-2; KU-7 y AC-1):



<b>Referencia del estuco</b>	<b>SR-en</b>
<b>Lugar de extracción</b>	<i>Boca de Serpiente, Sta. Rosa Xtampak</i>



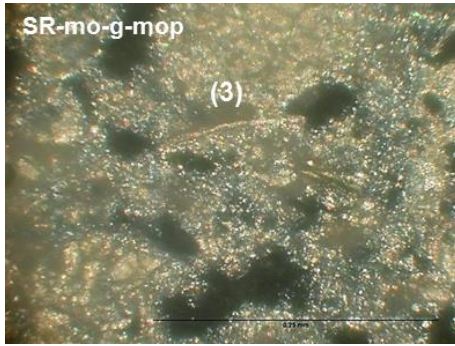


Figura 53. Microfotografías MOP (SR-en), de izquierda a derecha y de arriba abajo, SR-en-a-mop: (4x, NC); SR-en-b-mop: SR-en-a-mop con NP (4x, NP); SR-en-c-mop: (10x, NC); SR-en-d-mop: SR-en-c-mop con NP (10x, NP); SR-en-e-mop: (20x, NC); SR-en-f-mop: SR-en-e-mop con NP (20x, NP); SR-mo-g-mop: (40x, NC)

<b>Componentes</b>	<b>conglomerante</b>	cal aérea; el conglomerante está contituido por una matriz de color marronoso oscuro, con cierta tonalidad rojiza, de tipo criptocristalino, de composición carbonatada <sup>111</sup> . A parte, presenta una porosidad abundante, muy diversa, respecto a la forma y al tamaño, producto de procesos de erosión y disolución por diferentes agentes: percolación de agua, raíces o bioturbación por seres vivos, etc.
	<b>árido</b>	<p>(1).nódulos constituidos por una fina capa externa de calcita y un relleno interno de carbonato criptocristalino, los cuales proceden de la calcinación de las rocas calizas, que Cabadas Báez, H. <i>et al.</i> (2010) define como <i>porous calcitic body (burned limestone)</i>.</p> <p>(2).se observan muchas partículas microcristalines de calcita esparítica distribuidas dentro de la matriz conglomerante del mortero, las cuales podrían proceder de la desagregación del árido tipo <i>sascab</i>, en el momento de mezclarlo con la cal.</p> <p>(3).a parte, se observan también estructuras fósiles relictas, es decir, componentes de origen orgánico diversos, no identificables (caparzones de moluscos o de restos fecales, coprolitos (?)). Todos ellos, se presentan alterados, tanto por los procesos diagenéticos del jacimiento geológico original como por la transformación que experimentan en el proceso de mezcla con la cal para elaborar el mortero.</p>

<sup>111</sup> El tamaño y la textura de la matriz carbonatada es similar a la *micrita* de las rocas carbonatadas naturales.



<b>Referencia del estuco</b>	<b>ET-9B</b>
<b>Lugar de extracción</b>	Estructura I, <i>El Tabasqueño</i>

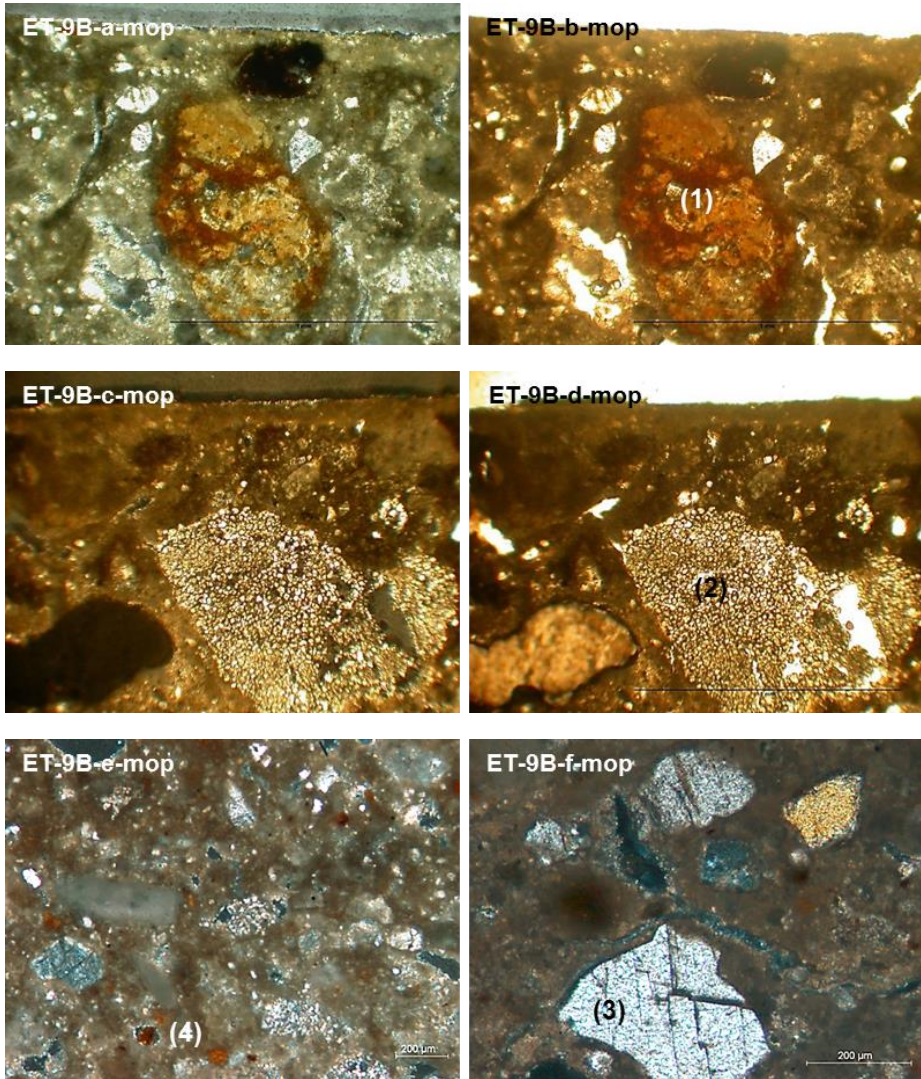
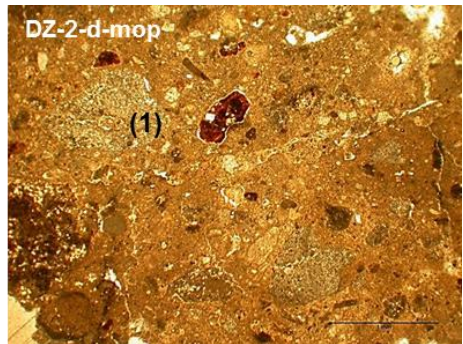
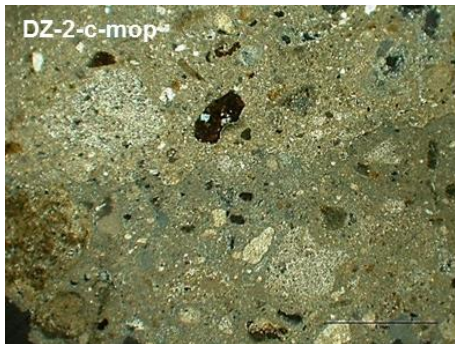
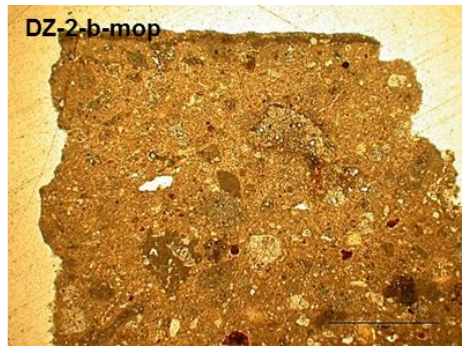
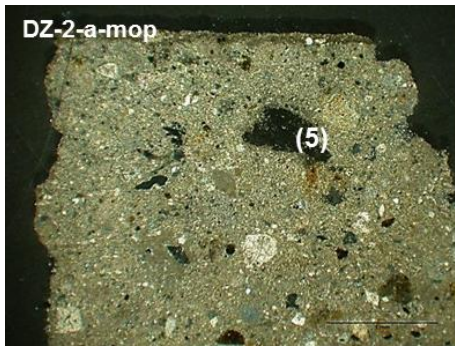


Figura 54. Microfotografías MOP (ET-9B), de izquierda a derecha y de arriba abajo, ET-9B-a-mop: (10x, NC); ET-9B-b-mop: ET-9B-a-mop con NP (10x, NP); ET-9B-c-mop: (10x, NC); ET-9B-d-mop: ET-9B-c-mop con NP (10x, NP); ET-9B-e-mop: (10x, NC); ET-9B-f-mop: (20x, NC)

<b>Componentes</b>	<b>conglomerante</b>	cal aérea; el conglomerante está constituido por una matriz de color marronoso oscuro con cierta tonalidad rojiza, de tipo criptocristalino, de composición carbonatada.
	<b>árido</b>	(1).nódulos redondeados arcillo-ferrosos provenientes de suelos re TRABAJADOS por la erosión.

	<p>(2).nódulos de <i>sascab</i> carbonatados arenosos, de textura esparítica con un poco de fracción fina arcillosa intercrystalina.</p> <p>(3).microcristales de calcita o dolomita, de forma angulosa a subangulosa. Algunos presentan líneas de exfoliación característicos de estos minerales.</p> <p>(4).también se observan pequeñas partículas rojas o de tonalidad rojizo-marronosa, que corresponden a óxidos de hierro y minerales arcillosos procedentes de suelos (medio edáfico).</p>
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>Referencia del estuco</b>	<b>DZ-2</b>
<b>Lugar de extracción</b>	Estructura I, estancia 4, <i>Dzibilnocac</i>





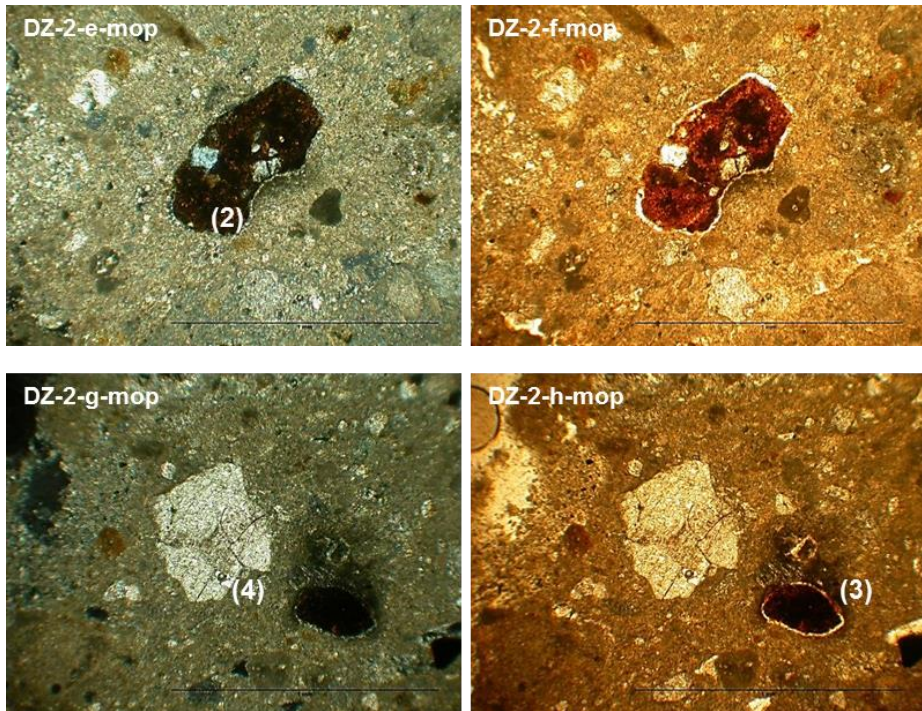
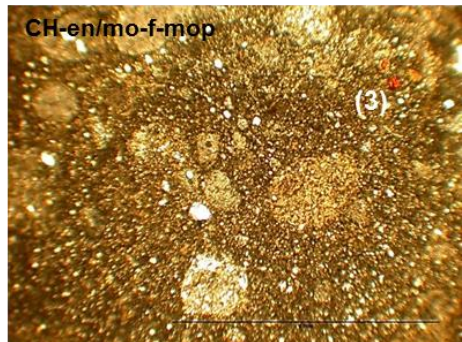
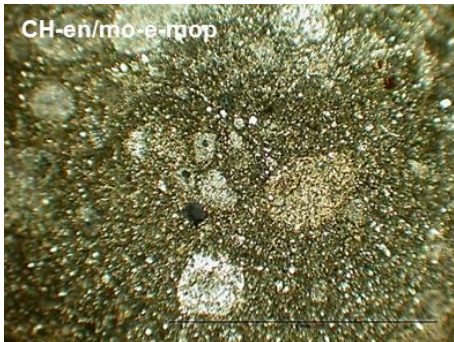
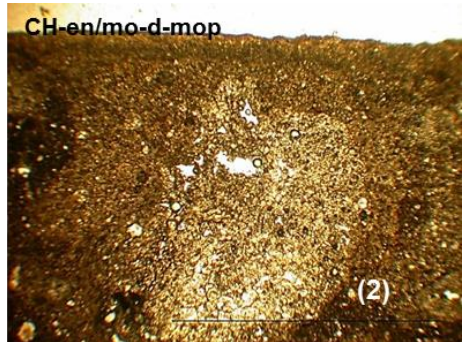
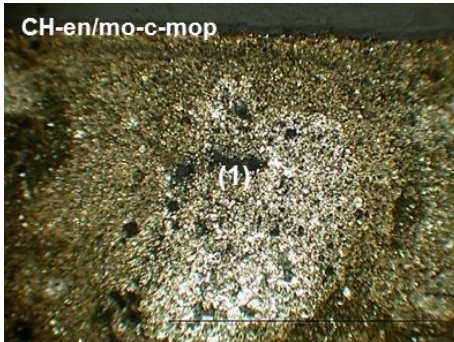
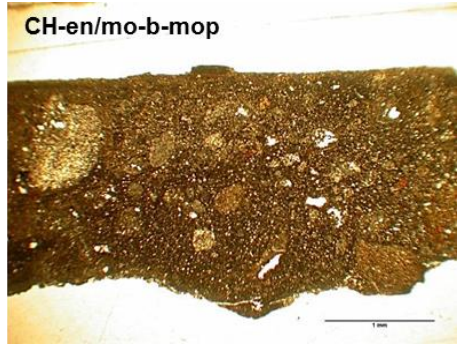


Figura 55. Microfotografías MOP (DZ-2), de izquierda a derecha y de arriba abajo, DZ-2-a-mop: (4x, NC); DZ-2-b-mop: DZ-2-a-mop amb NP (4x, NP); DZ-2-c-mop: (10x, NC); DZ-2-d-mop: DZ-2-c-mop con NP (10x, NP); DZ-2-e-mop, DZ-2-f-mop, DZ-2-g-mop y DZ-2-h-mop. DZ-2-e-mop: (10x, NC); DZ-2-f-mop: DZ-2-e-mop con NP (10x, NP); DZ-2-g-mop: (10x, NC); DZ-2-h-mop: DZ-2-g-mop con NP (10x, NP)

Componentes	conglomerante	cal aérea; el conglomerante está constituido por una matriz de color marronoso oscuro con cierta tonalidad rojiza, de tipo criptocristalino, de composición carbonatada.
	árido	<p>(1).fragmentos de material carbonatado de textura esparítica, tipo <i>sascab</i>; tamaño de arena gruesa; forma irregular-subangulosa.</p> <p>(2).fragmento prismático irregular, de color rojo, de composición arcillo-ferrosa de origen edáfico con inclusiones de micropartículas y microcristales de cuarzos.</p> <p>(3).fragmento de tonalidad rojiza oscura, de forma subredondeada. Parece una partícula de arcillas retrabajadas por la erosión de un suelo, es decir, un clasto o fragmento detrítico pedogenético, que Cabadas Báez, H. <i>et al.</i> (2010) define como <i>reworked clay pedofeature</i>.</p> <p>(4).fragmentos de litoclastos de rocas carbonatadas, de formas subredondeadas a</p>

	<p>subangulosas.  (5).partículas de chert.  Alrededor de algunos áridos, (2) y (3), se observan fracturas circumgranulares, en la interfase matriz árido, debido a procesos de secado y posterior contracción del mortero.</p>
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>Referencia del estuco</b>	<b>CH-en/mo</b>
<b>Lugar de extracción</b>	Estructura I, <i>Chacmultún</i>





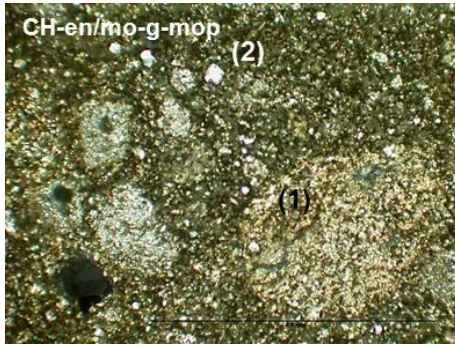


Figura 56. Microfotografías MOP (CH-en/mo), de izquierda a derecha y de arriba abajo, CH-en/mo-a-mop: (4x, NC); CH-en/mo-b-mop: CH-en/mo-a-mop con NP (4x, NP); CH-en/mo-c-mop: (10x, NC); CH-en/mo-d-mop: CH-en/mo-c-mop con NP (10x, NP); CH-en/mo-e-mop: (10x, NC); CH-en/mo-f-mop: CH-en/mo-e-mop con NP (10x, NP); CH-en/mo-g-mop: (20x, NC)

<b>Componentes</b>	<b>conglomerante</b>	cal aérea de textura criptocristalina. Presencia muy abundante de arcillas que tiñen el mortero de una tonalidad rojiza-marronosa apreciables en las microfotografías con nícoles paralelos (NP).
	<b>árido</b>	<p>(1).fragmentos carbonatados de textura esparítica y prismática; tamaño de arena gruesa a arena media; forma subredondeada-redondeada.</p> <p>(2).fragmentos carbonatados microesparíticos de características muy similares al componente anterior, pero de tamaño de arena fina a muy fina; forma subangulosa subredondeada.</p> <p>Estos fragmentos pueden corresponder mayoritariamente a material tamizado, a pesar que en algún caso, pueden provenir de la desagregación del árido más grande, tipo <i>sascab</i>, en el momento de mezclarlo con la cal</p> <p>(3).algún pequeño fragmento de hematites (rojos) y goethita (amarillos).</p>

<b>Referencia del estuco</b>	<b>DL-en/mo</b>
<b>Lugar de extracción</b>	Estructura I, estancia 1, D'zula

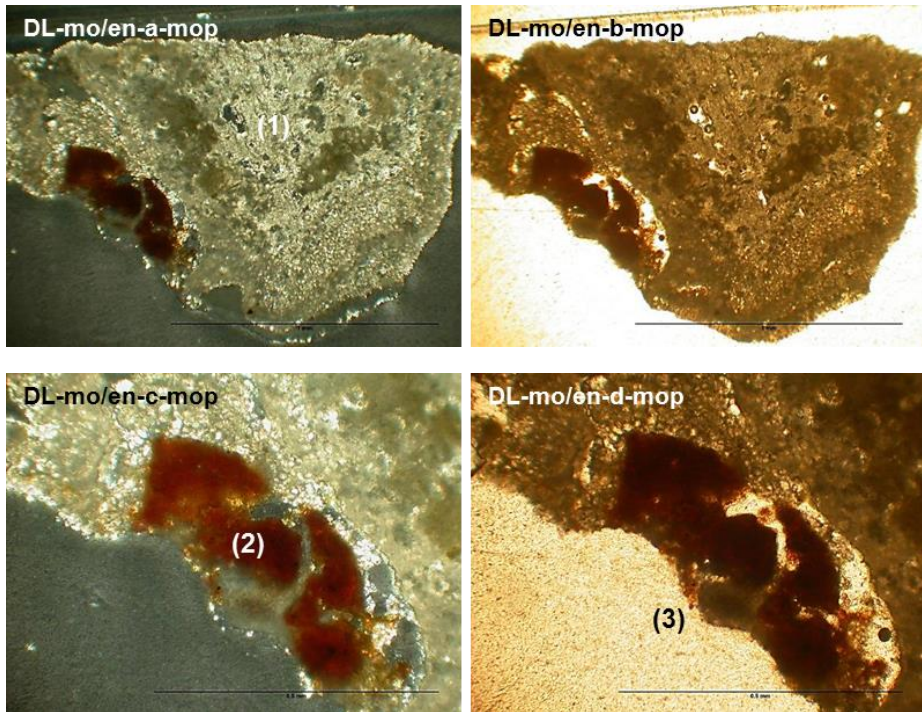


Figura 57. Microfotografías MOP (DL-en/mo), de izquierda a derecha y de arriba abajo, DL-mo/en-a-mop: (10x, NC); DL-mo/en-b-mop: DL-mo/en-a-mop con NP (10x, NP); DL-mo/en-c-mop: (20x, NC); DL-mo/en-d-mop: DL-mo/en-c-mop con NP (20x, NP)

<b>Componentes</b>	<b>conglomerante</b>	cal aérea; conglomerante de textura criptocristalina. El mortero está mal amasado, por lo que se observa una textura de distribución muy irregular, con áreas con acumulación de microcristales de calcita esparítica, procedentes de grandes nódulos de <i>sascab</i> y minerales arcillosos que se han desagregado en el proceso de mezcla con la cal. La porosidad es abundante e irregular debido a procesos de disolución y alteración.
	<b>árido</b>	(1).macronódulos de <i>sascab</i> carbonatados esparíticos, desagregados en micropartículas. (2).fragmentos de composición arcillo-ferrosa, de diferente tamaño y forma, procedentes de suelos. (3).pequeñas partículas de tonalidad rojizo-marronosa que se corresponden a óxidos de hierro y minerales arcillosos, procedentes de suelos (medio edáfico).



<b>Referencia del estuco</b>	<b>MU-6</b>
<b>Lugar de extracción</b>	Estructura A, <i>Mulchic</i>

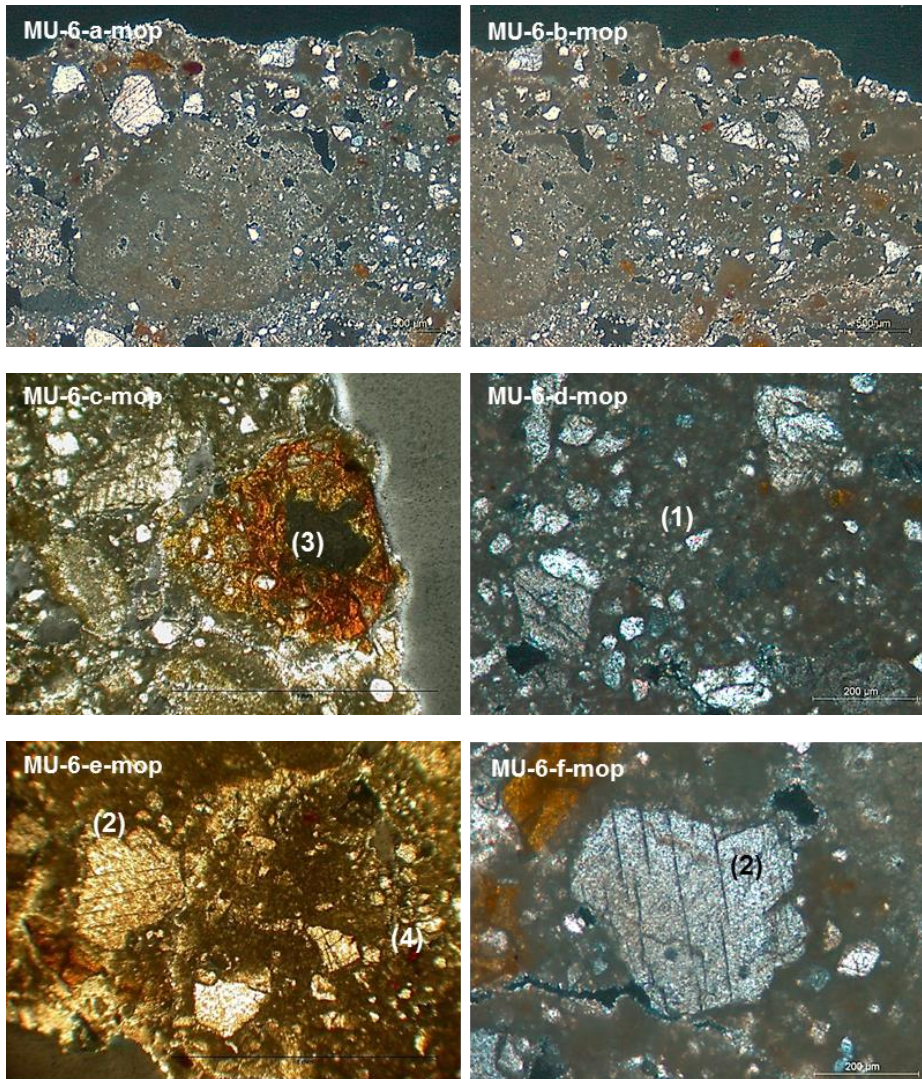
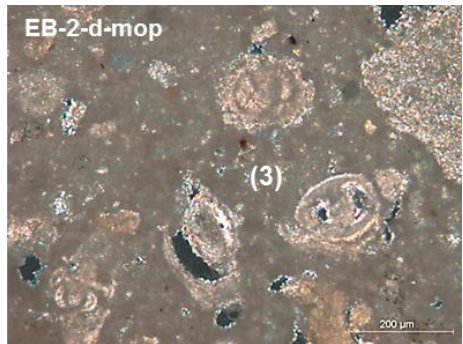
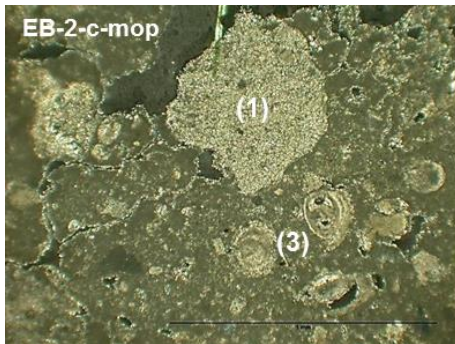
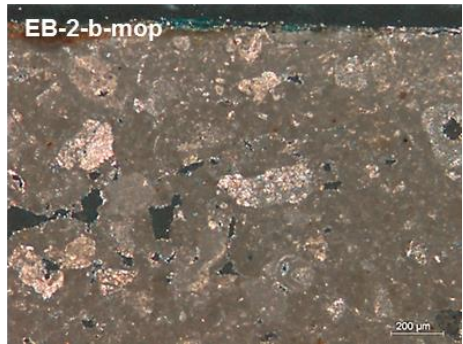
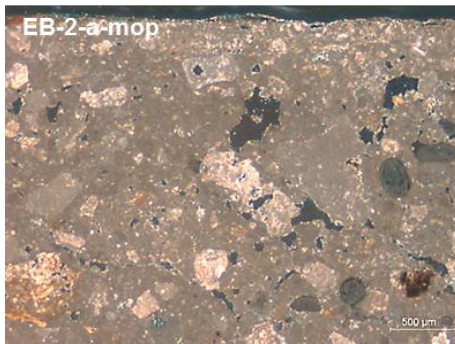


Figura 58. Microfotografías MOP (MU-6), de izquierda a derecha y de arriba abajo, MU-6-a-mop: (4x, NC); MU-6-b-mop: (4x, NC); MU-6-c-mop: (10x, NC); MU-6-d-mop: (10x, NC); MU-6-e-mop: (10x, NC); MU-6-f-mop: (20x, NC)

<b>Componentes</b>	<b>conglomerante</b>	cal aérea criptocristalina con componentes arcillosos.
	<b>árido</b>	(1).fragmentos carbonatados de textura esparítica y prismática; tamaño de arena gruesa a arena media; forma subredondeada-redondeada. (2).fragmentos de roca caliza y cristales; tamaño

	<p>de arena media; forma angulosa. Algunos cristales presentan líneas de exfoliación características. Estos fragmentos pueden corresponder a trituración.</p> <p>(3).fragmentos de composición mixta (de composición ferruginosa -hematites/goethita-dentro de una matriz arcillosa) con inclusión de fragmentos clásticos carbonatados.</p> <p>(4).pequeñas partículas de tonalidad rojiza marronosa que se corresponden a óxidos de hierro y minerales arcillosos procedentes de suelos (medio edáfico).</p>
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>Referencia del estuco</b>	<b>EB-2</b>
<b>Lugar de extracción</b>	Estructura I, estancia 64, <i>Ek'Balam</i>





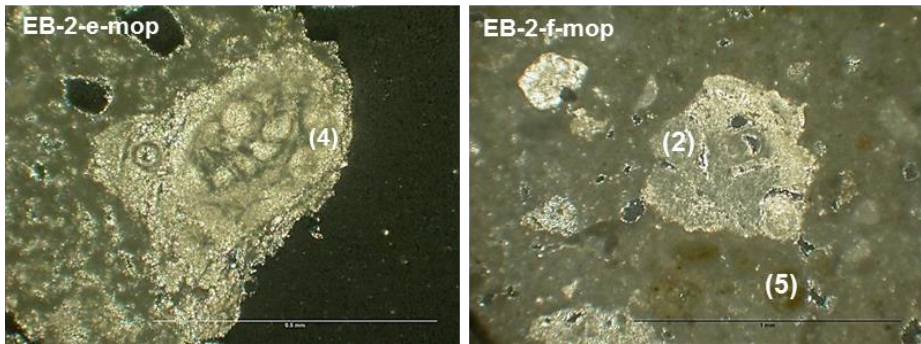
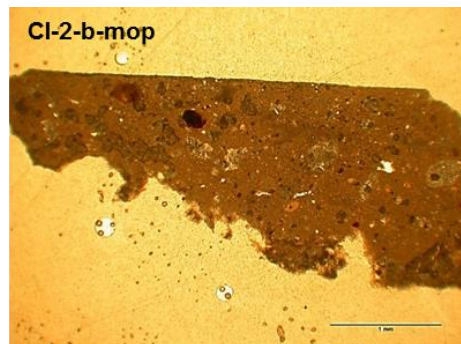
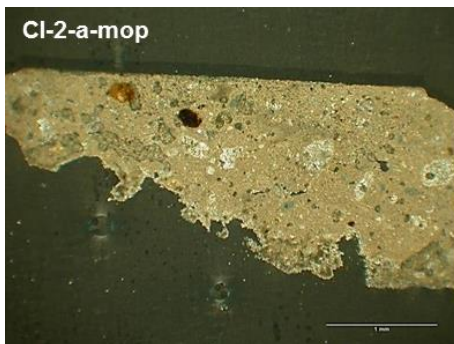


Figura 59. Microfotografías MOP (EB-2), de izquierda a derecha y de arriba abajo, EB-2-a-mop: (4x, NC); EB-2-b-mop: (4x, NP); EB-2-c-mop: (10x, NC); EB-2-d-mop: (20x, NC); EB-2-e-mop: (10x, NC); EB-2-f-mop: (10x, NC)

<b>Componentes</b>	<b>conglomerante</b>	cal aérea de textura criptocristalina con presencia de una fracción arcillosa muy escasa.
	<b>árido</b>	(1).fragmentos de roca carbonatada de textura esparítica y micrítica; tamaño de arena gruesa a muy gruesa; forma irregular-subangulosa. En algunos casos, se observa la estratificación de la roca original. (2).fragmentos de roca fosilífera con miliólidos. (3).fragmentos de fósiles (miliólidos). (4).fragmentos de corales. (5).fragmentos de composición mixta (de composición ferruginosa –hematites/goethita-dentro de una matriz arcillosa).

<b>Referencia del estuco</b>	<b>CI-2</b>
<b>Lugar de extracción</b>	Subestructura, serie inicial, <i>Chichén Itzá</i>



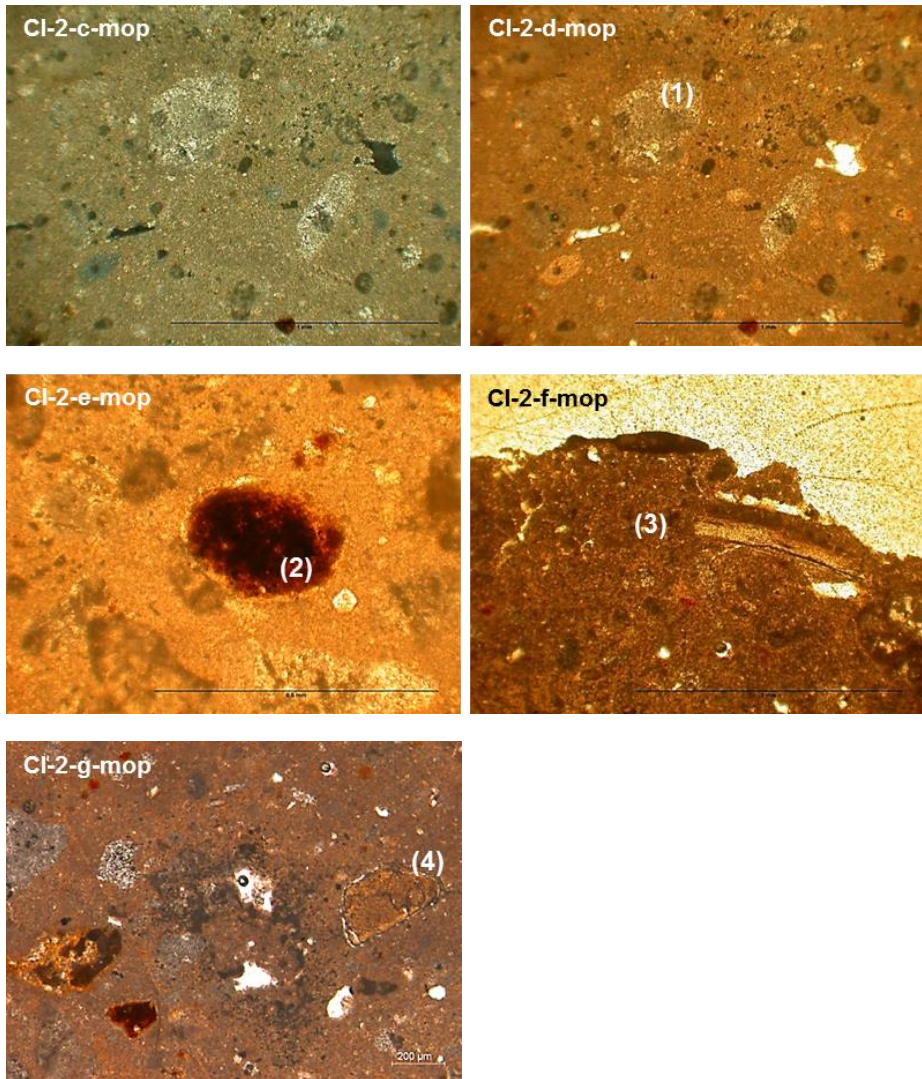
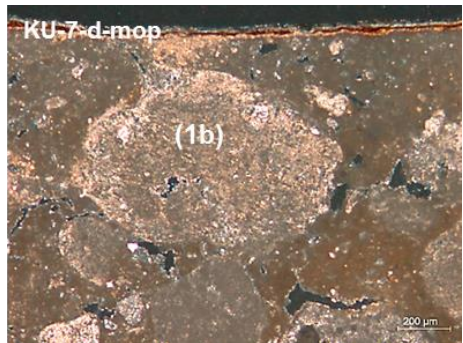
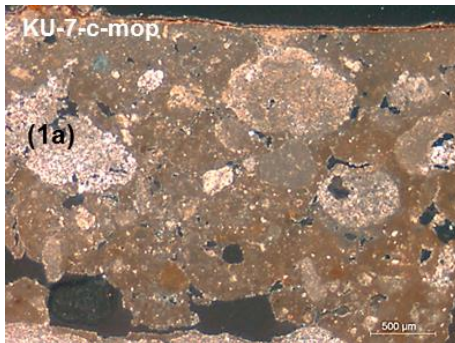
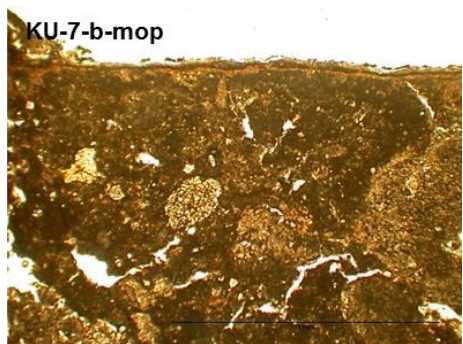
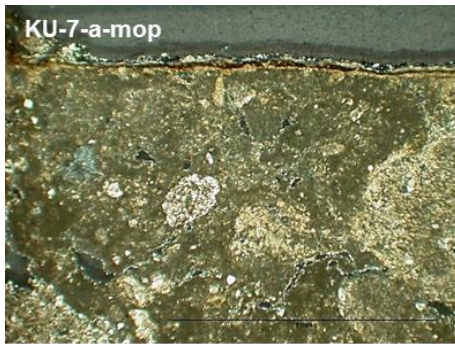


Figura 60. Microfotografías MOP (CI-2), de izquierda a derecha y de arriba abajo, CI-2-a-mop: (4x, NC); CI-2-b-mop: CI-2-a-mop con NP (4x, NP); CI-2-c-mop: (10x, NC); CI-2-d-mop: CI-2-c-mop con NP (10x, NP); CI-2-e-mop: (20x, NP); CI-2-f-mop: (20x, NP); CI-2-g-mop: (20x, NC)

<b>Componentes</b>	<b>conglomerante</b>	cal aérea de textura criptocristalina
	<b>árido</b>	(1).fragmentos carbonatados con microcristales de tamaño esparítica de color blanco; tamaño de arena media; forma subredondeada a subangulosa. Algunos con hábito prismático mezclados con una matriz criptocristalina. (2).nódulos rojizos o rojizo-marronosos de composición ferruginosa arcillosa; tamaño de 0,5 a 0,7 mm; algunos casos pueden tener

	<p>materia orgánica carbonosa.  (3).fragmentos de fósiles (bivalvos).  (4).fragmentos limonitizados que pueden contener restos de componentes ferruginosos.  Además, se observan masas irregulares, a veces, translúcidas de textura amorfa y globular, que pueden corresponder a aditivos de carácter orgánico.  Alrededor de algunos áridos se observan fracturas circumgranulares, en la interfase matriz árido, debido a procesos de secado y posterior contracción del mortero.</p>
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>Referencia del estuco</b>	<b>KU-7</b>
<b>Lugar de extracción</b>	Estructura, grupo B, <i>Kulubá</i>





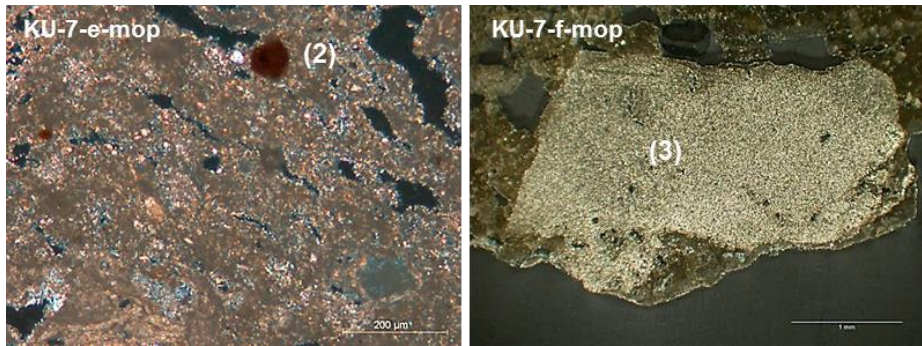
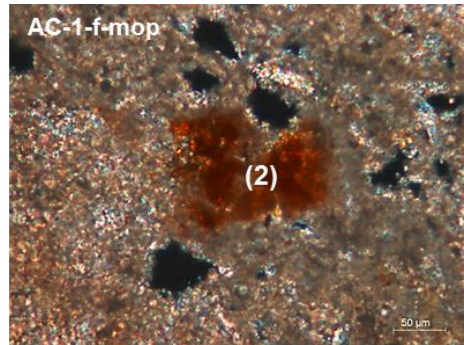
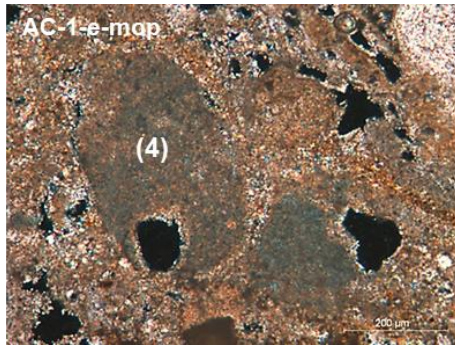
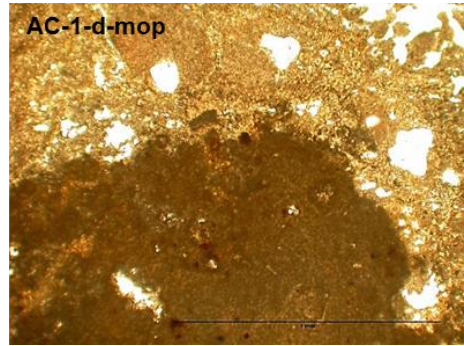
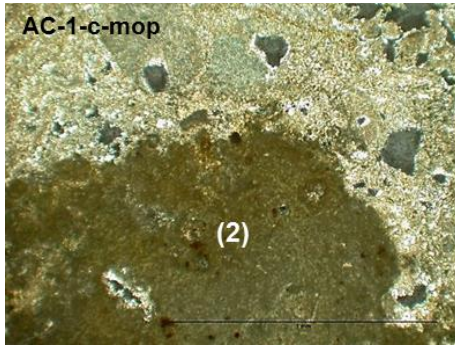
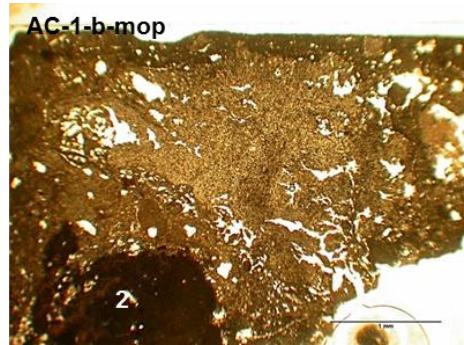
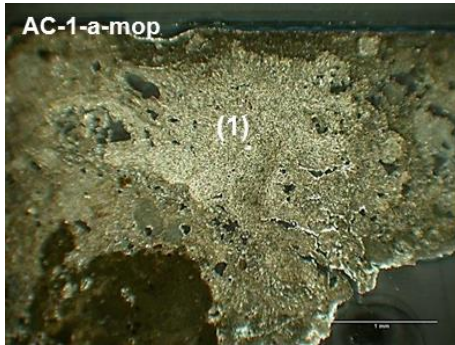


Figura 61. Microfotografías MOP (KU-7), de izquierda a derecha y de arriba abajo, KU-7-a-mop: (4x, NC); KU-7-b-mop: KU-7-a-mop con NP (4x, NP); KU-7-c-mop: (10x, NC); KU-7-d-mop: KU-7c a 20x (20x, NC); KU-7-e-mop: (20x, NC); KU-7-f-mop: (4x, NC)

Componentes	conglomerante	cal aérea de textura criptocristalina
	<p>árido</p>	<p>(1a).fragmentos carbonatados, de textura esparítica, tamaño de arena gruesa a media; de forma subredondeada a redondeada.</p> <p>(1b).algunos de estos componentes presentan, internamente, micronódulos de textura criptocristalina y/o arcillosa, los cuales se puede interpretar como restos de cal mal calcinados. Pueden corresponder a procesos similares a los observados en la muestra SR-en: calcinación de rocas calizas.</p> <p>(2).partículas de tonalidad rojiza o rojizo-marronosa, de composición ferruginosa arcillosa.</p> <p>(3).fragmentos de roca caliza (litoclastos); de forma prismática irregular; de textura microcristalina esparítica; de tamaño de arena gruesa, los cuales pueden corresponder a fragmentos de roca procedentes de la <i>sascabera</i>. Por este motivo, muestran esta similitud de textura.</p>

<b>Referencia del estuco</b>	<b>AC-1</b>
<b>Lugar de extracción</b>	Pintura mural, <i>Acanceh</i>



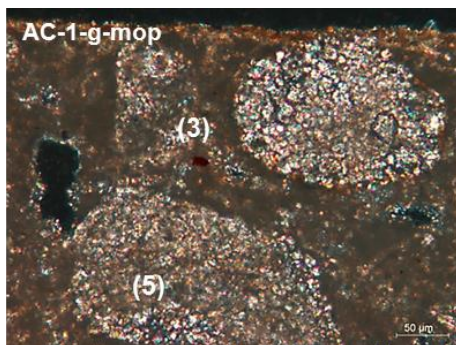


Figura 62. Microfotografías MOP (AC-1), de izquierda a derecha y de arriba abajo, AC-1-a-mop: (4x, NC); AC-1-b-mop: AC-1-a-mop con NP (4x, NP); AC-1-c-mop: (10x, NC); AC-1-d-mop: AC-1-g-mop con NP (10x, NP); AC-1-e-mop: (20x, NC); AC-1-f-mop: (40x, NC); AC-1-g-mop: (10x, NC)

Componentes	conglomerante	cal aérea de textura criptocristalina
	árido	<p>(1).fragmentos de material carbonatado de textura esparítica; tamaño de arena gruesa; forma irregular-subangulosa. En los espacios intercristalinos de este fragmento se observa una fina matriz criptocristalina posiblemente de origen carbonatado-arcilloso. Se puede tratar de una situación similar a la de la muestra DL-en/mo, es decir, por un mal amasado. Por este motivo, se observa una textura de distribución muy irregular con áreas de acumulación de microcristales de calcita esparítica, procedentes de grandes nódulos de <i>sascab</i> y minerales arcillosos, que se han desagregado durante el proceso de mezcla con la cal.</p> <p>(2).fragmentos de composición mixta (de composición ferruginosa -hematites/goethita-dentro de una matriz arcillosa); tamaño de arena media a gruesa; forma irregular-subredondeada. Dispersados por la matriz se encuentran pequeños fragmentos de la misma composición.</p> <p>(3).algún pequeño fragmento de hematites.</p> <p>(4).fragmentos de textura criptocristalina, de color grisáceo; forma elipsoidal, posiblemente de origen fecal de la mesofauna (coprolito de composición fosfatada cálcica).</p> <p>(5).fragmento carbonatado de textura esparítica muy desarrollado; forma pseudoangulosa o redondeada. Algunos fragmentos presentan una cubierta de tipo arcilloso.</p> <p>Cabe mencionar que en la parte superficial de la muestra se aprecia una capa de meteorización superficial debida a la exposición de la muestra a la intemperie.</p>



A modo de síntesis, las descripciones petrográficas de las muestras de las capas de preparación de los estucos seleccionados, nos dan a entender que estos morteros son manufacturados con un conglomerante de cal aérea mezclada con diferentes proporciones de minerales arcillosos. Los componentes de los áridos son, mayoritariamente, de composición carbonatada y de textura cristalina. Dada sus características morfológicas, la gran mayoría del árido es de tipo *sascab*. A nivel específico, se observan tres tipos generales de árido: (1). nódulos de textura microcristalina esparítica o microesparítica, tipo *sascab* (algunos de estos presentan cierta proporción de matriz criptocristalina entre los microcristales esparíticos); (2). litoclastos: fragmentos de rocas carbonatadas (algunos de estos fragmentos presentan cristales de calcita/dolomita con líneas de exfoliación); (3). bioclastos: fragmentos de fósiles y estructuras relictas de fragmentos de fósiles.

Además, se observa la presencia de nódulos arcillosos, nódulos arcillosos mezclados con minerales ferruginosos (goethita-hematites, principalmente), en diferentes proporciones, y de partículas de composición mineral muy semejante, como fragmentos de arcillas clásticas (*reworked clay pedofeatures*, según define Cabadas Báez, H. *et al.* (2010)) y partículas ferruginosas (goethita/hematites), todos ellos procedentes de suelos de origen edáfico; y, restos relictos, que pueden ser coprolitos, también de origen edáfico. En la muestra de estuco de *Dzibilnocac*, cabe destacar la presencia de pequeños cristales de cuarzo incluidos dentro de las partículas de composición arcillo-ferrosa de origen edáfico y partículas de chert. Es importante tener en cuenta que, recientemente, Strualino, L. (2015) detectó partículas similares a las citadas, a las que define como inclusiones heterogéneas y partículas edáficas en los estucos del sitio arqueológico de *Dzibanché* (estado de Quintana Roo, México).

Por último, en algunas de las muestras se observan unas estructuras en forma de nódulos constituidos por una fina capa externa de calcita y un relleno interno de carbonato criptocristalino, que provienen de la calcinación de las rocas calizas (*porous calcitic body –burned limestone*), según define Cabadas Báez, H. *et al.* (2010)). Estas estructuras nos pueden indicar la presencia de cal poco calcinada. En parte, también nos pueden indicar que se utilizaron materiales procedentes de las *sascaber*as para manufacturar la cal y no únicamente como árido.

La observación de estos tipos de materiales formando parte del árido nos recuerdan los materiales y los sedimentos, descritos en el apartado 1.1.1.5.2. de esta investigación (*La selección de la cal y del árido*), procedentes de las

*sasacaber*as y/o los materiales de relleno de las dolinas (*cenotes*) o de las cavidades kársticas (consultar figura 17). Por tanto, estos materiales, se corresponden a la cobertura cuaternaria de la plataforma de la Península de Yucatán, concretamente a los estratos del período del Pleistoceno y a los suelos edáficos del período del Holoceno. Estas observaciones coinciden con los resultados obtenidos de la caracterización morfológica y petrográfica de las materias primas del entorno geológico de la Península de Yucatán, en el apartado 1.1.3.1 (*Caracterización de las materias primas del entorno geológico*).

A continuación, se presenta una tabla esquemática, donde se sintetiza, de manera genérica, los tipos de componentes que se han descrito petrográficamente como árido en las muestras de mortero de las capas de preparación de los estucos mayas estudiados (Tabla 27).

Tabla 27. Tabla de los tipos de componentes descritos petrográficamente como árido, en las muestras de mortero de las capas de preparación de los estucos mayas

SR	ET	DZ	CH	DL	MU	EB	CI	KU	AC
1	1	1	1	1	-	1	1	1	1
-	2b	2a	-	-	2b	2a, 2b	-	2a, 2b	-
3b	-	-	-	-	-	3a	3a	-	-
-	4	4	-	4	4	4	4	-	4
-	-	5	-	-	-	-	-	-	-
-	6	-	6	6	6	6	6	6	6
-	-	-	-	-	-	-	-	-	7
8	-	-	-	-	-	-	-	8	-
-	-	9	-	-	-	-	-	-	-
-	-	10	-	-	-	-	-	-	-

*Tipos de componentes de áridos que aparecen en la tabla 27:*

1. nódulo microcristalino esparítico o microesparítico o de tipo mixto (matriz criptocristalina entre microcristales esparíticos) tipo *sascab*; 1. el componente (1) desagregado.
2. litoclastos: 2a. fragmentos de rocas carbonatadas; 2b. fragmentos de rocas carbonatadas con cristales de calcita/dolomita con líneas de exfoliación.
3. bioclastos: 3a: fragmentos de fósiles; 3b: estructuras relictas de fragmentos de fósiles.
4. nódulos arcillo-ferruginosos o ferrosos, de composición mixta (de composición ferruginosa –hematites/goethita- dentro de una matriz arcillosa).
5. fragmentos de arcillas clásticas (*reworked clay pedofeature*, según define Cabadas Báez, H. *et al.* (2010)).
6. partículas ferruginosas (goethita/hematites).
7. coprolito de composición fosfatada-cálcica.
8. *porous calcitic body (burned limestone)*, según define Cabadas Báez, H. *et al.* (2010).
9. partículas de chert.
10. cristales de cuarzo.

#### **1.1.3.2.1.5. Caracterización químico-mineralógica de la fase conglomerante del mortero**

La caracterización químico-mineralógica se centra en el estudio de la fase conglomerante del mortero de las capas de preparación de los estucos de los sitios arqueológicos seleccionados, ya que es el componente del mortero que, debido a su textura micro y criptocristalina, se necesita el uso de técnicas instrumentales de análisis apropiadas para tal finalidad. El agregado o árido del mortero queda bien caracterizado a partir de la descripción petrográfica realizada con anterioridad. Dicha caracterización químico-mineralógica se realiza mediante la difracción de rayos-x (DRX) y la microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX).

##### *Difracción de rayos-x (DRX)*

Para caracterizar la fase conglomerante del mortero de las capas de preparación de los estucos seleccionados se lleva a término, antes que nada, una disgregación del conglomerante del árido de manera manual, previa separación de la capa pictórica de cada muestra de estuco, hasta llegar al tamaño máximo que permite la acción manual, para seguir con un tamizado de este con el tamiz normativo de luz de malla 0,063 mm. Una vez preparadas las muestras resultantes estas se analizan mediante la difracción de rayos-x. Esta técnica instrumental de análisis nos permite determinar las especies minerales implicadas en la composición de la fase conglomerante. Las muestras seleccionadas y pretratadas son las siguientes: SR-en; ET-2A; ET-9B; ET-9/7; DZ-2; CH-en/mo; DL-mo/en; MU-6; MU-7; EB-mo; EB-2; EB-3; EB-5A; EB-7; CI-2; CI-2D; CI-8B; KU-3; KU-5; AC-1; AC-2; AC-7/7A Y AC-9.

Los resultados de las especies minerales mayoritarias, que se detectan en los difractogramas obtenidos del análisis de las muestras de la fase conglomerante de los morteros de las capas de preparación de los estucos seleccionados a través de la difracción de rayos-x, se muestran en la tabla 28 siguiente:

Tabla 28. Especies minerales mayoritarias de los difractogramas obtenidos del análisis de las muestras de la fase conglomerante del mortero de las capas de preparación de los estucos a través de la difracción de rayos-x. Acrónimos: REF. F.C: referencia de las muestras de la fase conglomerante analizada; sustancia mineral mayoritaria: +++; sustancia mineral moderadamente mayoritaria: ++; sustancia mineral poco presente: +; sustancia mineral no presente: -; d: distancias características entre los planos de la red cristalina de las especies minerales detectadas

REF. F.C.	ESPECIES MINERALES MAYORITARIAS OBTENIDAS			
	calcita	calcita-Mg	dolomita	d (Å)
SR-en	-	+++	-	calcita-Mg: 3,020; 2,274; 1,901; 1,865
ET-2A	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875
ET-9B	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875
ET-9/7	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875
DZ-2	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875
CH-en/mo	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875
DL-mo/en	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875
MU-6	+++	-	+	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875 CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> : 2,886; 2,192; 1,786; 1,781
MU-7	-	+++	-	calcita-Mg: 3,020; 2,274; 1,901; 1,865
EB-mo	-	+++	-	calcita-Mg: 3,020; 2,274; 1,901; 1,865
EB-2	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875
EB-3	-	+++	-	calcita-Mg: 3,020; 2,274; 1,901; 1,865
EB-5A	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875
EB-7	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875
CI-2	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875
CI-2D	+++	-	+	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875 CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> : 2,886; 2,192; 1,786; 1,781
CI-8B	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875
KU-3	-	+++	-	calcita-Mg: 3,020; 2,274; 1,901; 1,865
KU-5	+++	-	++	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875 CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> : 2,886; 2,192; 1,786; 1,781
AC-1	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875
AC-2	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875
AC-7/7A	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875
AC-9	+++	-	-	CaCO <sub>3</sub> : 3,035; 2,285; 2,095; 1,875

*Fórmulas estructurales teóricas de las especies minerales detectadas en los difractogramas:*

De la calcita (carbonato cálcico): CaCO<sub>3</sub> (Graf, D.L., 1977).

De la dolomita (carbonato cálcico-magnésico): CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. En términos generales, la dolomita natural puede oscilar aproximadamente entre Ca<sub>1,16</sub>Mg<sub>0,84</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> y Ca<sub>0,96</sub>Mg<sub>1,04</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (Graf, D.L., 1977).

De la calcita magnesiana (carbonato cálcico con cierta proporción de magnesio). A nivel genérico la calcita magnesiana contiene < 12 Mol% de  $MgCO_3$ . En este caso de estudio, se identifica una calcita magnesiana que responde a la siguiente fórmula estructural:  $Mg_{0,1}Ca_{0,9}CO_3$  (Althoff, P.L., 1977).

Las figuras siguientes presentan los difractogramas de rayos-x más característicos de las muestras estudiadas, agrupados por especie mineral mayoritaria detectada: la figura 63, muestra un ejemplo de los difractogramas donde se detecta la calcita mayoritariamente (muestras ET-2A, ET-9B, ET-9/7, DZ-2, CH-en/mo, DL-mo/me, EB-2, EB-5A, EB-7, CI-2, CI-8B, AC-1, AC-2, AC-7/7A y AC-9); la figura 64, muestra un ejemplo de los difractogramas donde se detecta la calcita magnesiana (muestras SR-en, MU-7, EB-mo, EB-3 y KU-3); y, la figura 65, muestra los difractogramas donde se detecta la calcita combinada con una cierta proporción de dolomita (muestras MU-6; CI-2D y KU-5).

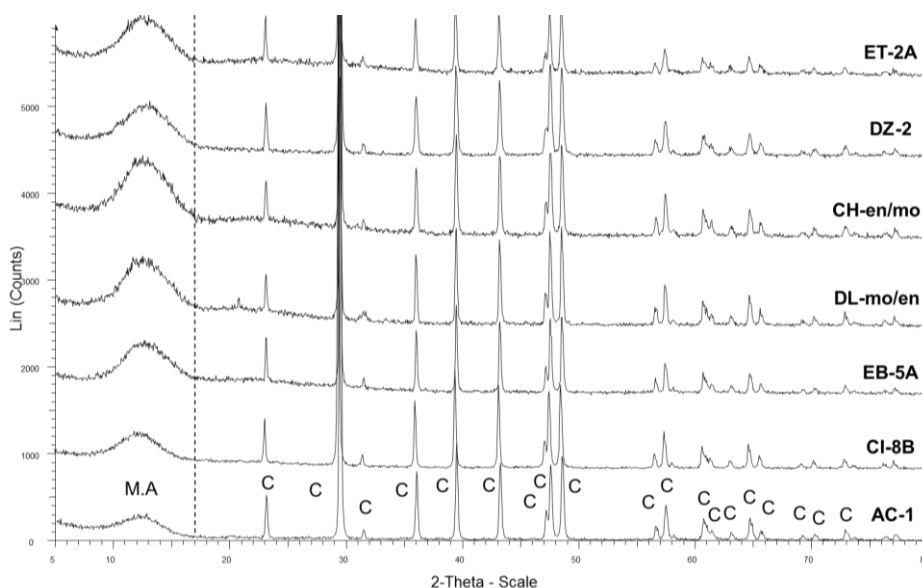


Figura 63. Difractogramas de rayos-x más característicos de las muestras de la fase conglomerante del mortero de las capas de preparación de los estucos siguientes: AC-1, CI-8B, EB-5A, DL-mo/en, CH-en/mo, DZ-2 y ET-2A. Acrónimos: C: calcita; M.A: minerales arcillosos

En parte, de la presencia de calcita, en la figura 63, se puede apreciar que todos los difractogramas representados presentan un pico ancho que está asociado a minerales arcillosos (Å) de naturaleza criptocristalina, que hace que no puedan ser identificadas sin una manipulación previa de la muestra. Aun así, su presencia nos confirma los resultados obtenidos a partir de la

descripción petrográfica donde se detectan nódulos o fragmentos arcillosos en la matriz del mortero.

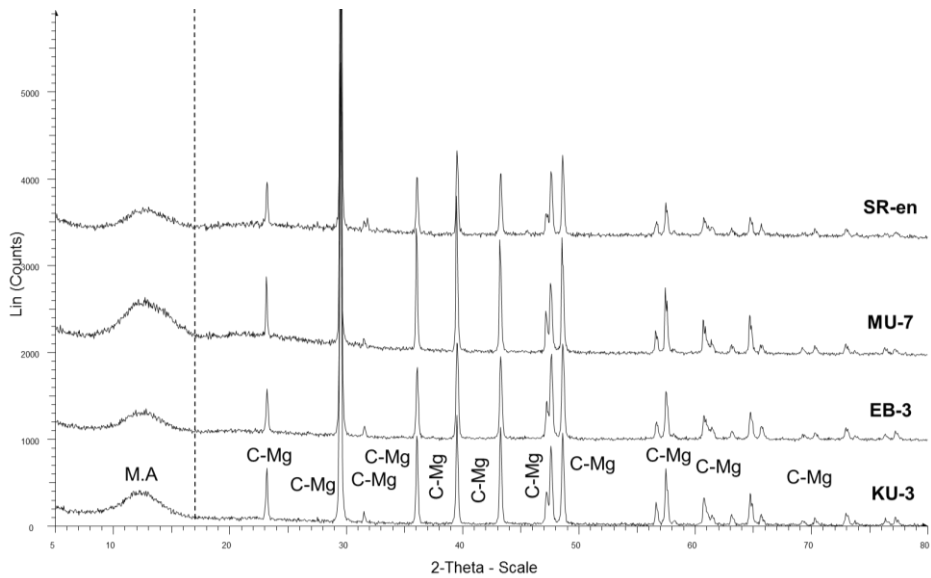


Figura 64. Difractogramas de rayos-x más característicos de las muestras de la fase conglomerante del mortero de las capas de preparación de los estucos siguientes: KU-3, EB-3, MU-7 y SR-en. Acrónimos: C-Mg: calcita magnesiana; M.A: minerales arcillosos

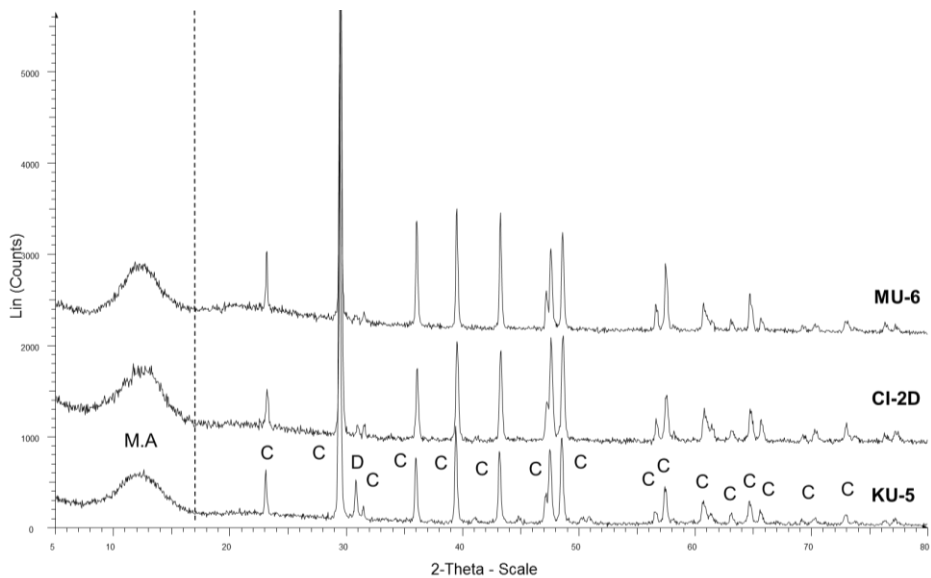


Figura 65. Difractogramas de rayos-x más característicos de las muestras de la fase conglomerante del mortero de las capas de preparación de los estucos siguientes: KU-5, CI-2D y MU-6. Acrónimos: D: dolomita; C: calcita; M.A: minerales arcillosos

En los difractogramas de las figuras 64 y 65, vuelve a aparecer el pico ancho, correspondiente a la presencia de minerales arcillosos (M.A).

La identificación de tres especies minerales carbonatadas (calcita, calcita magnesiana y dolomita) en la fase conglomerante del mortero de las muestras estudiadas, hace pensar que éstas han participado como materia prima en la manufactura de la cal de los morteros de las capas de preparación de los estucos seleccionados. Genéricamente, el mineral identificado en las muestras es la calcita, seguida de la calcita magnesiana y, en menor proporción, la dolomita, que siempre se encuentra acompañada de la calcita. La convivencia de los tres minerales es común en ambientes marinos sedimentarios de formación de carbonatos, como es el caso de la plataforma kárstica de Yucatán. Así pues, el principal producto de la precipitación directa del carbonato será el aragonito y/o la calcita magnesiana, ya que el magnesio es el elemento más común en las aguas marinas y es una de las sustituciones más frecuentes del calcio a la calcita. En concreto, la aragonita<sup>112</sup> es la forma polimórfica<sup>113</sup> menos estable de la calcita, que progresivamente pasa a la forma más estable del carbonato de calcio, la calcita. Dependiendo de la proporción entre  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$ , de la profundidad y de la temperatura de formación en el ambiente sedimentario en cuestión, precipita calcita, calcita magnesiana o dolomita. La coexistencia de calcita y dolomita es frecuente en una roca carbonatada, ya que los procesos diagenéticos son multifásicos y pueden crear diferentes fases, tanto dolomitización como, posteriormente, desdolomitización. El resultado final es una mezcla natural de ambos tipos de minerales. Por lo tanto, aunque el conglomerante del mortero fuese originado de un solo litotipo de material pétreo y del mismo afloramiento rocoso, la mezcla es bastante habitual. De este modo, se explicaría la coexistencia de las dos especies minerales en una misma muestra (muestras MU-6, CI-2D y KU-5).

Por último, la presencia de pequeños picos, en el difractograma de la muestra SR-en, pide un estudio más en profundidad. Así pues, la presencia minoritaria de especies minerales se realiza mediante el estudio detallado del difractograma, concretamente entre la posición 30 y 40° (2 $\theta$ ) (2,97Å – 2,42Å) (recuadro de la figura 66) (Galán, E. *et al.*, 2002; Varas, M.J. *et al.* 2005), que corresponde a la franja del difractograma característica de las especies

---

<sup>112</sup> Muchos organismos marinos segregan aragonita para formar sus caparazones y otras partes duras, como las estructuras esqueléticas producidas por los corales. A medida que se quedan enterrados, la aragonita recristaliza a la forma más estable del carbonato de calcio, la calcita.

<sup>113</sup> Algunos minerales pueden pasar a formas cristalinas más estables en las nuevas condiciones de presión y temperatura, transformándose en nuevos minerales con la misma composición química, pero diferente estructura cristalina (formas polimórficas).

minerales (silicatos cálcicos y aluminosilicatos) que proporcionan propiedades hidráulicas a los morteros.

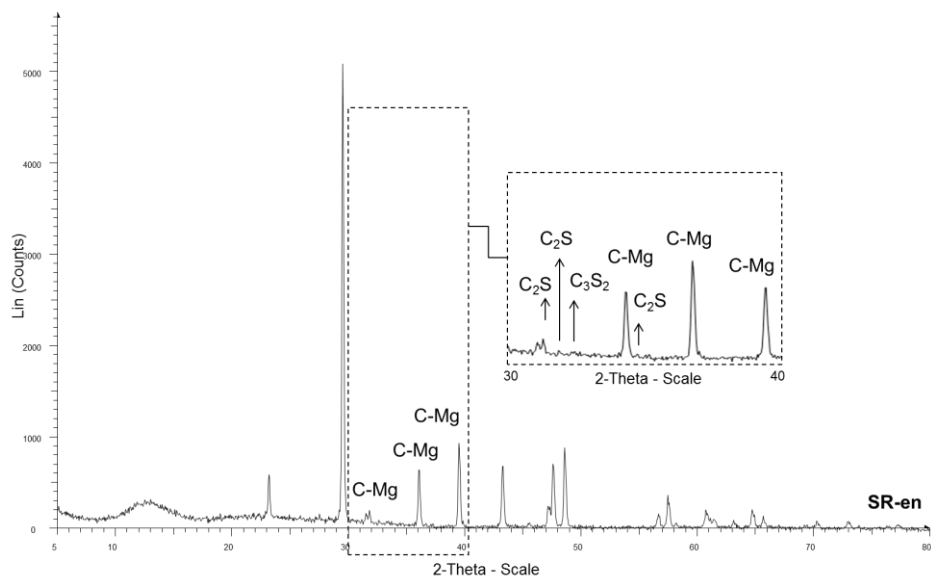


Figura 66. Sustancias minerales minoritarias que se detectan en el difractograma obtenido del análisis de la muestra SR-en. Acrónimos: C-Mg: calcita magnesiana; C<sub>2</sub>S: belita (silicato dicálcico) [2CaO.SiO<sub>2</sub>]; C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>: rankinita (silicato cálcico) [Ca<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>]

Las sustancias minoritarias detectadas en el difractograma de la muestra SR-en (Figura 66) son trazas de silicatos cálcicos (belita y rankinita), compuestos químicos que se forman durante el proceso de calcinación de una roca caliza en presencia de minerales arcillosos, originarios o intencionados, y que proporcionan un efecto puzolánico al mortero. Teniendo en cuenta que la muestra donde aparecen estos compuestos de neoformación pertenece al sitio arqueológico de *Sta. Rosa Xtampak* y que los resultados de la descripción petrográfica del material pétreo de la cantera situada en la periferia del sitio arqueológico, determinan que la materia prima estudiada se clasifica como arcillita carbonatada silicificada, se determina que este material pétreo es, probablemente, el material usado para la manufactura de la cal de los morteros y que, por su naturaleza compositiva, actúa como puzolana natural<sup>114</sup>, convirtiendo al mortero en un mortero puzolánico.

<sup>114</sup> Bajo el nombre de *puzolana* no sólo se designan los productos volcánicos de procedencia italiana y francesa, sino también todas las sustancias análogas que se modifican mediante los hornos y a las que se llega a conferir, de forma muy aproximada, las cualidades de las puzolanas naturales (Vicat, L.J., 1818).



### *Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX)*

El estudio de las secciones transversales y de las láminas delgadas mediante la microscopía electrónica de barrido confirma los resultados obtenidos anteriormente a partir de las observaciones estratigráficas y de las descripciones petrográficas y permite una caracterización químico-mineralógica más completa de la matriz microcristalina que configura la fase conglomerante de los morteros de las capas de preparación. Las muestras seleccionadas son las siguientes: SR-en; ET-2A; DZ-2; CH-en/mo; DL-mo/en; MU-6; EB-5A; CI-7; KU-7 y AC-1.

Por una parte, se confirma, componiendo el árido del mortero, la presencia de agregados calcáreos en todas las muestras estudiadas; la de cristales de cuarzo y nódulos de chert, en las muestras de *Dzibilnocac*; y, la de bioclastos - restos de fósiles-: fragmentos de miliólidos (Figura 67) y de corales, en las muestras de *Ek'Balam*; y, fragmentos de bivalvos, en las muestras de *Chichén Itzá*. En parte, se detecta la posible presencia de agregados globulares de naturaleza orgánica (Figura 68), atribuible a la adición de exudados vegetales a la pasta de cal del mortero, en las muestras de *Sta. Rosa Xtampak*, *Dzibilnocac* y *Chacmultún*, de acuerdo con las apreciaciones que anotó Fray Diego de Landa en el siglo XVI y como ya detecta Magaloni, en sus estudios que va realizando desde el 1996, de la técnica pictórica maya. Además, también se detecta la presencia de minerales metosomáticos, como la tremolita -  $\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{OHSi}_4\text{O}_{11}]_2$ - incolora, la actinolita -  $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5[\text{OH/Si}_4\text{O}_{11}]_2$ - de tonalidad verde y blanca, el talco -  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ - de color verde claro, marronoso y amarillento, originados por un proceso de transformación hidrotermal de las rocas calizas, en las muestras de *El Tabasqueño* y *Dzibilnocac*.



Figura 67. Imagen de electrones retrodispersados (BSK), de detalle de un miliólido en la muestra EB-5A (230x)

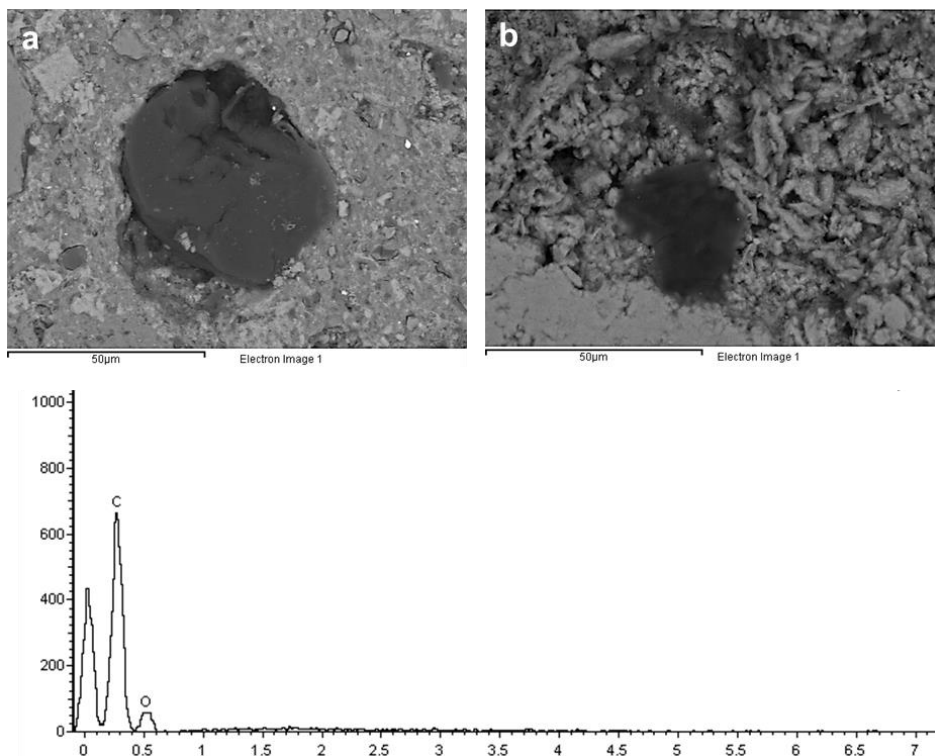


Figura 68. Imagen de electrones retrodispersados (BSK), de detalle de agregados globulares de naturaleza orgánica: a: en la muestra DZ-2 (1000x); b: en la muestra CH-en/mo (1100x). Espectro del análisis puntual de las partículas. Composición elemental mayoritaria: C

Por otra parte, para caracterizar químico-mineralógicamente la fase conglomerante del mortero de las capas de preparación se realiza un estudio semicuantitativo de la proporción elemental de los componentes que constituyen la fase conglomerante de las muestras de estuco estudiadas (Tabla 29). Al representar la proporción de  $\text{Ca}+\text{Mg}$  (óxidos que nos aportan las rocas calizas) respecto a la proporción de  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  (óxidos que nos aportan los minerales de la familia de las arcillas) se observa que la composición de la matriz conglomerante de los morteros se compone mayoritariamente de material carbonatado con una proporción variable de minerales de las arcillas, como ya se ha detectado con otras técnicas instrumentales de análisis; pero también se detecta una clara tendencia a un aumento de estos compuestos arcillosos en las muestras que geográficamente se localizan más al sur de la Península de Yucatán (Figura 69).

Tabla 29. Tabla de los valores medios de porcentaje de óxidos y su desviación estándar (entre paréntesis) obtenidos por SEM-EDX de la matriz conglomerante de las muestras de estuco estudiadas. Acrónimo: RE.: referencia de la muestra de estuco; n.i: no identificable

RE.	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
EB	n.i	0,68 (0,04)	1,55 (0,14)	5,25 (0,16)	n.i	n.i	92,33 (0,32)	n.i	<0,01
CI	n.i	1,18 (0,16)	2,24 (0,13)	7,11 (0,17)	<0,01	<0,01	88,39 (0,18)	n.i	0,77 (0,09)
AC	n.i	<0,01	2,55 (0,15)	6,36 (0,68)	n.i	n.i	90,73 (1,15)	n.i	n.i
KU	n.i	6,42 (0,05)	2,65 (0,04)	7,30 (0,03)	n.i	0,40 (0,01)	83,24 (0,06)	n.i	<0,01
MU	n.i	5,11 (0,28)	2,42 (0,33)	11,89 (1,61)	0,44 (0,04)	0,16 (0,06)	79,43 (2,36)	n.i	0,57 (0,13)
CH	n.i	4,06 (0,01)	3,29 (0,11)	26,04 (0,56)	<0,01	0,36 (0,05)	65,35 (0,89)	n.i	0,67 (0,09)
SR	n.i	0,60 (0,04)	n.i	26,01 (0,15)	n.i	n.i	73,40 (0,12)	n.i	n.i
DZ	n.i	<0,01	1,88 (0,20)	15,57 (0,52)	n.i	n.i	82,18 (0,85)	n.i	n.i
ET	n.i	0,44 (0,01)	3,65 (0,76)	23,47 (1,36)	n.i	0,60 (0,03)	71,10 (2,33)	n.i	0,76 (0,19)
DL	n.i	n.i	n.i	7,06 (1,44)	n.i	n.i	92,14 (2,57)	n.i	n.i

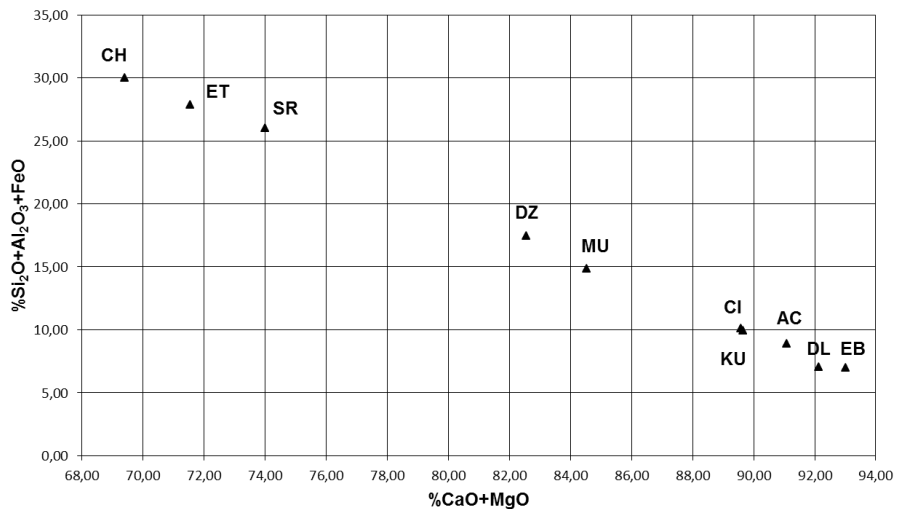


Figura 69. Gráfico donde se muestran los resultados semicuantitativos de las proporciones porcentuales de Ca+Mg respecto la de SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la matriz conglomerante del mortero de las capas de preparación de los estucos

En primer lugar, para interpretar parte de estos resultados se usa la clasificación de las rocas intermedias o mixtas (Vatán, A., 1967): aunque las muestras no son materiales pétreos carbonatados, su composición es análoga a estos materiales y esta clasificación es útil para poder establecer una relación entre la composición actual de la fase conglomerante del mortero y la materia prima a partir de la que se manufacturó la cal que sirvió para realizar el mortero de las capas de preparación de los estucos seleccionados para la investigación. Así pues, según la clasificación mencionada, en las muestras del sitio arqueológico de *Sta. Rosa Xtampak*, les correspondería la denominación de rocas calizas margosas (15-25% de material arcilloso); y, en las muestras de *El Tabasqueño* y *Chacmultún* les correspondería la denominación de rocas margosas calcáreas (25-35% de material arcilloso).

Esta primera interpretación de los resultados obtenidos nos aproxima al conocimiento de las materias primas seleccionadas por los mayas. Pero para poder establecer una interpretación óptima de los resultados no se pueden perder de vista los resultados compositivos obtenidos de las materias primas estudiadas, dos de las cuales se extrajeron de las canteras próximas y relacionadas con dos de los sitios arqueológicos que nos ocupan. Nos referimos a la materia prima P1, extraída de la periferia de *Chacmultún* y a la materia prima P2, extraída de la periferia de *Sta. Rosa Xtampak*. Estos materiales pétreos, desde el punto de vista compositivo, se clasifican como roca caliza débilmente margosa y arcillita carbonatada silicificada, respectivamente. Esta discordancia entre la composición de las materias primas con respecto a la composición de la fase conglomerante plantea diferentes hipótesis:

- En las muestras de *Chacmultún*, el contenido de material arcilloso en la fase conglomerante es mucho más superior respecto al de la materia prima extraída de la cantera local. Estos resultados sugieren, por un lado, una adición intencionada de material arcilloso, posterior a la calcinación de la materia prima, en el momento de manufacturar el mortero; y, por otro, el uso de materias primas no locales, de modo que se abre la posibilidad de un transporte de material pétreo para manufacturar la cal, en época prehispánica. En este sentido, los resultados del análisis por SEM-EDX apoyan la primera hipótesis, ya que evidencian la presencia de minerales arcillosos (Tabla 30) dispersados en la matriz del conglomerante, indicando la adición de arcilla, posterior a la cocción de la materia prima, resultando una matriz micro y criptocristalina mixta de arcilla más material calcáreo recristalizado, que se observa por microscopía electrónica (Figura 70).

Tabla 30. Tabla de los valores medios de porcentaje de óxidos obtenidos por SEM-EDX de la matriz conglomerante del espectro del análisis puntual del mineral arcilloso de *Chacmultún*, en la figura 68. Acrónimo: RE. ma: referencia del mineral arcilloso

RE.	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ma	-	6,13	8,08	52,53	-	0,84	30,90	-	1,51

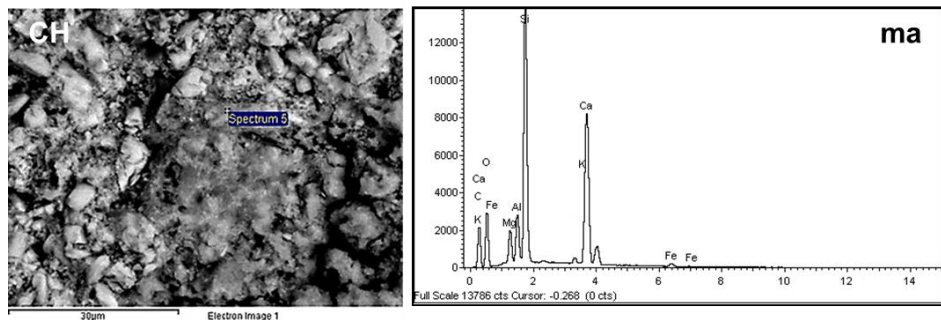


Figura 70. Imagen de electrones retrodispersados (BSK) de la matriz conglomerante del mortero de *Chacmultún* (CH) (1700x), acompañada del espectro del análisis puntual donde se observa la presencia de minerales arcillosos ( $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$ )

- En las muestras de *Sta. Rosa Xtampak*, se evidencia la presencia de silicatos cálcicos de neoformación (Tabla 31). Así pues, la naturaleza de la materia prima, en este caso, carbonatada y silicificada, hace propicia la neoformación, durante la calcinación de esta, de compuestos que proporcionan al mortero un efecto puzolánico, ya que en ella ya preexiste una mezcla homogénea reactiva de componentes de estructura cristalina fina y, la ausencia de aluminio en el análisis puntual de la composición del silicato cálcico neoformado. Por este motivo, los resultados compositivos de la materia prima no coinciden con los resultados de la fase conglomerante del mortero, porque durante la cocción se produce una reacción química que provoca la disociación de los compuestos químicos preexistentes y la generación de nuevos compuestos (Figura 71).

Tabla 31. Tabla de los valores medios de porcentaje de óxidos obtenidos por SEM-EDX de la matriz conglomerante del espectro del análisis puntual del silicato cálcico de *Sta. Rosa Xtampak*, en la figura 69. Acrónimo: RE. sc: referencia del silicato cálcico

RE.	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
sc	-	0,32	-	34,48	-	-	65,20	-	-

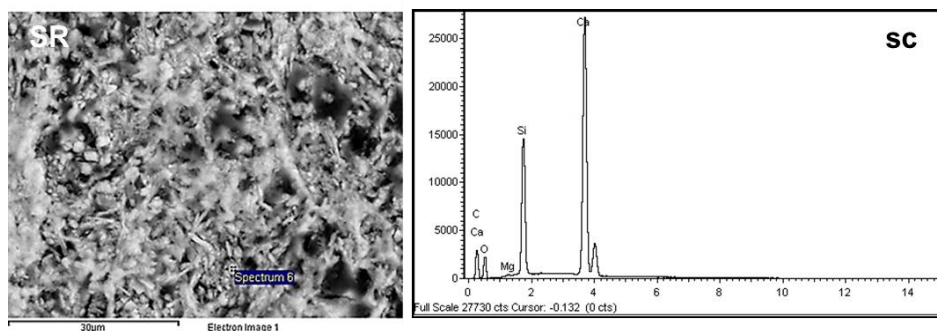


Figura 71. Imagen de electrones retrodispersados (BSK) de la matriz conglomerante del mortero de *Sta. Rosa Xtampak* (SR) (1700x), acompañada del espectro del análisis puntual donde se observa la presencia de belita (silicato dicálcico) ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )

A parte, hay que añadir que en la imagen de electrones retrodispersados de la figura 71 se detecta también, la presencia de agregados globulares de naturaleza orgánica, atribuible a la adición de exudados vegetales, dispersos en la pasta de cal del mortero, de la misma manera que en la figura 66 y la presencia de agregados, de unos 5  $\mu\text{m}$  de diámetro, con una morfología similar a “fibras amontonadas”, tal como define Carrillo, M. *et al.* (2014), que pueden ser la consecuencia de la posible agrupación de fibras de un mineral de la arcilla llamado halloysita.

Además, los resultados del estudio semicuantitativo de la proporción elemental de los componentes que constituyen la fase conglomerante de las muestras de *El Tabasqueño*, son muy similares a los resultados obtenidos en las muestras de *Sta. Rosa Xtampax*. Sin embargo, en este caso, los compuestos químicos que son reactivos y hacen posible la neoformación también de silicatos cálcicos (Figura 72), en la matriz conglomerante (Tabla 32), son minerales de naturaleza arcillosa que se encuentran formando parte de la composición carbonatada de la materia prima, tal como nos indica la presencia de aluminio y de potasio en el análisis puntual del silicato cálcico.

Tabla 32. Tabla de los valores medios de porcentaje de óxidos obtenidos por SEM-EDX de la matriz conglomerante del espectro del análisis puntual del silicato cálcico de *El Tabasqueño*, en la figura 70. Acrónimo: RE. sc: referencia del silicato cálcico

RE.	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
sc	-	0,82	2,14	33,42	-	0,57	63,06	-	-

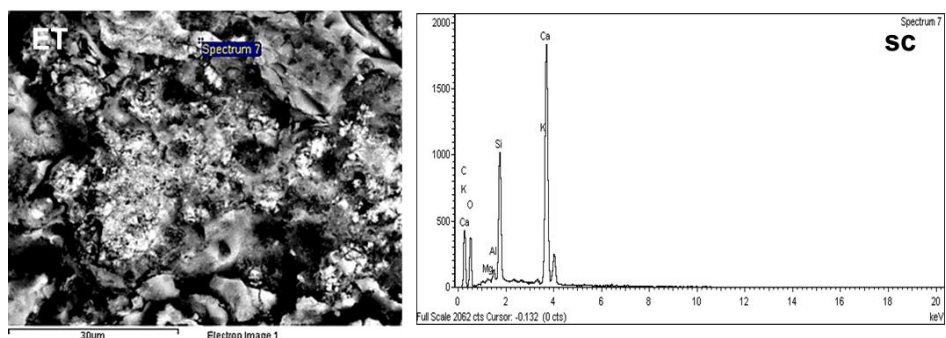


Figura 72. Imagen de electrones retrodispersados (BSK) de la matriz conglomerante del mortero de *El Tabasqueño* (ET) (1700x), acompañada del espectro del análisis puntual donde se observa la presencia de belita (silicato dicálcico) ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )

En efecto, la presencia de aluminio y de potasio en las muestras de *El Tabasqueño*, contrarrestada con los resultados de la caracterización de las materias primas, nos indica que, en este caso, las fases hidráulicas provienen de la presencia de minerales de la familia de las arcillas con el material carbonatado calcinado, en contraposición, a los resultados de las muestras de *Sta. Rosa Xtampak*, donde la ausencia de aluminio y de potasio nos indican que las fases hidráulicas provienen de la naturaleza carbonatada silicificada de la materia prima escogida para ser calcinada.

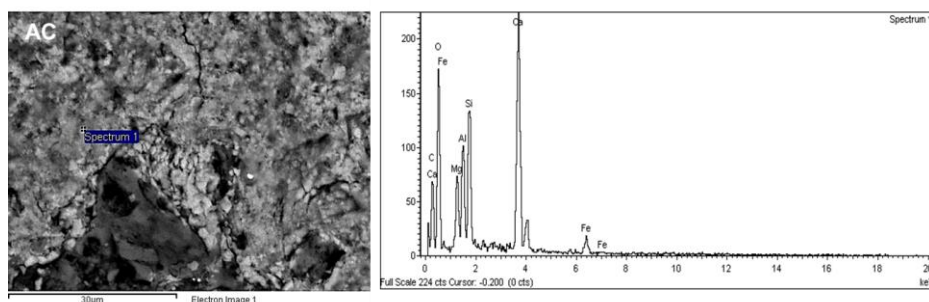
En segundo lugar, en las muestras de los sitios arqueológicos de *Acanceh*, de *Chichén Itzá*, de *Kulubá*, de *Mulchic* y de *Dzibilnocac*, se evidencia la presencia de minerales arcillosos dispersos dentro de la matriz carbonatada de la fase conglomerante, de la misma manera que en las muestras de *Chacmultún*. Estos resultados confirman las descripciones del proceso de hidratación de la cal realizadas por indígenas de la Península de Yucatán, según los cuales, el material a hidratar era la mezcla en seco de la cal viva ( $\text{CaO}$ ) con el *sascab*, que podía ser tamizada y mezclada hasta obtener un conjunto homogéneo. Posteriormente, la mezcla (cal viva y *sascab*) era sumergida en agua gomosa de *holol* y se dejaba así durante dos semanas antes de ser usada (Magaloni, D., 1997, 2001). A parte, hay que tener en cuenta que estudios anteriores (Pacheco, J.Y. *et al.*, 2003) han determinado que químicamente el *sascab* no es cien por ciento carbonatado, sino que se compone, también, de arcillas y otros compuestos. Así pues, estos resultados obtenidos de la matriz de la fase conglomerante corroboran los estudios etnográficos realizados, hasta la fecha, de la tecnología de fabricación de los estucos mayas.

A continuación, se presenta la tabla 33 con los valores de porcentaje de óxidos del análisis puntual obtenido por SEM-EDX de los minerales arcillosos de la matriz conglomerante de las muestras de estuco estudiadas; y la figura 73 en la que se presentan diferentes imágenes de electrones retrodispersados acompañadas de sus espectros de los análisis puntuales, donde se pueden observar las arcillas dispersas en la matriz carbonatada:

Tabla 33. Tabla de los valores de porcentaje de óxidos obtenidos por SEM-EDX, de los minerales arcillosos de la matriz conglomerante de los espectros de los análisis puntuales de la figura 71. Acrónimo: RE. referencia de la muestra de estuco

RE.	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
CI	0,71	7,60	7,21	25,82	n.i	0,76	43,89	0,94	13,07
AC	n.i	11,90	17,83	28,65	n.i	0,84	30,90	n.i	1,51
KU	n.i	6,82	2,34	7,24	n.i	0,41	81,71	1,47	n.i
MU	n.i	6,38	7,89	49,87	n.i	2,03	29,94	n.i	3,89
DZ	n.i	n.i	1,74	15,93	n.i	n.i	81,58	n.i	0,75

Los valores porcentuales de óxidos de la tabla 33 muestran una composición química estequiométrica típica de los minerales de la familia de las arcillas, excepto por el valor del óxido de calcio, que se ve influenciado por la composición carbonatada de la matriz que le rodea. El valor medio del óxido de calcio (CaO) de los minerales de las arcillas es del orden del 13% (Palmonari, C. *et al.*, 1985).





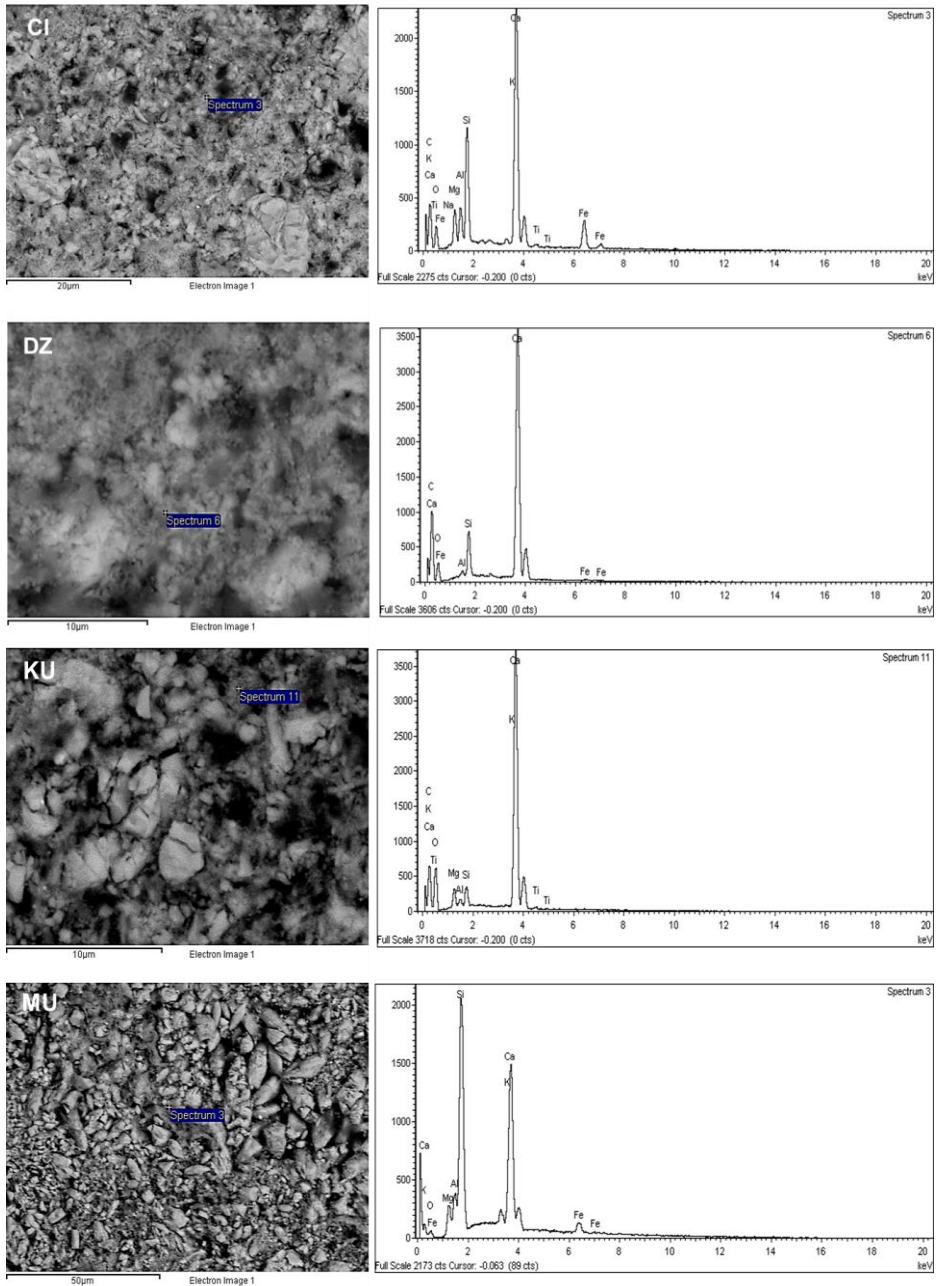


Figura 73. Imágenes de electrones retrodispersados (BSK) de la matriz conglomerante del mortero: de *Acanceh* (AC) (1700x); de *Chichén Itzá* (CI) (1700x); *Dzibilnocac* (DZ) (1700x); *Kulubá* (KU) (5000x) y *Mulchic* (MU) (1000x), acompañadas de los espectros del análisis puntual donde se observa la presencia de minerales arcillosos dispersos dentro una matriz carbonatada

Por último, en las muestras de los sitios arqueológicos de *Ek'Balam* y *D'zula* no se observan de manera clara los minerales arcillosos dispersos en la matriz carbonatada. Este hecho, se puede interpretar valorando que el *sascab* local es de una variedad litológica mucho más pura, dejando de aportar minerales arcillosos a la pasta de cal.

Por tanto, de la síntesis de los resultados desarrollados hasta el momento, hay que destacar la presencia de silicatos cálcicos de neoformación en la matriz de la fase conglomerante del mortero. Teniendo en cuenta las características geológicas de la Península de Yucatán, la formación de estos compuestos químicos puede darse, por un lado, por el uso de rocas calizas débilmente margosas, calizas margosas, margas calcáreas o arcillitas carbonatadas silicificadas, en el proceso de la quema de la cal o, por otro lado, por la adición de minerales arcillosos a la pasta de cal antes de la quema. En ambos casos, la calcinación de una mezcla de calcita (portadora de CaO) y de minerales arcillosos (portadores de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), sea o no intencionada, da lugar a la formación de óxido de calcio [CaO] y de silicato bicálcico [ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ] llamado belita; es decir, fases hidráulicas naturales de la cal (Knöfel, D., 1985). También se pueden formar otros compuestos, dependiendo de la temperatura de cocción a la que se llegue durante la quema, de la composición química, de la composición mineralógica, del tamaño y de la morfología de las partículas de las materias primas que intervienen y de la homogeneidad de la mezcla. La temperatura de cocción ha sido variable a lo largo de la historia, oscilando entorno los 700 y 800°C (Alastuey, Á., 1993). Las transformaciones químicas que se pueden dar durante esta sucesión térmica son las siguientes (Knöfel, D., 1985; Varas, J., *et al.*, 2005): entre los 600 y 800 °C, se produce la descomposición de las arcillas y la consecuente formación de la belita ( $\text{C}_2\text{S}$ ), de la wollastonita (CS) y de los aluminatos cálcicos (CA) y, la descomposición de la roca caliza (a 750 °C, más o menos, se encuentra la presencia de la cal libre (C)); entre los 800 y 900 °C, la formación de la rankinita ( $\text{C}_3\text{S}_2$ ) y de la gehlenita ( $\text{C}_2\text{AS}$ )<sup>115</sup>. Por tanto, la detección de la belita en las muestras de estuco nos da una primera aproximación de la posible temperatura de cocción a la que se llegó durante la producción de la cal, como mínimo a 800 °C. Faltaría realizar estudios complementarios termogravimétricos (TG), para afinar estos resultados y establecer la sucesión térmica.

Además, la presencia de un aumento de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) formando una capa continua silíceas, en la superficie de la muestra de estuco del sitio de *Sta. Rosa Xtampak*, puede acompañar a estas fases hidráulicas, las cuales contienen

---

<sup>115</sup> En la química del cemento son corrientes estas abreviaturas para designar los compuestos químicos: C=CaO; S=SiO<sub>2</sub>; A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; F=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; M=MgO; Cs=CaSO<sub>4</sub>; H=H<sub>2</sub>O; N=Na<sub>2</sub>O; K=K<sub>2</sub>O.

silíce soluble libre, que puede migrar a la superficie del mortero, durante el proceso de carbonatación, y cristalizar en superficie (Álvarez, J.Y. *et al.*, 2006) (Figura 74).

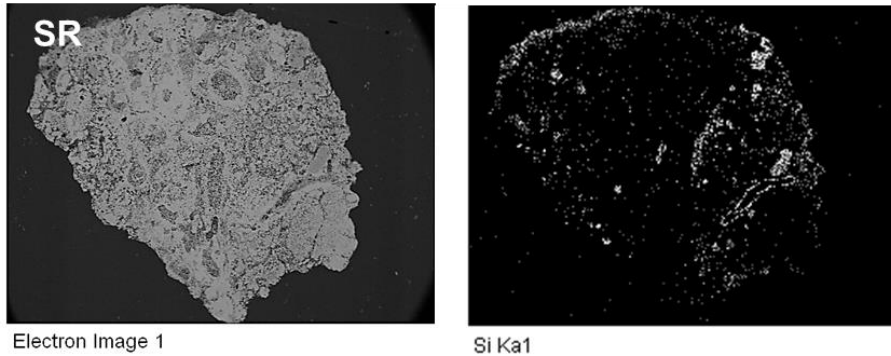


Figura 74. Distribución de la composición elemental de Si en la muestra de estuco SR-en

Ante estos resultados, el siguiente paso es valorar la hidráulicidad de los morteros de las capas de preparación de los estucos estudiados, que por los resultados obtenidos son susceptibles de ser cales hidráulicas naturales. En el siglo XIX, Vicat, J. (1818) definió la teoría de la hidráulicidad, afirmando que cuando una roca caliza contiene una cierta proporción de arcilla íntimamente mezclada, da lugar, por cocción, a una cal hidráulica. Tradicionalmente, las cales hidráulicas naturales se han clasificado en tres categorías (Oates, H., 1998, Boynton, S., 1980): débilmente hidráulicas, moderadamente hidráulicas y eminentemente hidráulicas y son evaluadas por la teoría de *Cementation Index* (CI), que se basa en las suposiciones científicas y empíricas siguientes: (1). las propiedades hidráulicas son impartidas por la formación de compuestos químicos de calcio y de magnesio con la sílice ( $\text{Si}_2\text{O}$ ), la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y el hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); (2). la sílice ( $\text{Si}_2\text{O}$ ) se combina con la cal ( $\text{CaO}$ ) molecularmente formando silicato tricálcico ( $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ); (3). la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) se combina con la cal ( $\text{CaO}$ ) para formar aluminato dicálcico ( $2\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ ); (4). la magnesia ( $\text{MgO}$ ) reacciona molecularmente igual como la cal ( $\text{CaO}$ ), pero con un ritmo más lento; (5). el óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) reacciona molecularmente de manera equivalente como la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Este *Cementation Index* se calcula según la fórmula siguiente:

$$\text{CI: } (2,8x\%\text{SiO}_2)+(1,1x\%\text{Al}_2\text{O}_3)+(0,7x\%\text{Fe}_2\text{O}_3) / \%\text{CaO}+(1,4x\%\text{MgO})$$

Si el valor del *Cementation Index* resultante del cálculo es <0,30, la cal usada es aérea y si el valor oscila entre 0,30 y 1,1, la cal es hidráulica: cal débilmente hidráulica (0,30-0,5); cal moderadamente hidráulica (0,5-0,7); cal eminentemente hidráulica (0,7-1,1). Los resultados del cálculo del *Cementation Index* de la fase conglomerante del mortero, de las capas de preparación, de las muestras de estuco de *Sta. Rosa Xtampak* y de *El Tabasqueño*, se presentan en la tabla 34 siguiente. Hay que mencionar que, en esta tabla se han añadido los valores resultantes del cálculo del *Cementation Index*, de los sitios arqueológicos de *Ek'Balam* y *D'zula*, porque estos valores no estarán falseados por la proporción de minerales arcillosos presentes en la matriz, ya que no se observan dispersos por la matriz conglomerante, tal como se apunta en párrafos anteriores; y de ese modo, se obtienen valores comparativos entre las diferentes muestras estudiadas.

Tabla 34. Valores resultantes del cálculo del *Cementation Index* de la fase conglomerante de los morteros y valoración de la hidraulicidad natural correspondiente al valor. Acrónimos: REF.: referencia de las muestras de estuco; CI: valor resultante del cálculo del *Cementation Index*

REF.	$(2,8x\%SiO_2)+(1,1x\%Al_2O_3)$ $+(0,7x\%Fe_2O_3)$	$\%CaO+$ $(1,4x\%MgO)$	CI	Hidraulicidad natural del conglomerante
EB	16,55	93,28	0,18	cal aérea
DL	19,77	92,14	0,21	cal aérea
SR	72,83	74,24	0,98	cal eminentemente hidráulica
ET	70,26	71,72	0,98	cal eminentemente hidráulica

Los valores del cálculo del *Cementation Index* (CI) nos determinan, antes que nada, que los morteros de las capas de preparación de los estucos de los sitios arqueológicos de *Ek'Balam* y de *D'zula*, no tienen un comportamiento hidráulico; y, en segundo término, que las muestras de estuco de los sitios de *Sta. Rosa Xtampak* y de *El Tabasqueño*, tienen un comportamiento eminentemente hidráulico.

Aunque no se trata de productos industriales, una manera gráfica de representar la hidraulicidad de los conglomerantes industriales y clasificarlos en cales aéreas, cales hidráulicas y cementos, en general, es a partir del diagrama ternario llamado Rankin, correspondiente al sistema  $SiO_2-Al_2O_3/Fe_2O_3-CaO/MgO$  (Knöfel, D., 1985). En la figura 75 que sigue se representan los valores obtenidos del análisis semicuantitativo de la proporción elemental de los componentes que constituyen la fase conglomerante de las muestras de estuco estudiadas, para dividir las en cales aéreas y cales hidráulicas. Se puede observar que, igual que con los valores obtenidos del cálculo del *Cementation*

Index (CI), por un lado, las muestras de estuco de los sitios de *Ek'Balam* y *D'zula* se localizan en las cales aéreas; y, las muestras de estuco de los sitios arqueológicos de *Sta. Rosa Xtampak* y de *El Tabasqueño* se localizan en las cales hidráulicas industriales. Sin embargo, tal como se puede observar en la figura 73, estas cales hidráulicas no se ajustan a la zona asignada para las cales hidráulicas industriales, se localizan un poco por encima. Este hecho se debe a su naturaleza compositiva, con un alto porcentaje de sílice, que caracteriza a las materias primas de las capas de preparación usadas para confeccionar el conglomerante del mortero de estos sitios arqueológicos y que les confiere esta hidraulicidad natural específica.

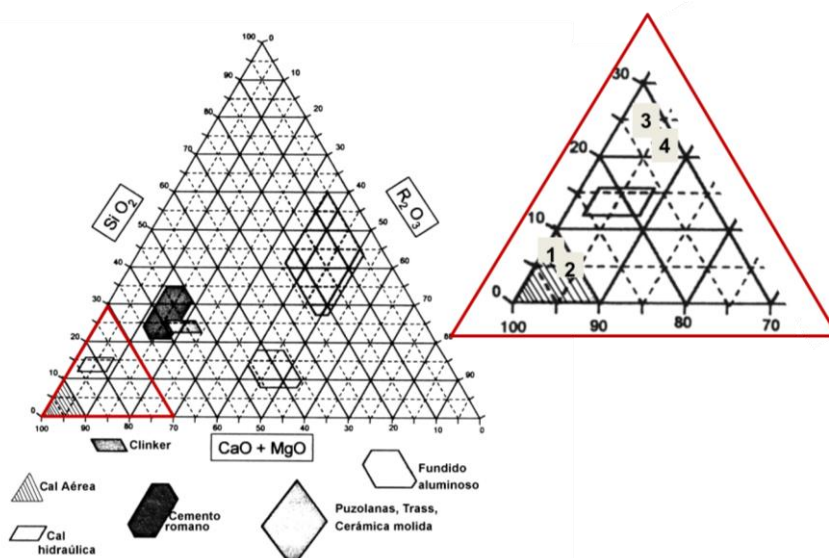


Figura 75. Diagrama del sistema ternario  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO/MgO}$  (diagrama Rankin). Autor dibujo: Knöfel, D., 1985, modificado por el autor de la tesis. Acrónimos: 1: *Ek'Balam*; 2: *D'zula*; 3: *Sta. Rosa Xtampak*; 4: *El tabasqueño*;  $\text{R}_2\text{O}_3$ :  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$

Por otro lado, para interpretar estos resultados también se puede usar la clasificación a partir del rango composicional entre calcita y dolomita, la cual nos permite cuantificar la dolomitización del material pétreo a través del porcentaje de óxido de magnesio (MgO) con respecto al de óxido de calcio (CaO). Así pues, según la clasificación mencionada: en las muestras de los sitios arqueológicos de *Ek'Balam*, *D'zula*, *Acanceh*, *Chichén Itzá*, *Dzibilnocac*, *Sta. Rosa Xtampak*, *El Tabasqueño* y *Chacmultún* les correspondería la denominación de rocas calizas; mientras que a las muestras de los sitios arqueológicos de *Kulubá* y de *Mulchic*, les correspondería la denominación de

rocas calizas magnésicas o magnesianas. Por tanto, estos resultados nos confirman que las rocas carbonatadas usadas para manufacturar la cal de los morteros, en ningún caso, son rocas dolomíticas, solo en dos conjuntos de muestras, la proporción de MgO es suficientemente elevada (>5% de MgO) para poder clasificarlas como rocas calizas magnesianas (Figura 76).

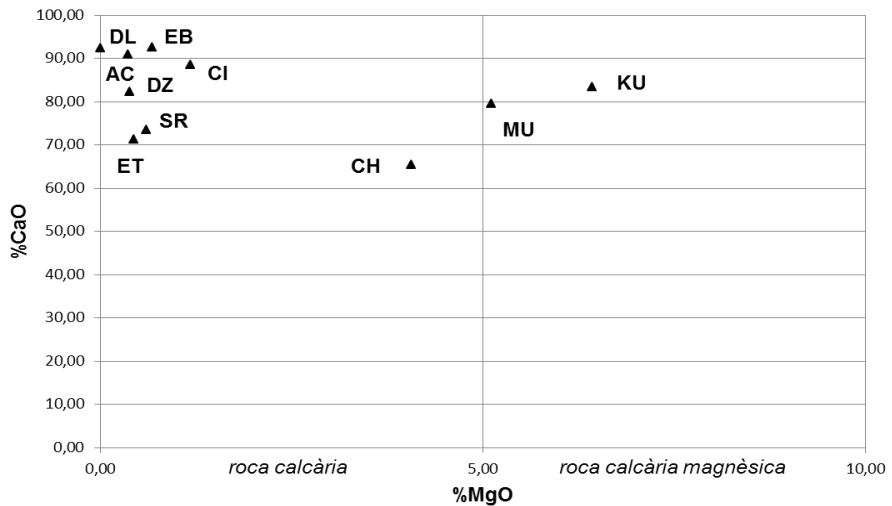


Figura 76. Resultados semicuantitativos de las proporciones porcentuales de Mg respecto la de Ca en la matriz conglomerante del mortero de las capas de preparación de los estucos

### **1.1.3.2.2. Otros materiales asociados a la cal**

Antes de proceder a la caracterización mineralógica y nanomorfológica de los otros materiales asociados a la cal, de los morteros de las capas de preparación de los estucos seleccionados, se procede a la determinación del porcentaje de residuo insoluble del mortero de cal mediante ataque ácido, de las muestras siguientes: SR-en, ET-2A, ET-9B, ET-9/7, DZ-2, CH-en/mo, DL-mo/en, MU-6, MU-7, EB-mo, EB-2, EB-3, EB-5A, EB-7, CI-2, CI-2D, CI-8B, KU-3, KU-5, KU-7, AC-1, AC-2 y AC-7/7A. El procedimiento queda especificado y desarrollado en el apartado 1.1.2.4.1 (*Determinación del porcentaje de residuo insoluble del mortero de cal mediante ataque ácido*) de esta investigación. La fracción insoluble obtenida después de realizar el ataque ácido sobre las muestras seleccionadas es indicativa de los componentes de naturaleza silícica (normalmente, cuarzo) y silicatada (normalmente, feldespatos, micas, minerales de la arcilla, etc.), ya que estos minerales no se atacan ni se disuelven por la acción del ácido. Esta fracción insoluble se analiza mediante la microdifracción de rayos-x ( $\mu$ -DRX) y la microscopía electrónica de transmisión (MET), para caracterizar e identificar estos compuestos resultantes del ataque ácido.

#### **1.1.3.2.2.1. Caracterización mineralógica y nanomorfológica de los materiales asociados a la cal**

##### *Microdifracción de rayos-x ( $\mu$ -DRX)*

Las muestras de la fracción insoluble resultantes del ataque ácido seleccionadas para la caracterización mineralógica mediante la microdifracción de rayos-x ( $\mu$ -DRX) son las que siguen: SR-en, ET-2A, ET-9B, DZ-2, CH-en/mo, DL-mo/en, MU-6, EB-mo, EB-2, EB-3, CI-2, KU-3, KU-5, AC-1 y AC-2. Esta técnica instrumental de análisis nos permite determinar las especies minerales restantes del ataque ácido de las muestras, es decir, aquellas que están asociadas a la cal y que se han detectado que forman parte de la fase conglomerante mediante técnicas instrumentales de análisis más convencionales (DRX y SEM-EDX), pero en las que no se han podido determinar qué minerales de la familia de las arcillas forman parte de la fase conglomerante.

Los resultados de las especies minerales mayoritarias que se detectan en los microdifractogramas obtenidos del análisis de las muestras de la fracción

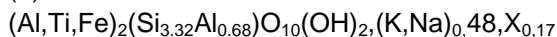
insoluble resultantes del ataque ácido, a través de la microdifractometría de rayos-x, se muestran en la tabla 35 siguiente.

Tabla 35. Especies minerales mayoritarias de los microdifractogramas obtenidos del análisis de la muestras de la fracción insoluble resultantes del ataque ácido. Acrónimos: REF. F.I.: referencia de las muestras de la fracción insoluble resultantes; sustancia mineral mayoritaria: +++; sustancia mineral moderadamente mayoritaria: ++; sustancia mineral poco presente: +; sustancia mineral no presente: -; d: distancias características entre los planos de la red cristalina de las especies minerales detectadas

REF. F.I.	ESPECIES MINERALES MAYORITARIAS OBTENIDAS				
	illita- montmorillonita	caolinita/ halloysita	cuarzo	calcita	d (Å)
SR-en	+	+	+	+	(1), (2), (3), (4)
ET-2A	+	+	+	-	(1), (2), (3), (4)
ET-9B	+	+	+	-	(1), (2), (3)
DZ-2	++	++	+++	-	(1), (2), (3)
CH-en/mo	++	++	+	-	(1), (2), (3)
DL-mo/en	-	-	-	-	-
MU-6	-	-	-	-	-
EB-mo	-	-	-	-	-
EB-2	+	+	-	-	(1), (2)
EB-3	+	+	-	-	(1), (2)
CI-2	-	-	-	-	-
KU-3	++	++	+	+	(1), (2), (3), (4)
KU-5	++	++	+	+	(1), (2), (3), (4)
AC-1	+++	+++	+	+	(1), (2), (3), (4)
AC-2	+++	+++	+	+	(1), (2), (3), (4)

*Fórmulas estructurales teóricas de las especies minerales detectadas en los microdifractogramas y d (Å):*

(1). De la illita-montmorillonita es:



d (Å): 3,33; 3,09; 2,833; 2,563; 2,451; 1,482; 1,287

(2). De la caolinita/halloysita es:  $Al_2Si_2O_5(OH)_4/Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O$

d (Å): 2,565; 2,502; 2,386; 2,341; 1,486

(3). Del cuarzo:  $SiO_2$

d (Å): 3,343; 2,458; 2,282; 1,817; 1,541

(4). De la calcita (carbonato cálcico):  $CaCO_3$

d (Å): 3,035; 2,285; 1,917; 1,875



La presencia de la especie mineral calcita en los difractogramas de las muestras analizadas se debe a la detección de pequeños restos de material soluble (carbonatado) remanente del pretratamiento de la determinación del porcentaje de residuo insoluble del mortero de cal mediante ataque ácido. Esta especie mineral no se tendrá en cuenta en la síntesis de los resultados mediante esta técnica instrumental de análisis.

La figura 77 presenta los microdifractogramas de rayos-x más característicos de las muestras de la fracción insoluble del ataque ácido estudiadas. Cabe especificar que sólo se presentan los microdifractogramas donde se ha detectado la presencia de especies minerales. Los microdifractogramas van de la posición  $23^\circ$  a la  $76^\circ$  ( $2\Theta$ ) ( $3,52\text{\AA} - 1,29\text{\AA}$ ). Para configurar la figura 75 se han escogido los difractogramas siguientes que representan el conjunto de las muestras de cada sitio arqueológico: EB: el de la muestra EB-3; KU: el de la muestra KU-3; AC: el de la muestra AC-1; CH: el de la muestra CH-en/mo; SR: el de la muestra SR-en; DZ: el de la muestra DZ-2; ET: el de la muestra ET-2A.

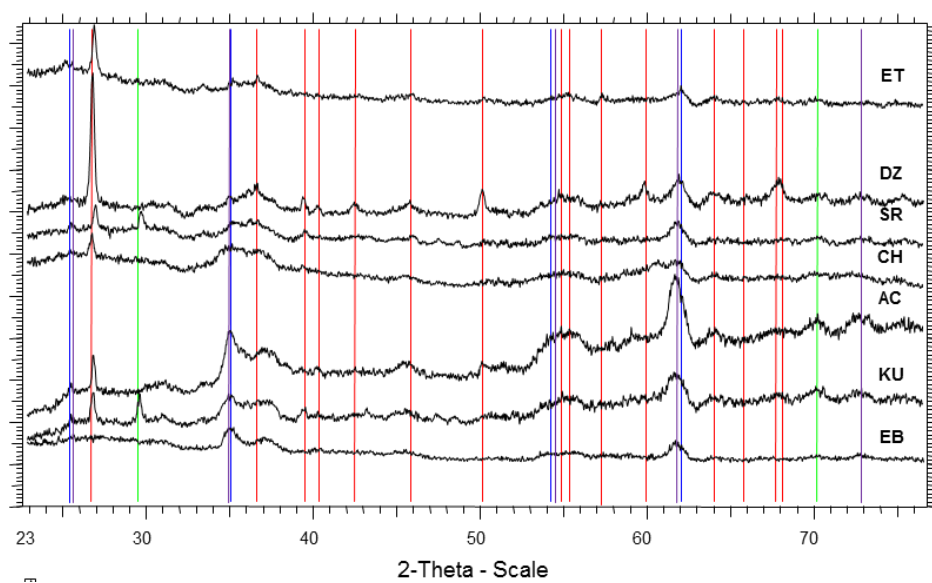


Figura 77. Microdifractogramas de rayos-x más característicos de las muestras de la fracción insoluble del ataque ácido siguientes: EB: el de la muestra EB-3; KU: el de la muestra KU-3; AC: el de la muestra AC-1; CH: el de la muestra CH-en/mo; SR: el de la muestra SR-en; DZ: el de la muestra DZ-2; ET: el de la muestra ET-2A. Colores que representan la posición de las especies minerales detectadas: azul: illita-montmorillonita; violeta: caolinita/halloysita; rojo: cuarzo; verde: calcita

En general, los resultados obtenidos nos indican la presencia mayoritaria de minerales interestratificados de la familia de las arcillas, illita-montmorillonita (tipo 2:1) y del mineral de la arcilla caolinita/halloysita (tipo 1:1), acompañados de cuarzo. Es importante destacar que los picos de la illita-montmorillonita se solapan con los picos de la caolinita, casi en su totalidad. Así pues, se puede determinar que las dos especies minerales están presentes en las muestras estudiadas. Además, la caolinita es un mineral de las arcillas que forma parte del grupo de las candiditas. Este grupo se encuentra formado por cuatro especies minerales: caolinita, dickita, nacrita y halloysita. La única diferencia entre la caolinita y la halloysita es una mayor proporción de agua (de hidratación o de cristalización) que hace que su hábito cristalino varíe de hexagonal a tabular, respectivamente, pero que no es apreciable por microdifracción de rayos-x. Por este motivo, no se puede determinar si la especie mineral presente en los microdifractogramas corresponde a la caolinita o a la halloysita (polimorfo hidratado de la caolinita), ya que sus picos se solapan.

Se tienen en cuenta dos aspectos. Primero, que estos resultados se pueden contextualizar con uno de los tres grandes grupos de arcillas de la Península de Yucatán, definidas por Ipsphording, C. (1984): arcillas primarias originadas por la cristalización directa y formadas por talco, clorita, paligorskita-sepiolita y capas mixtas de caolinita-montmorillonita. En este caso, las muestras estudiadas tan sólo evidencian la presencia de caolinita-montmorillonita interestratificada con illita. Estas arcillas constituyen el tipo genérico de arcillas que se encuentran en la península y que están relacionadas con rocas carbonatadas y con suelos, tal como se detecta en las descripciones petrográficas de las muestras de las capas de preparación de los estucos estudiados, donde se observan diferentes nódulos arcillosos y partículas ferruginosas, todos ellos procedentes de suelos de origen edáfico.

En segundo lugar, si se tienen en cuenta los resultados obtenidos por SEM/EDX, en los que se determinan que los morteros de las capas de preparación de los estucos de *Sta. Rosa Xtampak* y *El Tabasqueño* presentan un conglomerante de cal con fases hidráulicas naturales o puzolánicas, se pueden buscar indicios, en los difractogramas, del calentamiento de los minerales de las arcillas que forman parte de la mezcla natural de material carbonatado y minerales arcillosos que se calcinan para manufacturar la cal. Estudios que hablan sobre la obtención industrial de puzolanas, a partir de la calcinación de minerales arcillosos, determinan que: la caolinita tiene reactividad a temperaturas próximas a los 600°C; que las montmorillonitas tienen actividad puzolánica a temperaturas, en el rango de los 700-800°C; y,

que las illitas necesitan una temperatura mucho más alta por ser reactivas, debido seguramente a su estructura más estable térmicamente (Alujas, A. *et al.*, 2010). Otros autores, reportan que la caolinita desaparece a partir de los 700°C y que la illita se disocia gradualmente entre 850 y 1000°C (Cultrone, G. *et al.*, 2001; Papachristodoulou, C. *et al.*, 2006; Nodari, L. *et al.*, 2007; Zuluaga, C. *et al.*, 2010). Aun así, existen otros autores que proponen temperaturas menos elevadas para el comienzo de estas reacciones: la caolinita a 400°C y la illita a 700°C (Maritan, L. *et al.*, 2006; Trindade, J., *et al.*, 2009).

Aunque, Alujas, A. *et al.* (2009) también afirma que el comportamiento térmico de una mezcla de minerales arcillosos, como es nuestro caso, difiere del comportamiento de cada fase por separado. Por tanto, la reactividad puzolánica de los minerales arcillosos depende, mayoritariamente, de la composición de la fracción arcillosa (pura o mezcla de diferentes minerales arcillosos) del material carbonatado que está sometido a un proceso térmico. Estos cambios estructurales se observan en los difractogramas obtenidos de muestras de minerales arcillosos calcinados a diferentes temperaturas: se observa la pérdida de las señales correspondientes a la caolinita y el debilitamiento de las señales correspondientes a la montmorillonita, a partir de los 600°C, mientras que las señales que pertenecen a la illita desaparecen a los 925°C.

En nuestro caso, en los microdifractogramas obtenidos de las muestras de la fracción arcillosa (residuo insoluble del ataque ácido) de las muestras de *Sta. Rosa Xtampak* y de *El Tabasqueño*, se aprecia un cierto debilitamiento de los picos de la caolinita y de la illita-montmorillonita, que se pueden atribuir a un calentamiento de los minerales arcillosos y a la adquisición de una cierta actividad puzolánica inducida por el proceso térmico de calcinación de la materia prima para manufacturar la cal.

A continuación, se presenta la comparación entre los microdifractogramas obtenidos de las muestras de *Kulubá* y de *Acanceh*, sitios arqueológicos en los que todos los resultados apuntan que el conglomerante del mortero de las capas de preparación de los estucos está compuesto por cal aérea con diferentes proporciones de minerales arcillosos adicionados posteriormente a la cocción de la materia prima; y los microdifractogramas obtenidos de las muestras de *Sta. Rosa Xtampak* y de *El Tabasqueño*, sitios arqueológicos en los que todos los resultados apuntan que el conglomerante tiene una cierta actividad puzolánica (Figura 78).

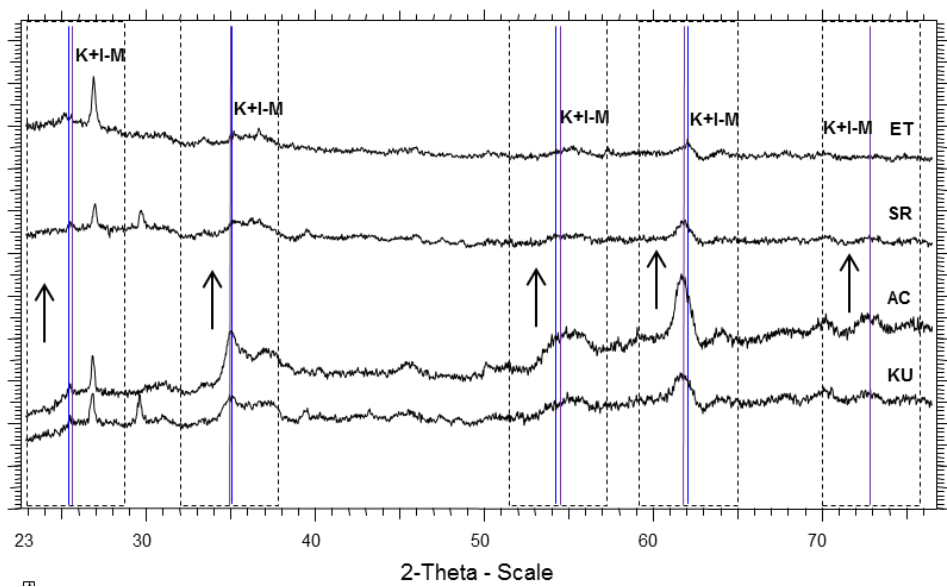


Figura 78. Comparación entre los microdifractogramas obtenidos de las muestras de *Kulubá* (KU) y de *Acanceh* (AC) y los microdifractogramas obtenidos de las muestras de *Sta. Rosa Xtampak* (SR) y *El Tabasqueño* (ET). Acrónimos: K+I-M: caolinita/halloysita+illita-montmorillonita

Se puede pensar, sin embargo, que este debilitamiento de los picos de la caolinita y de la illita-montmorillonita se debe a la menor cantidad de minerales arcillosos presentes en la pasta de cal del mortero, ya que esta técnica instrumental de análisis es semicuantitativa. Aun así, esta hipótesis queda refutada cuando se comparan los microdifractogramas expuestos en la figura 76 con los resultados del porcentaje del residuo insoluble obtenidos del ataque ácido de las muestras, en cuestión. En términos medios, el porcentaje del residuo insoluble de las muestras de *Kulubá* y de *Acanceh*, es de un  $10\% \pm 2$  y el porcentaje del residuo insoluble de las muestras de *El Tabasqueño*, es de un  $30\% \pm 2$ . Si fuera cierta la hipótesis propuesta, que se basa en la relación directa de la proporción de minerales arcillosos con los picos más elevados de los microdifractogramas, los resultados obtenidos serían totalmente al contrario de los obtenidos realmente. Así pues, estos resultados nos indican que el debilitamiento de los picos de los microdifractogramas de las muestras de *El Tabasqueño* no se debe a la cantidad de minerales arcillosos presentes en las muestras, sino seguramente al efecto de su calentamiento durante la calcinación de la materia prima carbonatada que lleva incorporada una proporción variable de estos minerales arcillosos.

Además, el 8% de porcentaje del residuo insoluble obtenido de las muestras de *Sta. Rosa Xtampak*, es difícil de explicar. Se plantean diferentes hipótesis: destrucción parcial de los compuestos de silicatos cálcicos durante el proceso del ataque ácido de las muestras, a pesar de realizar el pretratamiento en frío; o, porcentaje menor del residuo insoluble debido a la mínima presencia de minerales de la arcilla. Y, también es complicado de correlacionar con los microdifractogramas obtenidos, porque su composición carbonatada silicificada hace que, seguramente, no sea conveniente utilizar el argumento del debilitamiento de los picos de los minerales de la arcilla para detectar el efecto puzolánico de las muestras. Por este motivo, es del todo indispensable contar con la correlación de los resultados de diferentes técnicas instrumentales de análisis, para no cometer errores interpretativos de los resultados obtenidos y seguir investigando sobre la incipiente hidraulicidad de los morteros de las capas de preparación de los estucos de la pintura mural maya de las Tierras Bajas Mayas del Norte.

#### *Microscopía electrónica de transmisión (MET)*

A partir de la caracterización nanomorfológica de una selección de las muestras más representativas analizadas por  $\mu$ DRX, esta técnica instrumental de análisis nos permite afinar más todavía y diferenciar los hábitos cristalinos de los minerales de las arcillas presentes en las muestras de la fracción insoluble resultantes del ataque ácido. Las muestras seleccionadas son las siguientes: SR-en, ET-2A, DZ-2, CH-en/mo, EB-2, KU-3 y AC-2. Las especies minerales mayoritarias de una selección de muestras de la fracción insoluble resultantes del ataque ácido, detectadas a través de la microscopía electrónica de transmisión (TEM), se muestran en la tabla 36 siguiente.

Tabla 36. Especies minerales mayoritarias detectadas a través de TEM de una selección de muestras de la fracción insoluble resultantes del ataque ácido. Acrónimos: REF. F.I.: referencia de las muestras de la fracción insoluble resultantes; sustancia mineral detectada: +; sustancia mineral no presente: -.

REF. F.I.	ESPECIES MINERALES MAYORITARIAS DETECTADAS		
	illita- montmorillonita	caolinita	halloysita
SR-en	+	-	+
ET-2A	+	-	+
DZ-2	+	+	-
CH-en/mo	+	-	-
EB-2	+	-	+
KU-3	+	+	-
AC-2	+	+	+

En las figuras siguientes, se presentan las microfotografías más representativas del estudio de las muestras realizadas por TEM donde se indican las especies minerales mayoritarias detectadas (Figuras 79, 80, 81, 82, 83, 84 y 85).

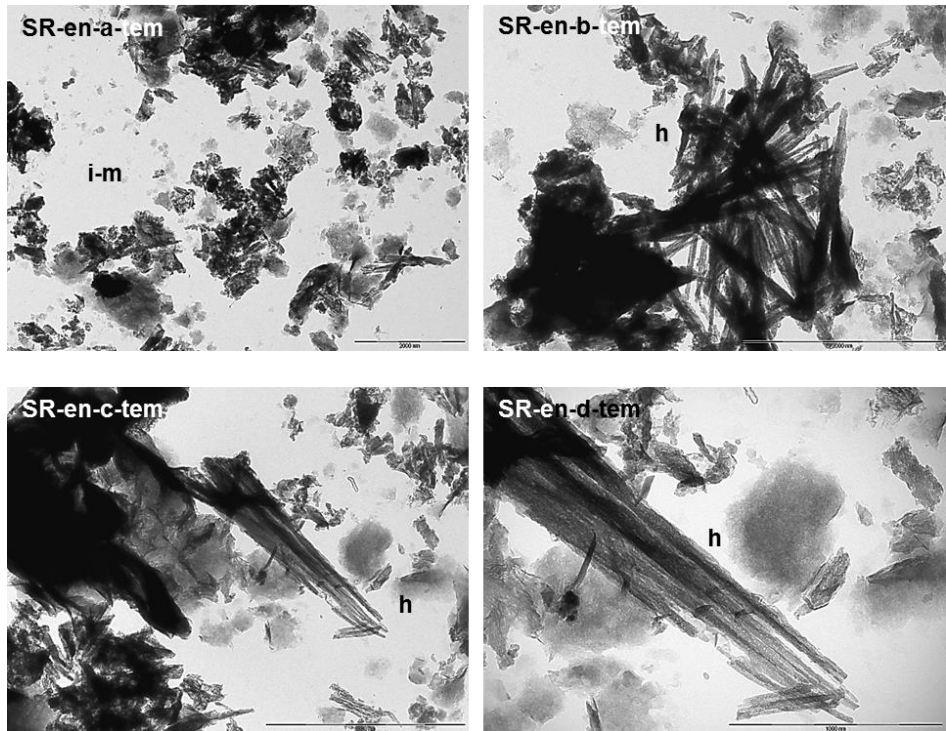
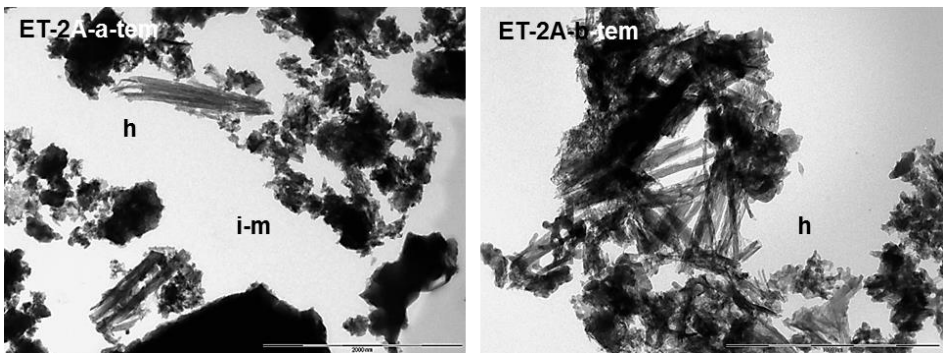


Figura 79. Microfotografías TEM (SR-en), de izquierda a derecha y de arriba abajo, SR-en-a-tem: (2950x); SR-en-b-tem: (5200x); SR-en-c-tem: (5200x); SR-en-d-tem: SR-en-c a 11500x. Acrónimos: i-m: illita-montmorillonita; h: halloysita



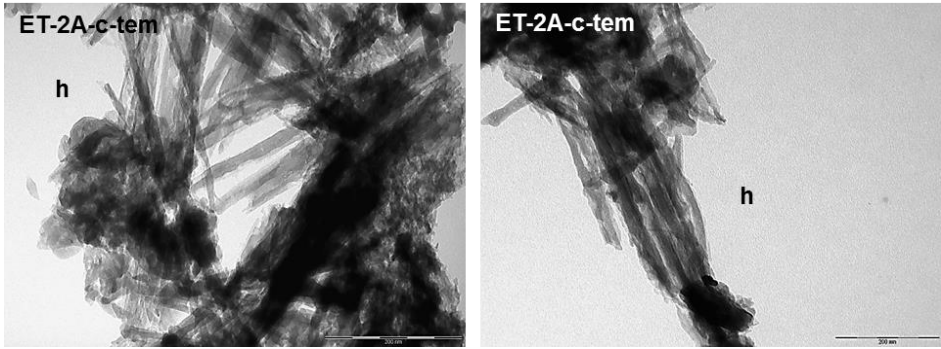


Figura 80. Microfotografías TEM (ET-2A), de izquierda a derecha y de arriba abajo, ET-2A-a-tem: (5200x); ET-2A-b-tem: (11500x); ET-2A-c-tem: (21000x); ET-2A-d-tem: (28500x). Acrónimos: i-m: illita-montmorillonita; h: halloysita

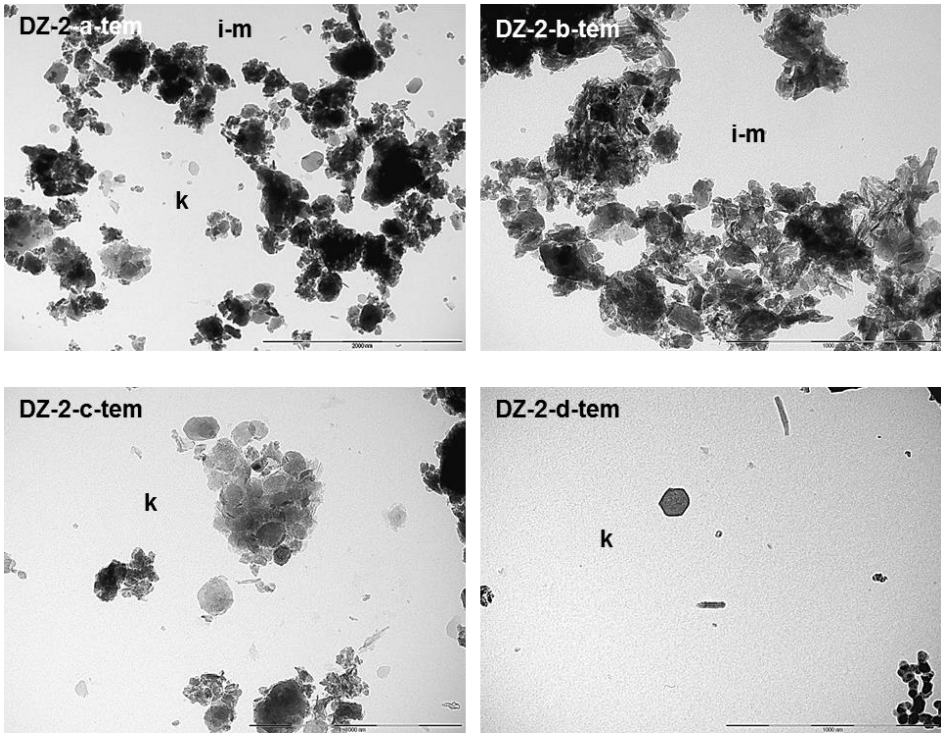


Figura 81. Microfotografías TEM (DZ-2), de izquierda a derecha y de arriba abajo, DZ-2-a-tem: (5200x); DZ-2-b-tem: (5200x); DZ-2-c-tem: (11500x); DZ-2-d-tem: (11500x). Acrónimos: i-m: illita-montmorillonita; k: caolinita

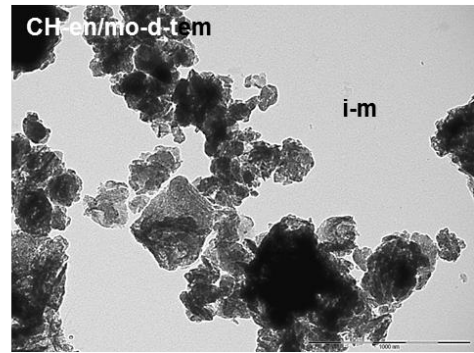
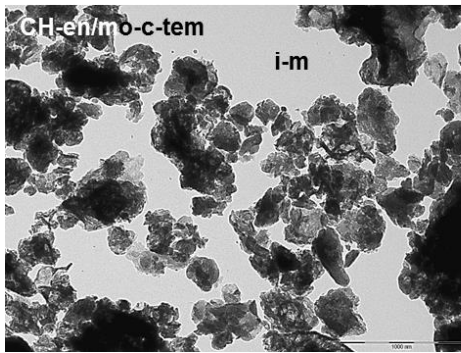
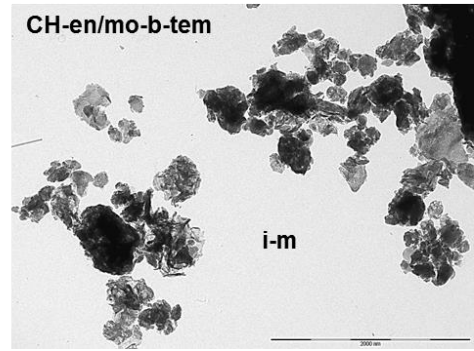
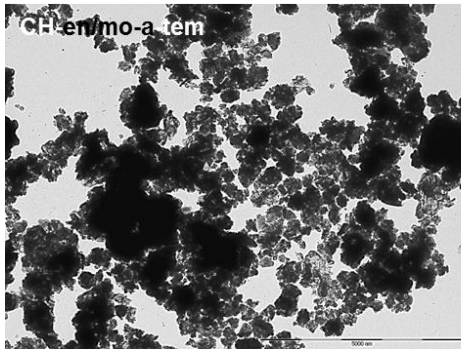
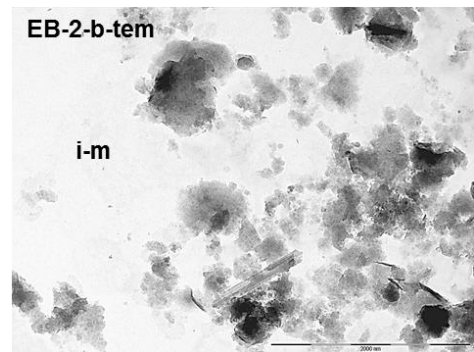
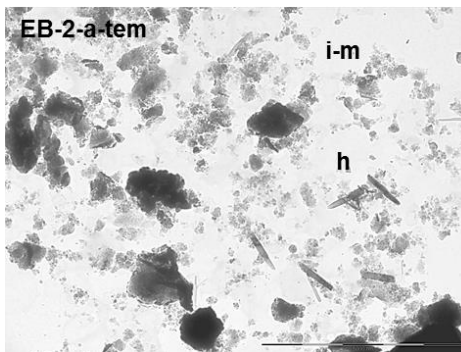


Figura 82. Microfotografías TEM (CH-en/mo), de izquierda a derecha y de arriba abajo, CH-en/mo-a-tem: (2200x); CH-en/mo-b-tem: (5200x); CH-en/mo-c-tem: (6600x); CH-en/mo-d-tem: (8900x). Acrónims: i-m: illita-montmorillonita





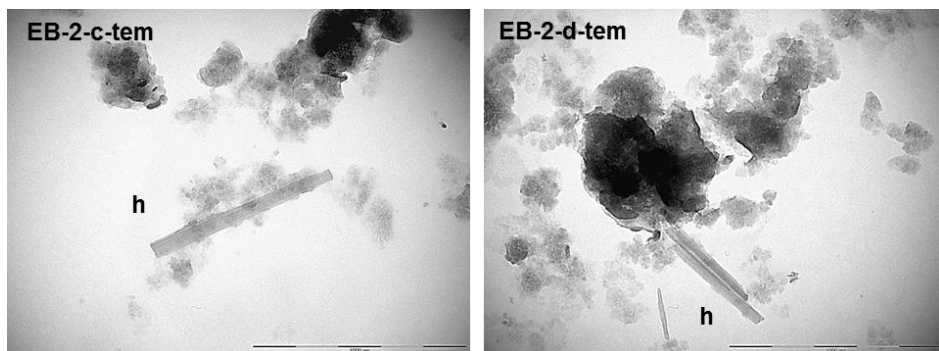


Figura 83. Microfotografías TEM (EB-2), de izquierda a derecha y de arriba abajo, EB-2-a-tem: (2200x); EB-2-b-tem: (5200x); EB-2-c-tem: (11500x); EB-2-d-tem: (11500x). Acrónims: i-m: illita-montmorillonita; h: halloysita

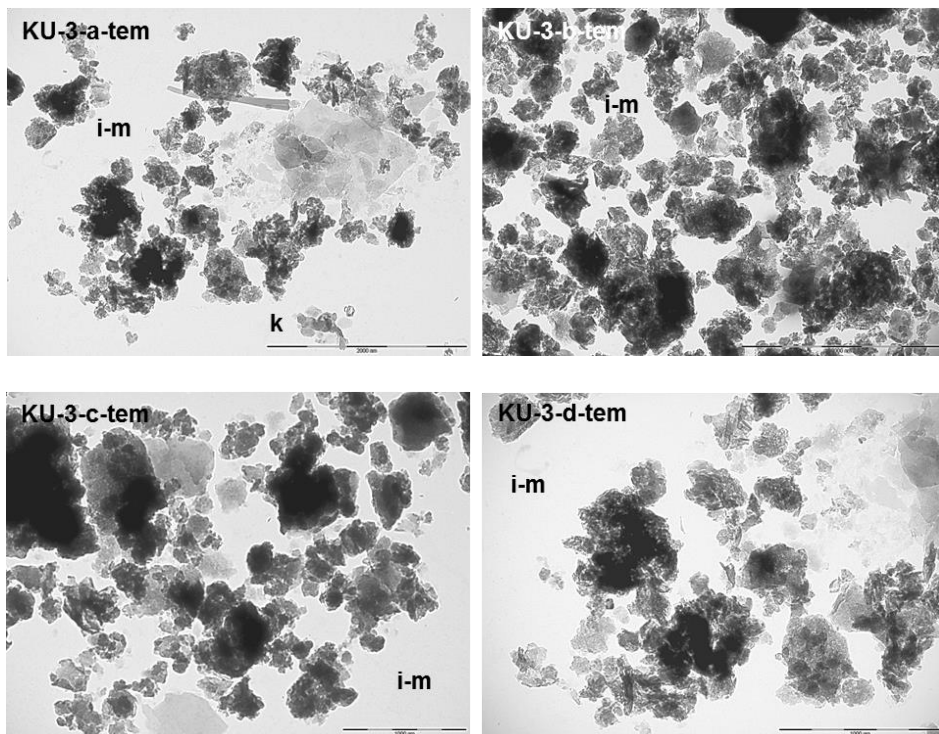


Figura 84. Microfotografías TEM (KU-3), de izquierda a derecha y de arriba abajo, KU-3-a-tem: (5200x); EB-2-b-tem: (5200x); KU-2-c-tem: (6600x); KU-2-d-tem: (8900x). Acrónimos: i-m: illita-montmorillonita; k: caolinita

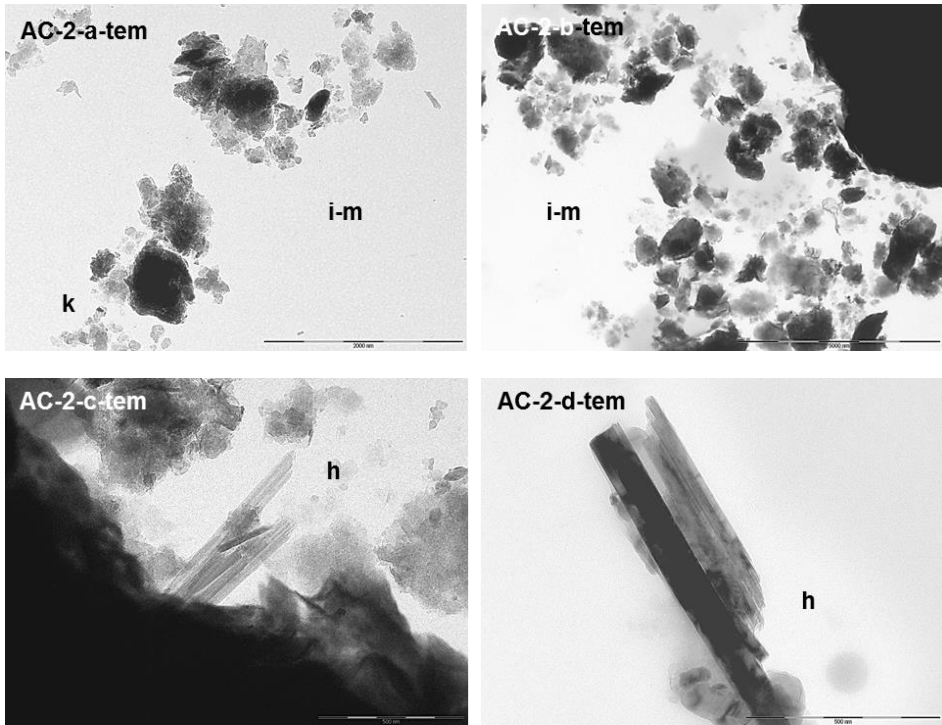


Figura 85. Microfotografías TEM (AC-2), de izquierda a derecha y de arriba abajo, AC-2-a-tem: (2200x); AC-2-b-tem: (2200x); AC-2-c-tem: (15500x); AC-2-d-tem: (21000x). Acrónimos: i-m: illita-montmorillonita; k: caolinita; h: halloysita

Así pues, el conjunto de las microfotografías realizadas por TEM muestran la presencia mayoritaria de halloysita (el polimorfo hidratado de la caolinita) con respecto a la presencia de caolinita, que tan sólo aparece en las muestras de los sitios arqueológicos de *Dzibilnocac*, *Kulubá* y *Acanceh*, incluidas dentro de una masa irregular y/o partículas aglomeradas de illitas-montmorillonitas, dependiendo de la dispersión de la muestra. Estas partículas aglomeradas están formadas por una mezcla de minerales de las arcillas, las cuales son muy similares unas de otras a nivel morfológico, pero las illitas son más alargadas y están mejor definidas. En parte, es difícil observar partículas individuales, tanto de illita como de montmorillonita (García, P., 1997) (Figura 86).

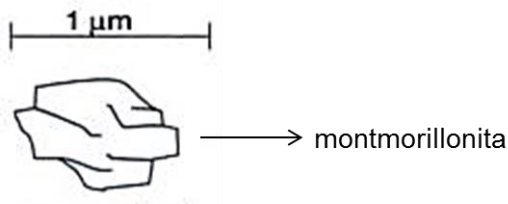


Figura 86. Morfología de una partícula de montmorillonita. Autor dibujo: Meunier, A., 2005

Las partículas de caolinita se pueden diferenciar de las de halloysita porque la caolinita adopta una morfología de placas hexagonales que oscilan de 0,3 a 5  $\mu\text{m}$  de diámetro y las partículas de halloysita se presentan como partículas tabulares alargadas que oscilan de 1 a 2  $\mu\text{m}$  de longitud, aunque se aprecia alguna partícula  $< 1 \mu\text{m}$  (Figura 87).

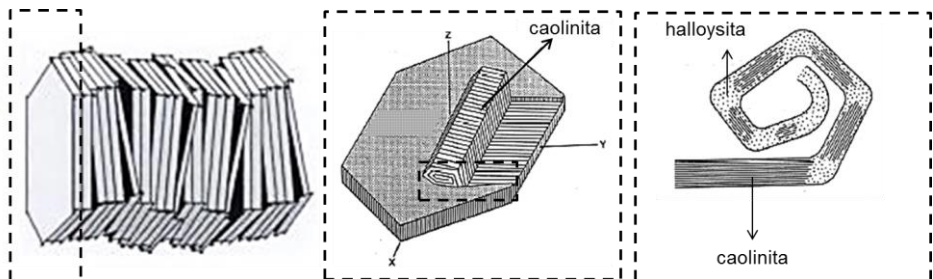


Figura 87. Morfología de un conjunto de placas de caolinita y esquema teórico del polimorfo hidratado de la caolinita, la halloysita. Autor dibujo: placas de caolinita: Meunier, A., 2005; placa de caolinita y de halloysita: Rodas, M., modificado por el autor de la tesis

Por tanto, a partir de la caracterización nanomorfológica por TEM de las muestras estudiadas se puede determinar que la halloysita está presente, sustituyendo o en asociación, con la caolinita, afinando los resultados obtenidos por  $\mu\text{DRX}$ . Este polimorfo de la caolinita se puede originar a partir de procesos meteóricos o kársticos pedogenéticos, asociados a ambientes tropicales. Generalmente, se encuentra formando parte de un suelo o como mineral acompañante de la alteración arcillosa avanzada (Joussein, E. *et al.*, 2005), condiciones que son propicias en la Península de Yucatán.

## 1.1.4. DISCUSIÓN FINAL DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 1.1.4.1. Discusión final de resultados

- Las muestras de materia prima del entorno geológico de las áreas arqueológicas estudiadas (de *Chacmultún*, de *Sta. Rosa Xtampax*, de *Xatjún* y de *Acanceh*), usadas para la manufactura del conglomerante del mortero de las capas de preparación de los estucos mayas, se corresponden a las partes más externas del relieve o de la cobertura calcárea de la plataforma de la Península de Yucatán, concretamente a los materiales de las *sascaber*as y a los materiales de los horizontes de los suelos edáficos. Estos materiales pertenecen a las facies litológicas del período del Cuaternario antiguo (época del Pleistoceno) y del período del Cuaternario moderno (época del Holoceno), respectivamente. Exceptuando algún caso del cual, según la profundidad de explotación del material pétreo, se pueden extraer fragmentos de roca del sustrato geológico estratigráficamente más antiguo, de la edad del paleoceno-eoceno o plioceno-mioceno (Tucker, M.E. *et al.*, 1990; Cabadas, H. *et al.*, 2010; Bautista, F. *et al.*, 2011a; Solleiro-Rebolledo, E. *et al.*, 2011).

- Las muestras de sedimentos arcillosos, extraídas de la cueva de *Sak lu'um*, se componen mayoritariamente de paligorskita acompañada de dolomita y de montmorillonita-clorita. Estos resultados indican que estas muestras de sedimentos arcillosos forman parte del grupo de las arcillas primarias que se forman por la cristalización directa, el tipo genérico de arcillas que se encuentran en la Península de Yucatán, que están formadas por talco, clorita, paligorskita-sepiolita y capas mixtas de caolinita-montmorillonita (Isphording, C., 1984; Pablo-Galán, L., 1996). Las muestras de sedimentos arcillosos, extraídas de las cuevas de las localidades de *Muna* y de *Ticul* se diferencian de las anteriores y, respectivamente, se componen mayoritariamente de montmorillonita-clorita y, en menor proporción, de dolomita y paligorskita. Estos resultados indican que estas muestras de sedimentos arcillosos forman parte de las arcillas detríticas que se forman por la sedimentación de detritus, en su mayoría restringidas a las áreas de cuencas de polje dispersas por la sierra de Ticul y formadas por arcillas esmectitas asociadas a cuarzo detrítico, óxidos de hierro y, en menor proporción, caolinita.

- El conglomerante de las muestras de las capas de preparación de los estucos mayas estudiados es de cal aérea (*Chichén Itzá*, *Ek'Balam*, *D'zula*, *Acanceh*, *Chacmultún* y *Dzibilnocac*), en su gran mayoría, y en menor proporción, de cal aérea magnesiana (*Kulubá* y *Mulchic*). En ningún caso, de cal dolomítica. En algunos casos puntuales, esta cal presenta una cierta hidraulicidad, convirtiendo esta en cal hidráulica natural (*Sta. Rosa Xtampax* y *El*

*Tabasqueño*). Esta hidraulicidad se origina por dos vías: (1). *Sta. Rosa Xtampak*: la naturaleza de la materia prima, en este caso, carbonatada y silicificada, hace propicia la neoformación, durante la calcinación de ésta, de compuestos que proporcionan al mortero un efecto puzolánico, ya que en ella ya preexiste una mezcla homogénea reactiva de componentes de estructura cristalina fina; (2). *El Tabasqueño*: el efecto puzolánico proviene de la presencia de minerales de la familia de las arcillas con el material carbonatado calcinado, es decir, de materiales carbonatados que en su composición pueden ir de débilmente margosos a margas, dependiendo de la proporción de minerales de las arcillas que estén formando parte de la composición del material pétreo y que se calcinan para dar paso al conglomerante.

Así pues, el *Cementation Index* (CI) definido por diferentes autores (Oates, H., 1998, Boynton, S., 1980) y aceptado como una herramienta para valorar, clasificar y cuantificar la hidraulicidad natural de los conglomerantes es una manera muy adecuada de estudiar y caracterizar los morteros arqueológicos con una finalidad arqueométrica. Mucho mejor que usar el índice de hidraulicidad ( $I_h$ ), un cálculo mucho más extendido y aplicado al ámbito industrial de los materiales constructivos, como el cemento. Aun así, el diagrama ternario Rankin (Knöfel, D., 1985), el modo gráfico de representar la hidraulicidad de los conglomerantes industriales y clasificarlos en cales aéreas, cales hidráulicas y cementos, se ha demostrado como una manera útil de agrupar las muestras a partir de los resultados de la caracterización del conglomerante de los morteros estudiados, dependiendo de su hidraulicidad. Aunque, hay que tener en cuenta que, seguramente, los resultados que se obtengan de la caracterización de morteros arqueológicos no encajen a la perfección con las zonas definidas en el diagrama, ya que los conglomerantes estudiados son elaborados, en su gran mayoría, con las materias primas del entorno geológico del sitio arqueológico, en cuestión. Esta peculiaridad, normalmente ocasionará pequeñas desviaciones de las zonas asignadas como estándares industriales. Para acabar, cabe recordar que, para aplicar estas herramientas de estudio a la caracterización de morteros arqueológicos, primero se debe tener la certeza de la presencia de compuestos químicos hidráulicos, detectados por otras técnicas instrumentales de análisis, tal como se propone en esta investigación, ya que sino, se pueden cometer errores interpretativos importantes.

- De manera muy diferente, los minerales arcillosos son determinantes en las características y las propiedades del conglomerante de estos tipos de morteros. En efecto, la evidencia de la presencia de minerales arcillosos, concretamente de illita-montmorillonita y caolinita/halloysita, dispersos dentro de la matriz

carbonatada de la fase conglomerante (de *Acanceh*, de *Chichén Itzá*, de *Kulubá*, de *Mulchic* y de *Dzibilnocac*), los cuales corresponden a arcillas primarias originadas por la cristalización directa, sugieren una adición, intencionada o no, de material arcilloso, posterior a la calcinación de la materia prima, a la hora de manufacturar el mortero, tal como apunta recientemente Strualino, L. (2015) en las conclusiones de su tesis doctoral. Si esta adición no es intencionada, puede tener lugar: (1). durante el proceso previo a la hidratación de la cal, en la que la cal viva se mezcla con el *sascab*. Esta investigación ha determinado que el árido de las muestras de las capas de preparación de estucos estudiadas, generalmente de tipo *sascab* (calcáreo) contienen, en parte, una cierta proporción de minerales arcillosos procedentes, en general, de los suelos edáficos; (2). durante el proceso de hidratación de la cal, donde el material se deposita en pozos excavados en el suelo. Las paredes del pozo pueden incorporar cierto contenido de minerales arcillosos a la pasta de cal mientras se apaga.

En este punto, hay que mencionar que los minerales arcillosos determinados en la caracterización de las capas de preparación de las muestras de estuco, acompañando la cal, no se corresponden a los minerales arcillosos detectados en las muestras de sedimentos arcillosos estudiadas en esta investigación. La diferencia básica radica en la ausencia de paligorskita frente a la presencia de halloysita. Estos resultados se añaden a la línea de investigación que señala, por una parte, la importancia de esta arcilla como ingrediente de la cultura precolombina para la manufactura de pigmentos en las pinturas murales, la escultura y la cerámica (Doménech, A. *et al.*, 2009; Sánchez del Río, M., *et al.*, 2009) y, por otra parte, que estas arcillas se encuentran restringidas a la región nordeste, de la Península de Yucatán, localizadas en dolinas o *cenotes* (Isphording, C., 1984). En cambio, para la manufactura de los morteros de las capas de preparación de los estucos mayas, la extracción de la materia prima no era tan selectiva y se localizaba en las *sascaber*as, tal como ya se ha especificado anteriormente, donde es propicio la formación de halloysita por procesos meteóricos o kársticos pedogenéticos, formando parte de un suelo asociado a ambientes tropicales. Por tanto, si se tiene en cuenta que las áreas susceptibles de extracción de la materia prima, para la manufactura de la cal, son las *sascaber*as, áreas de la cobertura de la plataforma de Yucatán, la presencia de halloysita queda contextualizada con el afloramiento geológico de extracción.

- Una de las características más específicas y singulares de estos morteros mayas es la adición de gomas vegetales procedentes de los exudados de los árboles en el agua durante el proceso de hidratación de la cal, detectadas por

SEM-EDX en la fase conglomerante de las muestras de *Chacmultún*, *Sta. Rosa Xtampak* y *Dzibilnocac*. La mezcla (de cal viva y de *sascab*) se sumergía en agua gomosa de *holol* y se dejaba así durante dos semanas antes de ser usada (Magaloni, D., 1997, 2001).

Para acabar, conviene decir que se cree que el efecto puzolánico detectado en ciertas muestras de estucos mayas ha sido fortuito, condicionado por la materia prima del entorno geológico del sitio arqueológico y, no ha jugado un papel determinante en la durabilidad de la pintura mural maya a lo largo del tiempo. Sin embargo, sí que ha podido influir en sus propiedades mecánicas, no necesariamente indispensables en las prestaciones que se piden a un revestimiento mural. Lo que sí que ha sido determinante es el proceso de elaboración del mortero, el hecho de mezclar previamente la cal viva y el árido con adición, intencionada o no, de minerales arcillosos y, posteriormente hidratar la mezcla en agua gomosa, proporciona al mortero unas prestaciones reológicas que lo hacen muy maleable y dócil, en estado fresco. Cabe mencionar, también, que a parte de la plasticidad que aportan los minerales arcillosos al mortero, las gomas vegetales adicionadas extraídas de los exudados de los árboles también aportan otras propiedades. Sickels, B. (1981), en su lista de aditivos históricos, menciona que estos azúcares de origen vegetal se han usado para: emulsionar o estabilizar, produciendo una mayor dureza y estabilidad a la mezcla; modificar la plasticidad; mejorar el tiempo de trabajo de los morteros, asegurando una adherencia satisfactoria con el soporte y pudiendo trabajar la superficie de acabado; y, como consolidante y aglutinante. Así pues, la combinación de estos dos aditivos, uno inorgánico (los minerales arcillosos) y uno orgánico (las gomas vegetales) generan un mortero híbrido con unas prestaciones óptimas, de cara a la técnica artística a la que iba destinado.

En este sentido, desde el punto de vista técnico de la manufactura de estos morteros de las capas de preparación de los estucos de la pintura mural maya estudiados, se determinan las siguientes características estratigráficas y granulométricas generales:

- El contacto entre las capas de preparación de los estucos es limpio, presentando una buena adherencia entre ellas. La diferencia entre las capas viene dada por pequeñas diferencias de la tonalidad del conglomerante.
- La media del espesor de la primera capa de preparación (capa de preparación de mortero que se encuentra justamente por debajo de la capa pictórica) de los estucos es de unos 5 mm. La media del espesor de la segunda capa de

preparación no se puede establecer debido a que la estratigrafía del estuco no llega al muro.

- La selección del árido en el momento de manufacturar el mortero de la primera capa de preparación se concentra en dos tamaños de grano, entre la arena gruesa y la arena media, con una dosificación del mortero en masa que oscila entre 1:2 y 1:2,5. La selección del árido del mortero de la segunda capa de preparación incorpora la grava fina y la arena muy gruesa, con una dosificación del mortero en masa que oscila entre 1:3 y 1:5. A partir de estos resultados se puede determinar que tenían técnicas de tamizado del árido, tal como determina también recientemente Straulino, L. (2015), en su tesis doctoral, en los estucos arqueológicos de *Dzibanché* (estado de Quintana Roo, México).

#### **1.1.4.2. Propuesta de grupos técnicos de los estucos de la pintura mural maya**

A partir de la correlación de los resultados de la caracterización de los morteros de las capas de preparación de los estucos de la pintura mural maya de los diferentes sitios arqueológicos estudiados en esta investigación, se proponen una serie de hipótesis con el objetivo de establecer posibles grupos técnicos de los estucos de la pintura mural maya estudiados:

- Las muestras de los morteros de las capas de preparación de los estucos mayas estudiados nos indican que cada lugar utilizaba sus propios materiales y explotaba sus propias canteras y/o *sascaberas*. Es decir, en conjunto las muestras de estuco estudiadas presentan una tendencia localista. Por este motivo, los estucos de los diferentes sitios arqueológicos presentan unas características bastante diferentes, sin una evidencia clara de intercambio o transporte de las materias primas que utilizaron para manufacturar los morteros de las capas de preparación de los estucos. En cambio, las técnicas de elaboración de la cal y los procedimientos generales de amasar y dosificar el árido de estos morteros de cal aérea son similares para todos los sitios arqueológicos estudiados. Este hecho puede indicar "*un continuum*" en la tradición técnica, especialmente en las Tierras Bajas Mayas del Norte o en el nordeste de la Península de Yucatán, tal como determina Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L. (2006 y 2010) en su tesis doctoral y en su libro recientemente publicado.

- Sin embargo, se pueden diferenciar distintas áreas geográficas de ejecución de los estucos basándose en la composición químico-mineralógica obtenida de



la caracterización de la fase conglomerante del mortero, la cual se caracteriza por la presencia de minerales de la familia de las arcillas y basándose en la hidraulicidad del mortero. Se pueden establecer dos grupos de estucos bien diferenciados a partir de los resultados semicuantitativos de las proporciones porcentuales de Ca+Mg respecto las de  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  en la matriz del conglomerante y un grupo de estucos intermedio: (a). los estucos de los sitios arqueológicos de *Chacmultún*, *El Tabasqueño* y *Sta. Rosa Xtampak*; (b). los estucos de los sitios arqueológicos de *Chichén Itzá*, *Acanceh*, *Kulubá*, *D'zula* y *Ek'Balam*; (c). un grupo intermedio que nos agrupan los estucos de los sitios arqueológicos de *Dzibilnocac* y *Mulchic*.

Esta diferencia se debe fundamentalmente a la presencia de minerales arcillosos o silíceos en la matriz conglomerante del mortero, que puede ser intencionada o no, la cual puede estar condicionada por el diferente entorno geológico que presentan las áreas geográficas donde se localizan los sitios arqueológicos estudiados. También puede deberse a la forma de seleccionar el árido en las *sascaberas* y/o el procedimiento de mezclarlo con la cal en el momento de manufacturar el mortero.

- A parte, la calidad de ejecución del mortero de los estucos de la pintura mural maya estudiada es diferente en las dos áreas geográficas ya marcadas desde el punto de vista compositivo del conglomerante. Se detecta una clara diferenciación entre los morteros de los estucos de los sitios arqueológicos del norte respecto a los del sur de las Tierras Bajas Mayas del Norte, que nos pueden indicar grupos técnicos diferentes.

Así pues, la manufactura y ejecución del mortero de las capas de preparación de los estucos mayas estudiados es de mejor calidad en los sitios arqueológicos que se localizan en la subregión geográfica llamada Subregión Nordeste de Yucatán, donde se ve claramente que el árido está mejor seleccionado, su distribución es más uniforme dentro de la matriz conglomerante y la pasta de cal es más homogénea. En cambio, los morteros de las capas de preparación de los estucos mayas estudiados de los sitios arqueológicos que se localizan más al sur de la Península de Yucatán, en la subregión geográfica llamada Chenes (estado de Campeche) y Puuc (estado de Yucatán), presentan un amasado más irregular, es decir, la mezcla del árido con la pasta de cal no es tan homogénea, componiendo un mortero más desigual y no tan bien terminado.

En este sentido, en las muestras de estuco del sitio arqueológico de *Sta. Rosa Xtampak* (estado de Campeche) se observan unas estructuras especiales que se corresponden a nódulos constituidos por una fina capa externa de calcita y

un relleno interno de carbonato criptocristalino, los cuales proceden de la calcinación de las rocas calizas, que Cabadas Báez, H. *et al.* (2010) define como *porous calcitic body (burned limestone)*. La presencia de estas estructuras puede indicar la calcinación incompleta de la roca caliza durante la elaboración de la cal. Este hecho contrasta con la escasa o nula presencia de estos restos de cal mal calcinados con el resto de los morteros de los estucos que se localizan en el norte de la Península de Yucatán, especialmente en la subregión geográfica llamada Subregión Nordeste de Yucatán, donde la cal está calcinada correctamente.

Además, esta diferencia de calidad en la elaboración de los morteros de los estucos que se localizan en el sur de la Península de Yucatán, se puede relacionar con el aislamiento de esta zona geográfica propiciada por la barrera geológica que supone la Sierra de Ticul o bien con un grado inferior de evolución de la técnica de elaboración de los estucos, ya que estas muestras de estucos estudiadas se parecen a las muestras de estucos del sitio arqueológico de *Acanceh*, el cual corresponde al período histórico del Clásico Temprano, históricamente el sitio más antiguo de los estudiados. Esta relación entre el sitio arqueológico de *Acanceh* y el sur de la Península de Yucatán (subregión Chenes) ya se detecta en resultados previos del estudio de la pintura mural maya (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006 y 2010 ) y en resultados analíticos que se han realizado en otros tipos de materiales arqueológicos de *Acanceh* como los cerámicos, los líticos y los malacológicos, que señalan que existió un intercambio entre los especialistas de la Subregión Chenes y el sitio arqueológico de *Acanceh* (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006 y 2010).

Por lo tanto, a nivel genérico y a partir de las premisas presentadas vinculadas a los resultados analíticos obtenidos de la caracterización de los morteros de las capas de preparación de los estucos de la pintura mural maya estudiada, se pueden establecer los siguientes grupos técnicos en cuanto a la tecnología de la cal de las Tierras Bajas Mayas del Norte (Península de Yucatán):

1. Un primer grupo técnico vinculado a talleres y a especialistas de la subregión Nordeste de Yucatán donde se localizan los sitios arqueológicos de *Ek'Balam*, *Chichén Itzá* y *Kulubá*.
2. Un segundo grupo técnico vinculado a talleres y a especialistas de la subregión Chenes (estado de Campeche) donde se localizan los sitios arqueológicos de *El Tabasqueño*, *Dzibilnocac* y *Sta. Rosa Xtampak*.
3. Además, se puede establecer una zona de transición vinculada a talleres y a especialistas, no tan definida, en la cual se pueden encontrar afinidades con los dos primeros grupos técnicos definidos, que geográficamente correspondería a

la subregión Puuc (estado de Yucatán) donde se localizan los sitios arqueológicos de *Mulchic*, *Chacmultún* y *D'zula*.

Hay que decir que esta hipótesis de grupos técnicos que se presenta en esta investigación corrobora las investigaciones y los resultados obtenidos por Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L. (2006 y 2010), en el terreno de la pintura mural maya y los resultados que desde los años '80, se han obtenido a partir del estudio de la arquitectura de las Tierras Bajas Mayas del Norte (Muñoz, G., 2006). En este sentido, desde entonces queda confirmado que en esta área existieron tres estilos arquitectónicos ligados a diferentes subregiones geográficas de la Península de Yucatán: Chenes, Río Pico, Puuc, Costa del Pacífico, Clásico Petén, Cuenca Usumacinta, Río de la Pasión y Cuenca del Río Motagua, Posclásico (Muñoz, G., 2006: 128-137).

Así pues, dos de los subgrupos técnicos que plantea esta investigación, que corresponden a las subregiones Puuc (estado de Yucatán) y Chenes (estado de Campeche), por un lado, tienen claras correspondencias con las que fueron identificadas desde los años '80 con respecto a la arquitectura: Puuc y Chenes (Pollock, H., 1980; Andrews, G.F., 1986; Gendrop, P., 1983; Gendrop, P. *et al.*, 1989; Muñoz, G., 2006). Por otra parte, tienen similitudes con ciertas clasificaciones cerámicas propuestas desde los años '90 que partieron de estudios que triangularon análisis de pastas cerámicas, estilo e iconografía (Reents-Budet, D., 1994). Por último, se relacionan directamente con algunas de las propuestas que se han realizado en la última década en cuanto a grupos técnicos de la pintura mural de las Tierras Bajas Mayas (Magaloni, D., 1996; Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L. , 2010).

El estudio arqueométrico, estilístico e histórico de la capa pictórica en los mismos estucos de la pintura mural maya que se han considerado en esta investigación, pero en este caso considerando el mortero de las capas de preparación de dichos estucos, reveló notables diferencias en la manera de trabajar el color entre las subregiones Puuc, Chenes y Nordeste de Yucatán. Además, en esta última subregión, fue posible establecer una hipótesis de partida sobre la llegada de pintores a *Chichén Itzá*, al inicio del Clásico Terminal, procedentes de *Ek'Balam*, dada la proximidad geográfica y las conexiones entre estos dos sitios. A parte, la muerte del rey de *Ek'Balam*, soberano de *Ukita Kan Lek'Tok*, que patrocinó la decoración de la Acrópolis del sitio, tuvo lugar en el 825 d.C (Vargas de la Peña, L. *et al.*, 2001a: 402-418). Este hecho, marcó el inicio de la decadencia de esta importante, estratégica y próspera ciudad del Clásico en el Nordeste de Yucatán, cediéndole este importante papel rector subregional a *Chichén Itzá* (Cobos, R., 2000: 517- 544). A partir de entonces, *Chichén Itzá* necesitó artistas que describieran y

legitimaran su naciente poder, en este extremo de las Tierras Bajas Mayas del Norte, los mismos que *Ek'Balam*, en franca decadencia, ya no necesitaría.

Así pues, la semejanza técnica entre los morteros y la capa pictórica del estuco de la pintura mural del piso 64 de la Acrópolis de *Ek'Balam* (finales del siglo VIII - inicios del siglo IX; dicho de otro modo, finales del Clásico Tardío - inicios del Clásico Terminal) y los sustratos equivalentes a la fachada moldeada policromada del templo de la Serie Inicial de *Chichén Itzá*, fechada por lectura epigráfica el 878 d.C, apuntan a que los especialistas que trabajaron en esta obra, a nivel de la capa pictórica (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006 y 2010), fueron los mismos o los descendientes de los que trabajaron en *Ek'Balam* anteriormente. Éstos, a su vez, estarían vinculados con los que trabajaron estas mismas superficies y obras en el sitio cercano de *Kulubá*. Estos resultados expuestos, parecen confirmarse con los resultados obtenidos en esta investigación, con respecto a las capas de preparación de los estucos de estas mismas capas pictóricas y obras. A parte, las relaciones entre estas tres urbes, a finales del Clásico Tardío e inicios del Clásico Terminal, han estado probadas por la arqueología, el análisis de la cultura material y la epigrafía (Ringle William, M. *et al.*, 2003: 393-405).

En este sentido, investigaciones como la presente ponen de manifiesto la importancia de impulsar más iniciativas en esta línea, capaces de determinar desde la caracterización petrográfica y químico-mineralógica de la obra de arte en contexto arqueológico, no sólo relaciones subregionales, lo que ya es destacable por el reto que supone en culturas como la maya, sino también un intercambio y una movilidad de especialistas (pintores, ceramistas, escultores, entre otros) y los procedimientos técnicos y las ideas que recorrieron con ellos, estos diferentes escenarios de las Tierras Bajas Mayas. En definitiva, los resultados obtenidos en esta investigación permiten sugerir la existencia de una tradición técnica común con respecto a las capas de preparación de los estucos de la pintura mural de las Tierras Bajas Mayas del Norte, aunque, tuvo variantes rubregionales ligadas , muy probablemente a grupos de especialistas y/o a talleres concretos.

## 1.1.4. FINAL DISCUSSION OF THE RESULTS AND CONCLUSIONS

### 1.1.4.1. Final discussion of the results

- The raw material samples from the geological environment of the studied archaeological sites (from Chacmultún, Sta. Rosa Xtampax, Xatjún and Acanceh), used for conglomerate manufacture of the mortar from Mayan stucco's preparation layers, they correspond to the outermost parts either of the relief or of the limestone coverage from Yucatan Peninsula's platform, specifically to the *sascaber* materials and materials which are from edaphic soils horizons. These materials belong to lithological facies of the ancient Quaternary period (Pleistocene epoch) and modern Quaternary period (Holocene epoch), respectively. In some cases what said above may vary and depending on the exploitation of stone material profundity, rock fragments from the geological stratigraphically oldest substrate can be also extracted, from Paleocene-Eocene ages or Miocene-Pliocene ages (Tucker, M.E. *et al.*, 1990; Cabadas, H. *et al.*, 2010;. Bautista, F. *et al.*, 2011a;. Solleiro-Rebolledo, E. *et al.*, 2011).

- The samples from clay sediments extracted from *Sak lu'um* cave, are mainly composed by palygorskite together with dolomite and montmorillonite-chlorite. These results show that these samples from clay sediments are part of the primary clays made by direct crystallization group, which is the generic type of clays found in Yucatan Peninsula, composed by talc, chlorite, palygorskite-sepiolite and kaolinite-montmorillonite mixed layers (Isphording, W.C., 1984; Pablo-Galán, L., 1996). The samples from clay sediments extracted from different caves from *Muna* and *Ticul*, differ from the previous ones and are respectively composed mainly by montmorillonite-chlorite, and in less proportion, by dolomite and palygorskite. These results indicate that these samples from clay sediments are part of the detrital clays made by the detritus sedimentation, mostly restricted in *polje* mining areas scattered around *Sierra de Ticul* and composed by smectite clays associated to detrital quartz, iron oxides and, in less proportion, kaolinite.

- The conglomerate from studied samples of Mayan stucco's preparation layers is composed mainly by aerial lime (*Chichén Itzá, Ek'Balam, D'zula, Acanceh, Chacmultún y Dzibilnocac*) and in less proportion, by magnesian aerial lime (*Kulubá y Mulchic*). It is never composed by dolomitic lime. In exceptional cases, this lime presents a certain hydraulicity and that turns this lime into natural hydraulic lime (*Sta. Rosa Xtampax y El Tabasqueño*). This hydraulicity is originated by two procedures: (1). *Sta. Rosa Xtampax*: the nature of raw

material, in this case, carbonated and silicified, causes the neoformation of different compounds while the raw material is being calcined. These new compounds provide a pozzolanic effect to the mortar and that is because of the existing homogeneous reactive mixture of thin crystalline structure compounds; (2). *El Tabasqueño*: the pozzolanic effect comes from the presence of minerals from clays family together with carbonated calcined material, that is to say, that comes from carbonated materials which their composition has a range from weakly loamy to loam, according to the minerals proportion of clays that are being part of the stone material composition and are calcined to give way to the conglomerate.

And so then, *Cementation Index* (CI) defined by different authors (Oates, J.A.H., 1998; Boynton, R.S, 1980) and accepted as a tool to evaluate, classify and quantify the natural hydraulicity of conglomerates, is a really appropriate way to study and typify archaeological mortars with an archaeometric purpose. In fact, using the CI is much better than using the Hydraulicity Index ( $I_h$ ), even though this one is more widespread with applications in the industrial area of construction materials, like cement. Even so, the Rankin ternary diagram (Knöfel, D., 1985), a graphic method to represent the industrial conglomerates hydraulicity and classify them in aerial limes, hydraulic limes and cements, has proven to be a useful way to group samples from the results of the characterization of the binder mortars studied, according to their hydraulicity. Although, we have to take into account that surely, the results obtained from the characterization of archaeological mortars do not fit perfectly with the areas defined in the diagram, as the conglomerates studied are processed, mostly with raw materials from geological environment of the archaeological site. This peculiarity usually will cause little deviations of the assigned zones as industrial standards. Finally, we have to remember that to apply these study tools in the archaeological mortars characterization, you must first be certain of the presence of hydraulic chemical compounds detected by some other instrumental analysis techniques, as proposed in this research, because otherwise important interpretive errors can be made.

- In another way, clays minerals are decisive in conglomerate's features and attributes of these kind of mortars. In fact, the evidence of presence of clays minerals, specifically of illite-montmorillonite and kaolinite/halloysite, spread within carbonated matrix of the binding phase (*Acanceh, Chichén Itzá, Kulubá, Mulchic y Dzibilnocac*), which correspond to primary clays originated by direct crystallization, they suggest an addition, whether intentioned or not, of clayey material, posterior to the raw material calcination when manufacturing the mortar, as Straulino, L. (2015) point in the conclusions of his PhD thesis. If this

addition is not on purpose, can take place: (1). during the previous lime hydration process, when the quicklime is mixed with the *sascab*. In this research has been established the following: sand and gravel from studied samples from the stucco preparation layers, normally *sascab* (calcareous) type, moreover, they include a certain proportion of clayey minerals, generally from edaphic grounds; (2). in the hydration process of lime, where the material is deposited in wells dug in the ground. The well's walls can incorporate some content of clay minerals to the lime paste while is turning off.

At this point, we must mention that the clay minerals results from the characterization of preparation layers of stucco samples, accompanying lime, do not correspond to the clay minerals found in clay sediments samples studied in this research. The basic difference lies in the absence of palygorskite in front of the presence of halloysite. These results are added to the research line that says, on one hand, the importance of this clay as a pre-Columbian culture ingredient for the manufacture of pigments in wall paintings, sculpture and ceramics (Domenech, A. *et al.*, 2009; Sánchez del Río, M., *et al.*, 2009) and, on the other hand, also says that these clays are restricted to the northeast of Yucatan Peninsula, located in sinkholes or *cenotes* (Isphording, W.C., 1984). Instead, for the manufacture of mortars from the preparation layers of Mayan stuccos, the extraction of raw material was not really selective and was localized in the *sascaberas*, as already specified above, where is more likely the formation of halloysite by meteoric or karst pedogenic processes, as part of a soil associated to tropical environments. Therefore, if you consider that the areas for extraction of raw materials for the manufacture of lime, are *sascaberas*, the Yucatan platform coverage areas, the presence of halloysite is contextualized with upwelling geological extraction.

- One of the most specific and rare features of this Mayan mortars is the addition of vegetal rubber which are from exudates of trees in the water during the lime hydration process, detected by SEM-EDX in the conglomerate phase of the samples from *Chacmultún*, *Sta. Rosa Xtampak* and *Dzibilnocac*. The mixture (quicklime and *sascab*) was immersed in gummy water *holol* and thus left for two weeks before being use (Magaloni, D., 1997, 2001).

Finally, it must be said that the pozzolanic effect detected in certain Mayan stucco sample is believed to be in fact by chance, conditioned by the raw material of the geological environment of the archaeological site and it has not played a decisive role in the durability of the Maya mural painting, over time.

However, it has been able to influence in its mechanic attributes, not necessarily essential in the performance requested to a mural painting. What has been decisive is the process of preparing the mortar, the fact of previous mixing quicklime and arid with the addition, whether intentional or not, of clay minerals and then hydrate the gummy water mixture, provides a rheological performance to the mortar making it very malleable and docile in a fresh state. It is worth mentioning that apart from the plasticity provided by clay minerals in the mortar, vegetable gums taken from the trees exudates also provide other properties. Sickels, L.B. (1981), to its list of historical additives, mention that these sugars of vegetal origin have been used to: emulsify or stabilize, producing greater strength and stability to the mixture; modify its plasticity; improve the working time of mortars, ensuring a satisfactory adhesion to the support and being able to manipulate the finished surface; and, as strengthener and binder. Thus, the combination of these two additives, one inorganic (clay minerals) and one organic (vegetal gum) generate a hybrid mortar with optimal performances, in terms of the artistic technique that was intended.

In this sense, from a technical point of view of the manufacture of these mortars of the stucco's preparation layers from the studied Mayan mural, the following general stratigraphic and granulometric characteristics are determined:

- Contact between the stucco preparation layers is clean, showing a good adhesion between them. The difference between layers is given by small differences in the hue of the binder.
  
- The average thickness of the first preparation layer (mortar preparation layer which is found just below the pictorial layer) of the stucco is about 5 mm. The average thickness of the second preparation layer can not be established because the stucco stratigraphy does not reach the wall.
  
- The selection of sand and gravel when manufacturing mortar from the first preparation layer is concentrated in two grain sizes, between the coarse sand and medium sand, with a mortar dosage between 1:2 and 1: 2,5. The selection of sand and gravel of mortar from the second preparation layer incorporates fine gravel and very coarse sand, with a mortar dosage between 1:3 and 1:5. From these results we can establish they had dry sieving techniques, such as recently determined Straulino, L. (2015), in his Phd thesis, in the archaeological stucco from *Dzibanché* (state of Quintana Roo, Mexico).



#### 1.1.4.2. Proposal of technical groups of the Mayan stucco mural painting

In addition, from the correlation of the results of the characterization of the mortar layers stucco mural painting preparation the various Mayan archeological settlements studied in this research, we propose a number of hypotheses with the aim of establishing possible technical groups of the Mayan stucco mural painting studied:

- The samples of mortars of the layers for the preparation of the Mayan stucco studied indicate that each place used their own materials and exploited their own quarries and/or *sascaberas*. Overall, the stucco samples studied have a localist trend. For this reason, the stucco of various archaeological settlements have quite different characteristics, without any clear evidence of exchange or transport of the raw materials used to manufacture the mortars layers of stucco. Instead, techniques of making lime and general aggregate mortars are similar for all archaeological settlements studied. This can indicate a “continuum” of the traditional technique, especially in the Northern Maya Lowlands or north-east of the Yucatan Peninsula as determined by Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L. (2006 and 2010) in his doctoral dissertation and in his recently published book.
- Even though we can distinguish different geographic areas of implementation of stucco, based on the chemical composition obtained from the binder phase of the mortar, which is characterized by the presence of minerals in the clay family and based on the precipitation of the mortar.

You can set two distinct groups apart of stucco from the results semi-quantitative proportions percentage of Ca+Mg with respect to the  $Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3$  in the matrix binder and a group of intermediate stucco (a). The stucco from the archaeological settlements in *Chacmultún*, *El Tabasqueño* and *Sta. Rosa Xtampak*; (b). The stucco of the *Chichén Itzá*, *Acanceh*, *Kulubá*, *D'Zula* and *Ek'Balam* settlements ; (c). an intermediate group of the stuccos of the *Dzibilnocac* & *Mulchic* settlements.

This difference is essentially due to the presence of clay minerals or the siliceous matrix binder in the mortar, which can be intentional or unintentional, which can be influenced by the different geological surroundings present at the archaeological settlements studied. It may also be due to how dry the *sascaberes* and/or the lime mix procedure at the time of mortar preparation.

- In addition, the quality of execution of mortar the Maya stucco murals studied at two different geographical areas already marked from the point of view of the binder composition. It shows a clear difference between the stucco mortars in northern compared to the southern Maya settlements, which may indicate different technical groups.

Therefore, the manufacturing and execution of mortar layers studied show Mayan stucco preparation is the best quality in settlements that are located in the geographical subregion of Northeastern Yucatan, where the aggregate is clearly better, its distribution is more uniform within the matrix binder and the lime paste is more homogeneous. However, the mortars of the stucco preparation layers studied at archaeological sites located to the south of the Yucatan Peninsula, the sub geographical region called Chenes (state of Campeche) and Puuc (state of Yucatan), present a more irregular wedging, that is to say the mixing of the paste aggregate with the dry non-homogeneous lime, composing a mortar more unequal and less well finished.

In this sense the the stucco samples from the *Sta. Rosa Xtampak* (state of Campeche) archaeological sites observed special structures that correspond to nodules formed by a thin outer layer of calcite and an internal filling of a crypto crystalline carbonate, which come from the calcination of limestone, that Cabadas Báez, H. *et al.* (2010) defines as a *calcite porous body (burned limestone)*. The presence of these structures may indicate incomplete calcination of limestone for the production of lime. This contrasts with the poor or zero presence of these badly charred remains of lime mortars for the rest of the stucco that are located north of the Yucatan Peninsula, especially in the Sub Northeastern region of Yucatan where lime is burned properly.

Furthermore, the difference in quality in the preparation of the stucco mortar that are located south of the Yucatan Peninsula, may be related to the geographic isolation caused by the geological barrier posed by the Sierra de Ticul or the lower degree of evolution of the technical preparation of stucco, since these studied samples resemble stucco from the *Acanceh* site, which corresponds to the Early Classic period, historically the oldest settlement studied. This relationship between the *Acanceh* site and south of the Yucatan Peninsula (subregion of Chenes) could already be detected in previous results from the study of Mayan murals (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006 and 2010) and analytical results that have been made in other archaeological materials of Acanceh like ceramics, the lithic and malacological, that said there was an exchange between specialists of the Chenes Sub-region and *Acanceh* settlements (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2006 and 2010).

Therefore, at a general level and from the premises presented related to the analytical results obtained from the characterization of stucco mortar preparation layers of Mayan murals studied, you can establish the following technical groups regarding the technology of lime in the Maya Lowlands of the North Yucatan Peninsula:

1. A first technical group linked to workshops and specialists of the Northeastern Yucatan subregion where archaeological settlements are located at *Ek'Balam*, *Chichén Itzá* and *Kulubá*.
2. A second technical group linked to workshops and specialists of the Chenes subregion (Campeche) where archaeological settlements are located at *El Tabasqueño*, *Dzibilnocac* and *Sta. Rosa Xtampak*.
3. However, its possible to establish a transition area linked to workshops and specialists, not so defined, which can find affinities with the first two technical groups defined, that geographically correspond to the Puuc subregion of Yucatan where the *Mulchic*, *Chacmultún* and *D'zula* archaeological sites are located.

It must be said that this hypothesis of technical groups presented in this study corroborates the investigations and the results of Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L. (2006 and 2010), in the field of Maya mural painting and the results from the '80s have been obtained from the study of the architecture of the Maya North Lowlands (Muñoz, G., 2006). In this regard, since then it has been confirmed that in this area there are three architectural styles tied to different geographical subregions of the Yucatan Peninsula: Chenes, Río Bec, Puuc, Costa del Pacífico, Petén Clásico, Conca Usumacinta, Río de la Pasión and the Río Motagua basin, Posclásico (Muñoz, G., 2006:128-137).

Therefore, two technical subgroups posed this investigation, which correspond to the Puuc subregions of Yucatan and Chenes of Campeche on one hand, have clear matches with those that were identified from the 80's regarding to architecture: Puuc & Chenes (Pollock, H., 1980; Andrews, G.F., 1986; Gendrop, P., 1983; Gendrop, P. *et al.*, 1989; Muñoz, G., 2006). On the other hand they have similarities with certain ceramic classifications proposed since the 90's other studies which linked ceramic pastes, style and iconography (Reents-Budet, D., 1994). Finally, it is directly related to some of the proposals that have been made in the last decade in by technical groups studying mural painting of Maya Lowlands (Magaloni, D., 1996; Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010).

In this sense, the study the archaeometric, stylistic & historic pictorial layer in the same Mayan stucco murals that have been considered in this research, but in our case considering the mortar layers and preparation of stucco, revealed significant differences in the working colour between the Puuc, Chenes and Northeastern Yucatan subregions. Moreover, in the latter subregion, it was possible to establish a hypothesis about the arrival of *Chichén Itzá* painters at the beginning of the Classic period, from *Ek'Balam*, given the geographical proximity and connections between these two settlements.

In addition, the death of the King of *Ek'Balam*, sovereign *Ukit Kan Lek'Tok*, who sponsored the Acropolis decoration settlement, took place in 825 AD (Vargas de la Peña, L. *et al.*, 2001a: 402-418). This fact marked the decline of this important strategic and prosperous city in the Classical Northeastern Yucatan, giving this important leadership role to *Chichén Itzá* (Cobos, R., 2000: 517-544). Thereafter, *Chichén Itzá* needed artists which depicted their growing power at this end of the North Maya Lowlands that *Ek'Balam* in decline no longer will needed.

So the similarity between the technical mortars and stucco pictorial layer mural of room 64 of the Acropolis *Ek'Balam* (late eighth century beginning of the ninth century, or put another way, the Late Classic - Terminal Classic period) and the equivalent substrates from the modeled polychrome temple front of the Initial Series at *Chichén Itzá* dated by reading the inscriptions in 878 AD, indicate that the specialists who worked on this level of the pictorial layer (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L. 2006 and 2010) were the same people or the descendants of those who made the painting at *Ek'Balam* before. These, at the same time, would be linked to those who worked the same surfaces and works near the *Kulubá* settlement. These results exhibited, seem satisfactory with the results of this research in terms of preparation of the stucco layer of these same pictorial works. In addition, relations between these three cities at the end of the Late Classic and early Classic period, have been proved by the archeology, analysis material & epigraphy (Ringlein William, M. *et al.*, 2003 : 393-405).

In this sense, as these researches show the importance of further initiatives in this line, able to determine from the petrographic and chemical mineralogical characterization of the work of art in an archaeological context, not only sub-regional relations, which is already remarkable for the challenge in cultures like the Mayan, but also the exchange and mobility of specialists (painters, potters, sculptors, etc.) and the technical procedures and ideas that went with them in the Maya Lowlands. Definitively, the results obtained in this research allow us suggest the existence of a common traditional technique regarding the preparation of layers of stucco though they had variations related to the subregions, likely groups of specialists and/or specific workshops.

## 1.2. AGLUTINANTES Y ADITIVOS VEGETALES

### 1.2.1. ANTECEDENTES

#### 1.2.1.1. Estructura y propiedades de las gomas vegetales

Las gomas vegetales, consideradas desde un punto de vista analítico materia extractable de una planta, son secreciones vegetales sólidas, en general, solubles en agua, insolubles en alcohol y en disolventes orgánicos que desde antiguo se han utilizado como aglutinantes y adhesivos (Mills, J.S. *et al.*, 1987; Matteini, M. *et al.*, 1991; Gettens, R.J. *et al.*, 1966).

Estas sustancias de tipo polisacárido son producidas por ciertas plantas para paliar los daños producidos cuando sufren una agresión externa. Las gomas, a diferencia de la celulosa, están constituidas por macromoléculas de estructura compleja tanto por la variedad de monómeros como por la estructura ramificada que adoptan sus macromoléculas (Figura 86).

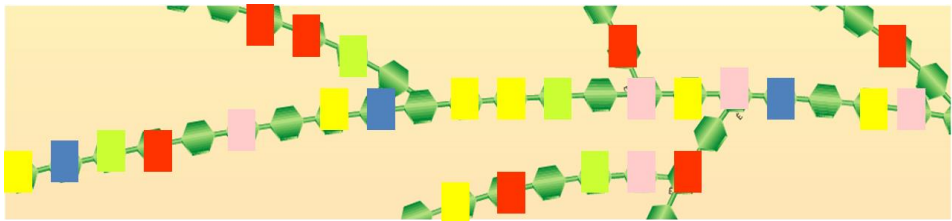


Figura 88. Estructura esquematizada de una goma vegetal mostrando su estructura ramificada integrada por unidades monoméricas (monosacáridos y ácidos urónicos) de diferente tipo (representado por diversos colores),

Las unidades básicas que conforman un polisacárido son los denominados monosacáridos (Tabla 37), los cuales se unen entre sí mediante el denominado enlace glicosídico. Las moléculas de monosacárido, atendiendo al número de átomos de carbono que poseen, se denominan tetrasas ( $C_4$ ), pentosas ( $C_5$ ), y hexosas ( $C_6$ ). Estructuralmente son polihidroxi aldehidos o polihidroxi cetonas cíclicos denominados hemicetales y acetales. Cuando estos ciclos contienen seis eslabones se denominan piranosas (Figura 89 - izquierda) y cuando contienen cinco eslabones se denominan furanosas (Figura 89 - derecha).

Tabla 37. Principales monosacáridos integrantes de las gomas vegetales

NÚMERO DE CARBONOS	CATEGORÍA	EJEMPLOS
4	Tetrosa	Eritrosa, Treosa
5	Pentosa	Arabinosa, Ribosa, Ribulosa, Xilosa, Xilulosa, Lixosa
6	Hexosa	Alosa, Altrosa, Fructosa, Galactosa, Glucosa, Gulosa, Idosa, Manosa, Sorbosa, Talosa, Tagatosa

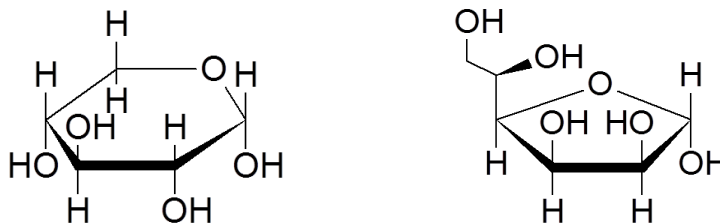


Figura 89. Estructura de xilopiranososa (izquierda) y manofuranosa (derecha)

Los ácidos urónicos (Figura 90) son compuestos de tipo aldehído-polialcohol en los que el hidroxilo primario se ha oxidado a ácido carboxílico.

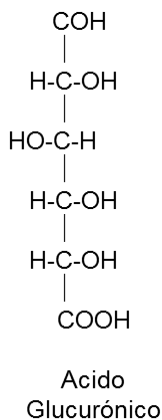


Figura 90. Estructura del ácido urónico

Cuando se combina un número elevado de monosacáridos y/o ácidos urónicos mediante puentes glicosídicos, el compuesto polimérico al que da lugar se denomina polisacárido (Figura 91).

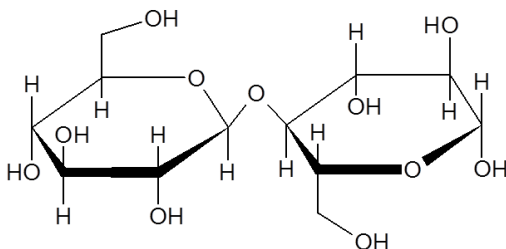


Figura 91. Estructura de disacárido por unión de ambos monosacáridos mediante enlace glicosídico

### 1.2.1.2. Clasificación

Las gomas vegetales, desde antiguo, se han utilizado como aglutinantes y adhesivos. La tabla 38 muestra las principales gomas vegetales utilizadas en Europa y Asia y su composición en monosacáridos y ácidos urónicos (Bonaduce, I. *et al.*, 2007).

Tabla 38. Gomas vegetales utilizadas en Europa y Asia y su composición en monosacáridos y ácidos urónicos

GOMA VEGETAL	CONTENIDO (%)								
	Ara	Rha	Xyl	Fuc	Man	Gal	GalU	Glu	GluU
Goma arábica o de acácia, <i>Acacia senegal</i>	37,2	11,2	-	-	-	44,7	-	-	7
Goma tragacanto, <i>Astragalus gummifer</i>	34,7	3,4	14,9	7,4		10,8	13,8	11,5	3,5
Goma de peral, <i>Pyrus communis</i>	34	2,8	6,1	-	5,1	38	-	-	14
Goma de cerezo, <i>Prunus cerasus</i>	35,5	2,8	6,6	-	5,5	37	-	13	-
Goma de ciruelo, <i>Prunus spinosa</i>	36	2,8	6,9	-	5,3	36	-	-	13
Goma ghatti, <i>Anogeissus latifolia</i>	47	3,5	-	-	2,5	36,5	-	-	11
Goma karaya, <i>Sterculia urens</i>	-	25,5	-	-	-	64	7	-	4

La tabla 39 resume las gomas vegetales propuestas como posibles aditivos usados en la pintura mural en Mesoamérica (Magaloni, D., 2001).

Tabla 39. Gomas vegetales utilizadas en Mesoamérica. Fuente para los nombres mayas y científicos de la tabla: *Catálogo de la Flora de la Península de Yucatán*. Fuente: <<http://www.cicy.mx/sitios/flora/>>

<b>DENOMINACIÓN COMÚN</b> (NOMBRE MAYA)	<b>NOMBRE CIENTÍFICO</b>
<b>ciruelo</b> ( <i>abal k'ilim</i> )	<i>Spondias</i> spp. <sup>116</sup>
<b>palo jote, mulato, retinto</b> ( <i>chaka'; chakaj</i> )	<i>Bursera simaruba</i> <sup>117</sup>
<b>corcho rojo, jonote</b> ( <i>joolol; holol</i> )	<i>Heliocarpus donnellsmithii</i>
<b>cedro colorado</b> ( <i>k'uuy che'</i> )	<i>Cedrela odorata</i>
<b>madero de hierro</b> ( <i>ha'bin; ja'abin</i> )	<i>Piscidia piscipula</i>
<b>alamo</b> ( <i>kopo'</i> )	<i>Ficus cotinifolia</i>
<b>orquídea</b> ( <i>tzahutli</i> )	<i>Bletia, Encyclia, Catasetum</i> <sup>118</sup>
( <i>chukum</i> ) <b>blanco</b> (estado de Yucatán) <b>huizache</b> (estado de Campeche)	<i>Havardia albicans</i>
<b>viga, brazil</b> ( <i>chak te'</i> )	<i>Caesalpinia mollis</i>

### 1.2.1.3. Componentes de la pared celular y material extractable de la madera y las cortezas de los árboles

Las tablas 40 y 41 ilustran los intervalos de contenido (% peso) de los tres principales componentes de la madera de frondosas y coníferas: celulosa, hemicelulosas y lignina. Mientras que la celulosa y las hemicelulosas son sustancias de tipo polisacárido, la lignina es un compuesto polifenólico.

<sup>116</sup> grupo de especies

<sup>117</sup> especie

<sup>118</sup> género



Tabla 40. Intervalo de contenido (% peso) de los tres principales componentes de la madera para frondosas y coníferas

TIPO DE MADERA	CELULOSAS (%)	HEMICELULOSAS (%)	LIGNINA (%)
Frondosa	40-44	15-35	18-25
Conífera	40-44	20-32	25-35

Tabla 41. Contenido promedio (% peso) de algunas especies botánicas de madera

CONSTITUYENTE (%)	PINO <i>Pinus sylvestris</i>	ABETO <i>Picea glauca</i>	EUCALIPTO <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	ABEDUL <i>Betula verrucosa</i>
Celulosa	40	39.5	45.0	41.0
Hemicelulosas:				
- Glucomannano	16.0	17.2	3.1	2.3
- Glucuronoxilano	8.9	10.4	14.1	27.5
Otros:				
- Polisacáridos	3.6	3.0	2.0	2.6
- Lignina	27.7	27.5	31.3	22.0
- Total extractables	3.5	2.1	2.8	3.0

De todos estos componentes resultan de especial interés en la presente investigación los materiales extractables ya que, como ya se ha referenciado en apartados anteriores y se expondrá más adelante, el procedimiento de preparación de las pinturas murales en época prehispánica, según se reporta en tratados de la época colonial y según ha llegado a nuestros días por tradición oral, incluía la inmersión de cortezas de árboles ricos en gluten en los depósitos de agua donde la cal era sometida a un proceso de apagado (transformación en hidróxido de calcio).

La materia extractable (con disolventes neutros) y el residuo seco obtenido cuando se efectúa un análisis de madera están integrados por sustancias que no contribuyen a la composición de la pared celular. En total constituyen entre un 4-10% del peso seco normal de una madera de clima templado y puede alcanzar el 20% en madera de climas tropicales. Estos materiales incluyen grasas, ceras, alcaloides, proteínas, compuestos fenólicos simples y complejos, azúcares simples, pectinas, mucílagos, gomas, resinas terpenoides, terpenos, almidones, glicósidos, saponinas y aceites esenciales. Muchas de estas sustancias desempeñan un papel de compuestos intermedios en el metabolismo del árbol, materiales de reserva o forman parte de los mecanismos químicos de defensa del árbol contra ataques de microorganismos. Estas sustancias son en buena medida responsables del

color, olor y resistencia a la degradación de la madera (Sjostrom, E., 1993; Petterson, R.C., 1984).

El residuo seco es el conjunto de materia que queda después de la combustión a alta temperatura de la madera. Habitualmente es inferior al 1% en maderas de climas templados y ligeramente superior en madera de climas tropicales.

#### **1.2.1.4. Métodos de análisis de polisacáridos utilizados en obras de arte**

Se puede encontrar en la bibliografía especializada cierto número de trabajos que reportan métodos de cromatografía de gases específicos para la identificación de gomas vegetales utilizadas en obras de arte y objetos arqueológicos como aglutinantes, adhesivos o aditivos de morteros. Dos técnicas han sido aplicadas: cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS) y pirólisis-cromatografía de gases-espectrometría de masas (Py-GC-MS).

##### **A). GC-MS**

El análisis de gomas vegetales y, en general, de polisacáridos exige la rotura de los enlaces glicosídicos y la liberación de las unidades de monosacarido/ácido urónico y su posterior derivatización para conferir a estos compuestos la suficiente volatilidad para atravesar la columna cromatográfica. Debido a que las unidades monoméricas que integran las gomas son prácticamente las mismas, la discriminación de éstas y, por tanto su identificación exacta, solo podrá efectuarse a partir de la determinación cuantitativa del contenido en cada uno de estos componentes. Ello hace que el proceso analítico completo incluya, cada vez más, tratamientos de análisis multivariado. La figura 92 ilustra los diferentes pasos que incluyen los procedimientos más habituales de trabajo: de-polimerización, derivatización e integración de áreas de pico para su tratamiento cuantitativo.

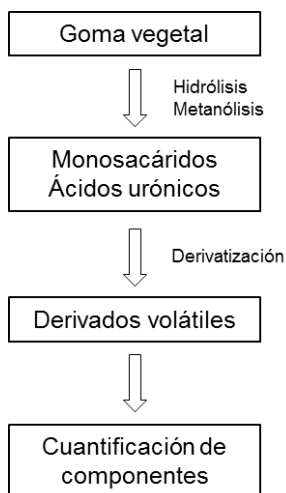


Figura 92. Etapas del análisis de gomas vegetales mediante GC-MS

**i).** Uno de los métodos más comúnmente empleados para liberar los monosacáridos que integran la goma vegetal es la hidrólisis. Esta se lleva a cabo con ácidos minerales (Pancella, R. *et al.*, 1989) y, preferentemente, con ácido trifluoroacético (TFA) (Kharbade, G.P. *et al.*, 1995; Vallance, S.L. *et al.*, 1998; Ormsby, B.A. *et al.*, 2005; Pitthard, V. *et al.*, 2006a; Pitthard, V. *et al.*, 2006b). La metanólisis ha sido también propuesta como método alternativo para liberar las unidades monoméricas que integran la goma vegetal (Bleton, J. *et al.*, 1996). Este método tiene la gran ventaja sobre la hidrólisis de reducir significativamente el número de isómeros y mejorar el rendimiento de los ácidos urónicos.

**ii).** La derivatización del polisacárido puede llevarse a cabo de diferente forma siendo las más habituales:

**a).** Trimetilsililación con hexametildisilazano (HMDS) y trimetilclorosilano (TMCS) (Bersani, D. *et al.*, 2004; Marinach, C. *et al.*, 2004) o HMDS y TFA (Pitthard, V. *et al.*, 2001; Bonaduce, I. *et al.*, 2007). En estos dos últimos trabajos se incluye una etapa previa de mercaptalación de aldosas con etanotiol y TFA lo cual, después de la derivatización, produce los derivados dietilditioacetálicos y lactonas dietilditioacetálicas trimetilsililadas. Este procedimiento reduce significativamente el número de isómeros, uno de los principales inconvenientes del análisis de polisacáridos por GC-MS. Este procedimiento también evita la formación de peracetales y mejora la detección

de los ácidos urónicos. Sin embargo, presenta el inconveniente de formar ciertos productos secundarios indeseados.

**b).** Formación de acetatos de alditol mediante anhídrido acético y metilimidazol (Pancella, R. *et al.*, 1989)

**c).** Formación de acetato de metiloximas mediante hidróxido de metoxiamina que permite la formación de oximas, las cuales se hacen reaccionar con anhídrido acético para formar los acetatos de metiloxima (Pitthard, V. *et al.*, 2006a; Pitthard, V. *et al.*, 2006b; Lluveras-Tenorio, A. *et al.*, 2012).

Las técnicas mediante GC-MS descritas previamente han sido aplicadas al análisis de tintas antiguas preparadas con goma arábiga (Bleton, J. *et al.*, 1996), y en la caracterización de gomas utilizadas como aglutinante de pintura (Vallance, S.L. *et al.*, 1998; Pancella, R. *et al.*, 1989; Bonaduce, I. *et al.*, 2007; Pitthard, V. *et al.*, 2001).

## **B). Py-GC-MS**

Esta técnica ofrece la ventaja sobre la GC-MS de la menor manipulación previa a la que la muestra es sometida ya que la derivatización se efectúa “on line”. Por otra parte esta técnica mejora la sensibilidad del análisis que, de este modo, permite identificar gomas en muestras del orden de microgramos. El principal inconveniente es la mayor complejidad de los pirogramas que se obtienen, los cuales incluyen un gran número de picos asociados a cada monómero y sus productos de deshidratación e isomerización.

Como reactivos derivatizantes se han propuesto el hidróxido de tetrametilamina (TMAH) (Chiavari, G. *et al.*, 2001; Chiantore, O. *et al.*, 2008) y el HMDS.

Las técnicas de Py-GC-MS se han aplicado a la caracterización de gomas en acuarela (Chiantore, O. *et al.*, 2008), y de gomas utilizadas como aglutinante de pintura (Scalarone, D. *et al.*, 2008).

En el contexto de los estudios de pintura mural mesoamericana, Doménech-Carbó *et al.* (2014) han identificado compuestos indigoides característicos del azul maya en muestras procedentes de diversos sitios arqueológicos distribuidos en los estados de Yucatán y Campeche. En estas muestras se identificaron sustancias de tipo polisacárido que acompañaban a este pigmento en la capa pictórica y/o en la capa de preparación.

### 1.2.1.5. Identificación de gomas vegetales en la pintura mural maya

En términos generales, la vegetación de la península de Yucatán es tropical. La mayor extensión de la península está cubierta por selvas tales como la baja caducifolia, la mediana subcaducifolia y la mediana subperennifolia. En sentido inverso, se encuentran las selvas altas subperennifolias y las perennifolias que ocupan un área reducida. Concretamente, en el estado de Yucatán son típicas la selva baja caducifolia, la baja caducifolia espinosa y la mediana subcaducifolia, integradas por comunidades y asociaciones vegetales propias; en el estado de Campeche la vegetación se compone por la selva mediana subcaducifolia, la selva mediana subperennifolia, la alta perennifolia, la selva baja inundable, las sabanas y los manglares; y, el estado de Quintana Roo dominan la selva mediana subperennifolia y los manglares. Además, hace falta remarcar que en los tres estados existe la vegetación de duna costera y agrupaciones de hidrofitos, como se observa en la figura 93 (Pennington, T.D. *et al.*, 2005).



Figura 93. Distribución de las selvas que cubren la Península de Yucatán. Fuente: Inventario Nacional Forestal, 2000-2001, UNAM. <[www.inegi.org](http://www.inegi.org)>. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI)*

Teniendo en cuenta que el área de estudio del presente trabajo se centra en las Tierras Bajas Mayas del Norte, la superposición de la distribución de las selvas en la Península de Yucatán, nos indica a grandes rasgos, que las selvas características con su vegetación correspondiente del área de estudio, son (Pennington, T.D. *et al.*, 2005):

*La selva mediana subcaducifolia*: se encuentra en la parte central, este y nordeste del estado de Yucatán y al norte del estado de Campeche; se presenta a altitudes que varían de 8 a 60 m.; y, las plantas que representan este tipo de vegetación son: *yaa-axnik* (*Vitex gaumeri*), *dzalam* (*Lysiloma bahamensis*) *kitin-ché* (*Caesalpinega gaumeri*), entre otras.

*La selva baja caducifolia*: se ubica en las porciones norte, nordeste y centro del estado de Yucatán y al noroeste del estado de Campeche; se caracteriza por una vegetación que oscila entre los 6 y 15 m. de altura y la mayoría de especies son leñosas: *chucum* (*Havardia albicans*), *chimay* (*Acaccia milleriana*), *catzín* (*Acaccia gaumeri*), *kitanché* (*Caesalpinega gaumeri*), *dzidzilche* (*Gymnospodium antigonoides*), *dzalam* (*Lysiloma bahamensis*), *chaka'* (*Bursera simaruba*), *ha'bin* (*Piscidia piscipula*) *huaxim* (*Leucaena glauca*), *pixoy* (*Guazuma ulmifolia*), *subim* (*Acaccia cornígera*), entre otras.

*La selva mediana perennifolia*: se extiende de manera homogénea hacia llegar al sur del puerto de Campeche, donde formando una línea ondulada, se extiende a Quintana Roo, siguiendo casi como límite el del estado con el de Yucatán. Las especies que mejor caracterizan a esta selva son: la *Brosimum alicastrum*, *Manilkara zapota*, *Pimenta dioca*, *Aphananthe monoica*, *chaka'* (*Bursera simaruba*), *Dendropanax arboreus*, *Sideroxylon capiri* spp. *Tempisque*, *Carpodiptera ameliae*, *palo de campana* (*Hernandia sonora*), *hoja blanca* (*Guarea glabra*), *Protium copal*, entre otras dependiendo de las condiciones locales.

Estas composiciones vegetales, representan y han representado para los mayas gran importancia económica, ya que de éstas, obtienen y obtenían diversidad de usos, como son: alimentario, medicinal, forrajero, leña, abono, madera, colorante, control biológico, ritual, indicador de tiempo, tóxico, melífera, detergente, ornamental, artesanal, carbón, herramientas, cierres vivos, gomas y resinas, construcción, adobadores y fijadores de colorantes. Los estudios etnobotánicos<sup>119</sup> tienen como objetivo obtener información sobre los usos que las comunidades mayas daban a las plantas que los rodeaban (Flores, J.S. *et al.*, 1996; Flores, J.S., 2002).

La primera mención sobre la posible técnica de manufactura de los revestimientos de estuco de la arquitectura maya se realizó por Fray Diego de Landa en el siglo XVI. Este afirmaba que “*lo alto [del edificio] era de terrado*,

---

<sup>119</sup> La etnobotánica estudia la relación entre las plantas y los mayas en el tiempo y el espacio. Este hecho ha dado como resultado una interacción dinámica entre los procesos ecológicos, tecnológicos, sociales y culturales (Hernández, L. *et al.*, 1991).

*encalado muy fuerte como allá se hace con cierta agua de corteza de un árbol*" (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010). Con ello, el cronista se refería a la práctica prehispánica que consiste en sumergir cortezas de árboles ricos en gluten en los depósitos de agua donde el óxido de calcio (CaO) era apagado y convertido en hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub>, lo que aún puede documentarse en algunas comunidades rurales mayas de la Península de Yucatán (México), tal como ya se ha referenciado en otros apartados de esta investigación. Los arquitectos del siglo XIX anteriormente mencionados no dijeron nada sobre esta técnica cuando analizaron estas superficies. En los resultados obtenidos no se hacía ninguna referencia a la posible utilización por parte de los mayas de cortezas ricas en gluten durante el apagado de la cal, como mencionaba Fray Diego de Landa, porque en caso de que hubieran aparecido restos de sustancias orgánicas habrían sido reconocidas (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010).

No fue hasta la realización del proyecto Proyecto Chichén Itzá, concretamente durante la campaña de 1931 donde se realizaron los primeros análisis químicos, que se pudieron identificar los productos vegetales utilizados como aditivos en la pintura mural. En este caso, los murales posclásicos del Templo de los Guerreros de Chichén Itzá fueron objeto de este análisis. Como ya se ha expuesto, aquellos resultados determinaron que en el revestimiento de estuco había dos sustratos de idéntica composición calcárea que, según la investigadora y dibujante Ann Axtell Morris (1931:347-384), contenían alguna sabia vegetal de propiedades aditivas, como la procedente de la corteza del árbol del *chukum* (*Havardia albicans*) que los indígenas agregaban al agua en que apagaban el óxido de calcio (CaO) para reforzarlo y obtener un "mejor estuco". Fue desde la etnografía, pues, que se pudo confirmar desde la pervivencia actual la afirmación que Fray Diego de Landa había hecho más de 300 años antes, referente al uso de sabias aditivas como la del *chukum* durante la fase de hidratación de la cal. Finalmente, como previamente se ha expuesto, Edwin Littman (Littman, E., 1960b) realizó, durante los años 60 del siglo XX, una serie de análisis que le permitieron confirmar la tesis de Fray Diego de Landa y la pervivencia etnográfica documentada en 1931 por Ann Axtell Morris. A la vez, estos análisis le permitieron establecer que los mayas utilizaron las sabias aditivas presentes en los árboles del *ha'bin* (*Piscidia piscipula*), *chak te'* (*Caesalpinia mollis*), *chaka'* (*Bursera simaruba*) y *chukum* (*Havardia albicans*) (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010) (Figura 94).



Figura 94. Las fotografías muestran, de izquierda a derecha, los exudados de las cortezas de los árboles tropicales siguientes: *chaka'* (*Bursera simaruba* (L.) Sarg. Burseraceae), *ha'bin* (*Piscidia piscipula* Sarg. Leguminosae Faboideae). Fotografías cedidas: M<sup>a</sup> Luisa Vázquez de Ágredos. La fotografía de la izquierda está publicada en Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L. (2010).

Unos años más tarde, David Hyman (Hyman, D., 1970), distinguió mediante la difracción de rayos-x la utilización de estas sabias aditivas orgánicas en los revestimientos de estuco presentes en el antiguo sitio de *Palenque* (Chiapas, México). Finalmente, este resultado se confirmó en 1978 mediante los trabajos realizados por Elsa María Dubois (Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup>.L., 2010).

Más recientemente, el amplio estudio de Magaloni (1996, 1998 y 2001) y los trabajos de Doménech-Carbó *et al.* (2014) y el estudio llevado a cabo en la presente tesis doctoral que se expone a continuación han confirmado estas hipótesis. Los primeros resultados sobre los análisis de gomas vegetales, en muestras arqueológicas mayas, se difundieron en el primer *Workshop Internacional de Estudios Arqueométricos en el Arte Prehispánico*, que tuvo lugar en Valencia, en 2013 (Guasch-Ferré, N. *et al.*, 2013). Posteriormente, se ha elaborado un informe analítico (Doménech-Carbó, M<sup>a</sup>.T. *et al.*, 2014) a petición de Luisa Straulino, con muestras del sitio arqueológico de *Dzibanché* (estado de Quintana Roo, México), los datos del cual están incluidas en su tesis doctoral (Straulino, L., 2015).



## 1.2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 1.2.2.1. Reactivos y materiales de referencia

Glucosa, Manosa, Galactosa, Xilosa, Fucosa, Ramnosa, Arabinosa, ácido Glucurónico, ácido Galacturónico, Inositol (Sigma) fueron utilizados como patrones de referencia de monosacáridos y ácidos urónicos.

Goma huizache, goma mezquite, nopal procedentes de México se han utilizado como materiales de referencia.

Trimetilsilimidazol (TMSI), trimetilclorosilano (TMCS), cloroformo, cloruro de acetilo y metanol (Sigma) fueron utilizados en el proceso de metanólisis-trimetilsililación.

### 1.2.2.2. Instrumentación

#### *Cromatografía de gases-Espectrometría de masas (GC-MS)*

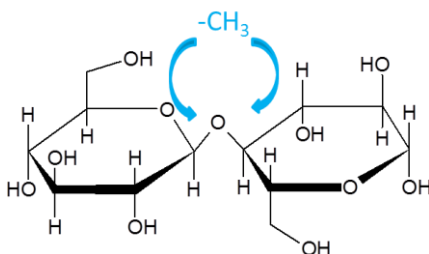
El análisis se realiza con un cromatógrafo de gases–espectrómetro de masas modelo Agilent® 5973 Network Mass Selective Detector (Agilent Instruments, USA). Se ha utilizado Agilent Chemstation software (MSD) para la integración y la evaluación de los picos del espectro de masas. Para identificar los compuestos, se ha utilizado la base de datos de espectro de masas de NIST y Wiley. Se ha realizado la separación cromatográfica mediante una columna capilar de sílice fundida HP-5-MS Agilent® (fase estacionaria: 5% fenil/95% metilpolisiloxano, longitud: 30 m × 0.25mm i.d., espesor: 0.25 µm). Las condiciones cromatográficas son: temperatura inicial, 100°C durante 2 min. La temperatura ha sido programada con un gradiente de 6°C.min<sup>-1</sup> hasta a 300°C, manteniendo ésta durante 5 minutos. Se ha utilizado helio como el gas portador con una relación de división de flujo de 1:20. El control electrónico de presión se ajusta en el modo de flujo constante con compensación de vacío. Los iones fueron generados por ionización de electrones (70 eV) en la cámara de ionización. El espectrómetro de masas fue escaneado desde m / z 20-800, con un tiempo de ciclo de 1 s.

### 1.2.2.3. Pretratamiento de las muestras

El método propuesto para el análisis de gomas vegetales y otra materia extractable de madera y cortezas de árboles está basado en el método propuesto por Bleton, J. *et al.* (1996) para el análisis de polisacáridos. Dicho método combina un primer tratamiento de metanólisis, que se lleva a cabo con cloruro de acetilo y metanol con un segundo proceso de derivatización (trimetilsililación) (Figura 95). A tal fin se ha escogido una combinación de trimetilsililimidazol (TMSI) y dimetilclorosilano (TMCS) en lugar de HMDS como proponen Bleton *et al.* (1996) dada la mayor eficiencia como derivatizante de grupos hidroxilo del TMSI (Knapp, D.R., 1979).

#### 1. Metanólisis

Ruptura del enlace glicosídico y incorporación del grupo metilo



#### 2. Trimetilsililación de grupos -OH

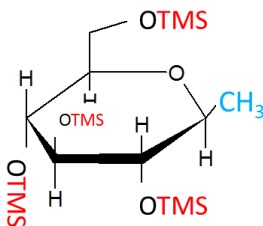


Figura 95. Esquema del método de tratamiento de las muestras propuestas

La metanólisis permite la liberación de los monosacáridos y ácidos urónicos integrantes de la macromolécula de goma por rotura de los enlaces glicosídicos y formación de los correspondientes glicósidos metilados. Cabe señalar diferentes procesos según el tipo de unidad monomérica que integra la macromolécula de goma (Mejanelle, P. *et al.*, 2002):

**a).** Los monosacáridos reductores reaccionan con metanol mediante catálisis ácida a través de sus hidroxilos anoméricos para dar metilglicósidos. De este modo se obtienen cuatro posibles isómeros que difieren en el tamaño del anillo (furanósido o piranosido) y en la estereoquímica del átomo de carbono anomérico ( $\alpha$  o  $\beta$  anómero).

**b).** Los 1,6-anhidro derivados se forman a través de una reacción intramolecular que implica la eliminación de agua entre el C6 y el hidroxilo anomérico de las  $\beta$ -aldohexopiranosas en la conformación de silla 1C.

**c).** La metanólisis de ácidos urónicos conlleva dos reacciones simultáneas: la acetilación del hidroxilo anomérico que produce el metilglicósido y la esterificación del grupo carboxilo.

En un segundo paso los productos formados tras la metanólisis son derivatizados con TMSI de modo que todos los grupos hidroxilo libres en la molécula son trimetilsililados confiriendo a ésta una elevada volatilidad.

La tabla 42 esquematiza el tratamiento al que son sometidas las muestras.

Tabla 42. Etapas del pretratamiento de las muestras

<b>Etapas</b>	<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>
1	Acondicionamiento de la muestra	- Pulverización en mortero de ágata muestras del orden de 0,001-0,0001 g - Adición de 500 $\mu$ L de agua y se mantiene en baño de ultrasonidos durante 15 min a 60 °C - Centrifugación y decantación de la disolución obtenida seguida de evaporación del agua
2	Metanólisis	- Adición de 400 $\mu$ L de una mezcla cloruro de acetilo (100 $\mu$ L + metanol 3,75 mL) en corriente de nitrógeno. Mantener a 60 °C durante 24 horas.
3	Trimetilsililación	- Llevar a sequedad en corriente de nitrógeno y añadir 6 $\mu$ L de TMSI y 2 $\mu$ L de TMCS - Calentar a 80°C durante 15 min.
4	Extracción	- Añadir 50 $\mu$ L de agua y 50 $\mu$ L de cloroformo y vortexar - Extraer la fase clorofórmica
5	Inyección-Análisi	- Inyectar 1 $\mu$ L de la disolución clorofórmica

## 1.2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1.2.3.1. Caracterización de los materiales de referencia

Con el método previamente descrito se han analizado tres gomas vegetales extraídas: por un lado, de dos plantas autóctonas de México en el ámbito mesoamericano de la cultura maya (la goma huizache y la goma mezquite); por otra parte, de una planta originaria del Altiplano mexicano, propia de culturas como la teotihuacana, la tolteca y la zapoteca (el nopal), que previamente han sido propuestas en la bibliografía especializada como posibles aditivos en la elaboración de las capas de preparación y de las capas pictóricas para la decoración mural, como se ha señalado en secciones precedentes. Las figuras 96, 97 y 98 reproducen los cromatogramas obtenidos:

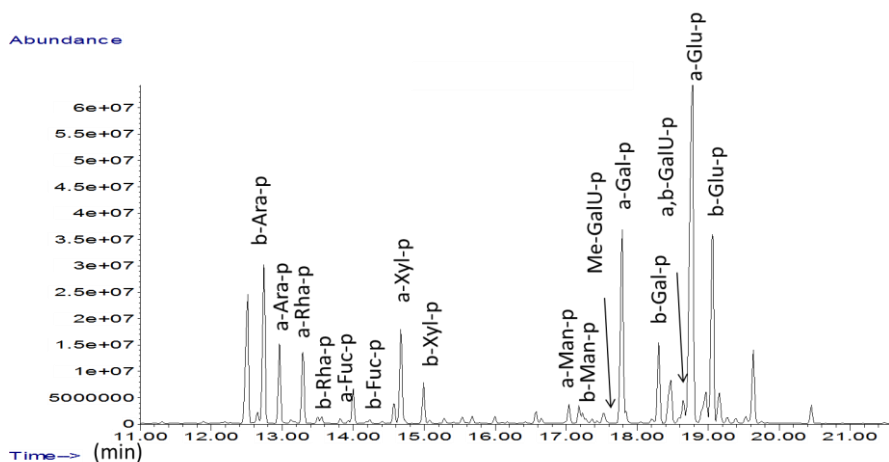


Figura 96. Cromatograma de nopal: p (piranosa) y f (furanosa) indican los diferentes isómeros cíclicos; a (alfa) y b (beta) indican los diferentes anómeros. Acrónimos: Ara: Arabinosa, Rha: Ramnosa, Fuc: Fucosa, Xyl: Xilosa, Man: Manosa, Gal: Galactosa, Glu: Glucosa, GalU: Ácido Galacturónico

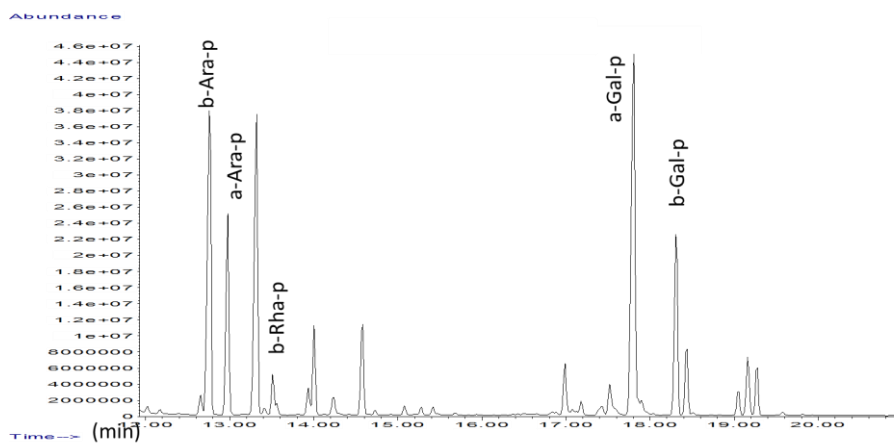


Figura 97. Cromatograma de la goma huizache. Acrónimos como en la figura 96

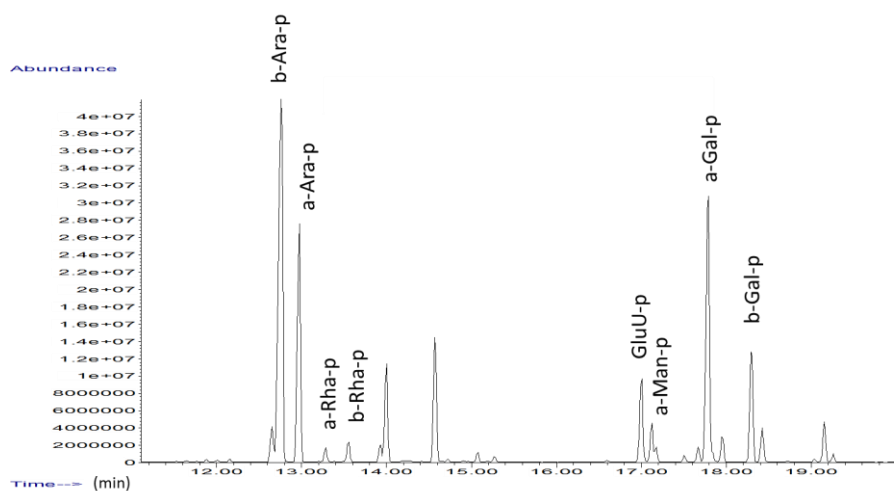


Figura 98. Cromatograma de la goma mezquite. Acrónimos como en la figura 96

La tabla 43 compendia la composición química de las gomas vegetales autóctonas consideradas por su posible uso como aditivos de la pintura mural maya

Tabla 43. Composición de las gomas vegetales autóctonas consideradas posibles aditivos de la pintura mural maya. Datos obtenidos de: <sup>a</sup>Magaloni, D. (2001): señal cromatográfica: +: débil, ++: moderada, +++: intensa, -: no identificada. Este autor no proporciona datos cuantitativos; <sup>b</sup>Bonaduce, I. *et al.* (2007): los valores mostrados se refieren en % peso; <sup>c</sup>: datos experimentales obtenidos en el presente proyecto de tesis: los valores mostrados se refieren en % área de pico cromatográfico normalizada para el conjunto de monosacáridos y ácidos urónicos identificados

GOMA VEGETAL	CONTENIDO (%)								
	Ara	Rha	Xyl	Fuc	Man	Gal	GalU	Glu	GluU
jonote <sup>a</sup>	+	+++	-	+	-	+	-	+	-
jobo <sup>a</sup>	+++	+	-	++	-	+++	-	-	-
prunera <sup>b</sup>	36	2,8	6,96	-	5,3	36	-	-	13
tzauhtli <sup>a</sup>	-	-	-	-	-	+++	-	++	-
cedro <sup>a</sup>	+++	+++	-	+	-	+++	-	-	-
nopal <sup>c</sup> <i>Opuntia ficus-indica</i>	14,5	6,3	8,4	0,5	1,7	19,5	5,6	43,6	-
chaka <sup>a</sup>	++	+	-	-	-	+++	-	-	-
mezquite <sup>c</sup> <i>Prosopis juliflora</i>	52,0	2,3	-	-	4,1	32,9	-	-	8,9
huizache <sup>c</sup> <i>Havardia albicans</i>	32	28,4	-	-	-	39,86	-	-	-

Se observa que todas las gomas poseen cantidades significativas de galactosa y arabinosa, excepto el jonote que es una goma particularmente rica en ramnosa. El nopal, además, posee un alto contenido en glucosa. Solamente el nopal y el ciruelo contienen xilosa y las gomas jonote, jobo, cedro y nopal contienen cierta cantidad de fucosa. Estas diferencias pueden facilitar la identificación de una goma en la serie de muestras de pintura mural maya que se han sometido a análisis.

La figura 99 muestra la relación de contenido en arabinosa y galactosa, expresada como porcentaje de área de pico cromatográfico de estos monosacáridos para cuatro de las gomas y extractos vegetales seleccionados como materiales de referencia en este estudio. Estos dos monosacáridos se han seleccionado ya que son componentes mayoritarios en la mayoría de gomas vegetales. El diagrama muestra una buena discriminación entre el nopal, el mezquite con respecto a las dos gomas de ciruelo y huizache que, exhiben una composición más similar en estos monosacáridos.

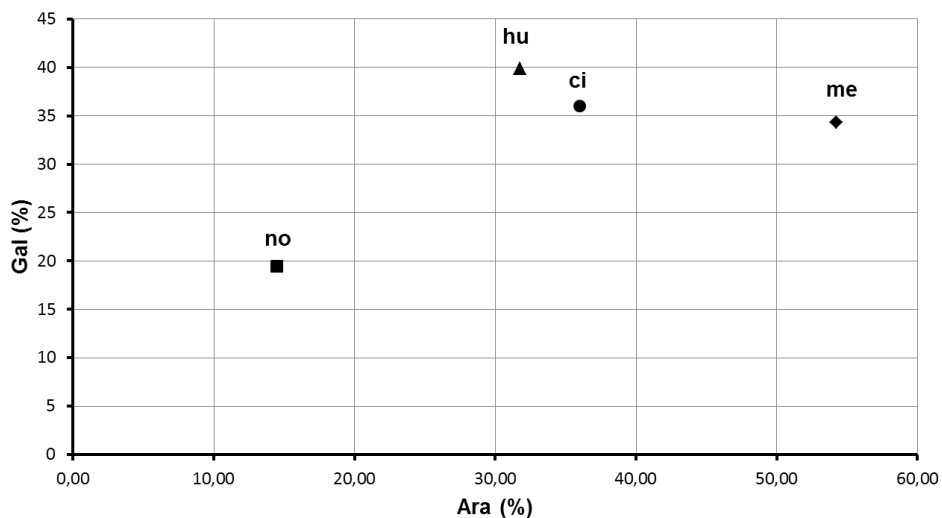


Figura 99. Contenido en galactosa vs. contenido en arabinosa hallado en las gomas vegetales de referencia. Acrónimos: no: nopal; hu: huizache; ci: ciruelo; me: mezquite

### 1.2.3.2. Caracterización de los estucos de la pintura mural maya

Se ha efectuado el análisis de los diferentes estucos pertenecientes a los sitios arqueológicos situados en los estados de Campeche (*Sta. Rosa Xtampak, Dzibilnocac y El Tabasqueño*) y de Yucatán (*Mulchic, Chacmultún, D'zula, Kulubá, Acanceh, Ek'Balam y Chichén Itzá*) de la Península de Yucatán, ya presentados en el apartado 1.1.2.2 de esta investigación.

#### 1.2.3.2.1. El aglutinante de la capa pictórica

Los valores de porcentaje relativo de área de pico cromatográfico obtenidos experimentalmente se muestran compendiados en la tabla 44. Las figuras 100 y 101 muestran, a modo de ejemplo los cromatogramas obtenidos en las muestras de capa pictórica extraídas de estucos de los sitios de *Sta. Rosa Xtampak* y de *Chichén Itzá*. El resto de cromatogramas se presentan en la figura 102 (resto de los sitios arqueológicos del estado de Campeche) y en la figura 103 (resto de los sitios arqueológicos del estado de Yucatán).

Tabla 44. Valores de porcentaje relativo de área de pico cromatográfico obtenidos experimentalmente en la capa pictórica del conjunto de muestras analizadas

MONOSACÁRIDO	COMPOSICIÓN (%)								
	CAMPECHE			YUCATÁN					
	SR	DZ	ET	MU	CH	DL	KU	EB	CI
<b>Ara</b>	4,65	-	4,53	3,16	24,84	4,83	3,24	6,36	<1%
<b>Rha</b>	-	-	2,87	-	15,57	1,77	2,63	0,92	-
<b>Fuc</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Xyl</b>	15,66	12,15	7,03	8,50	-	9,30	18,33	21,25	-
<b>Man</b>	37,08	28,34	7,47	22,26	21,74	28,76	33,45	34,77	<1%
<b>Gal</b>	9,56	6,94	3,17	9,06	12,24	5,52	7,93	9,60	<1%
<b>GalU</b>	3,39	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Glu</b>	29,67	52,58	74,94	57,01	25,61	49,82	34,42	27,10	99%

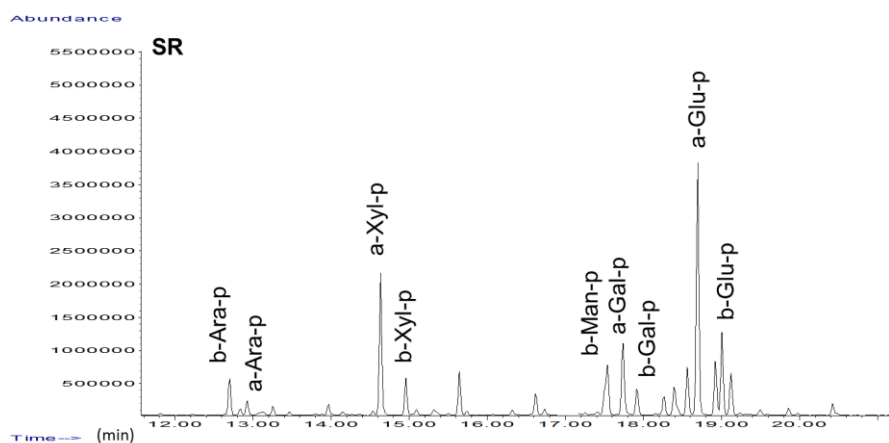


Figura 100. Cromatograma de la muestra de capa pictórica procedente de *Sta. Rosa Xtampak* (SR). Acrónimos como en la figura 96



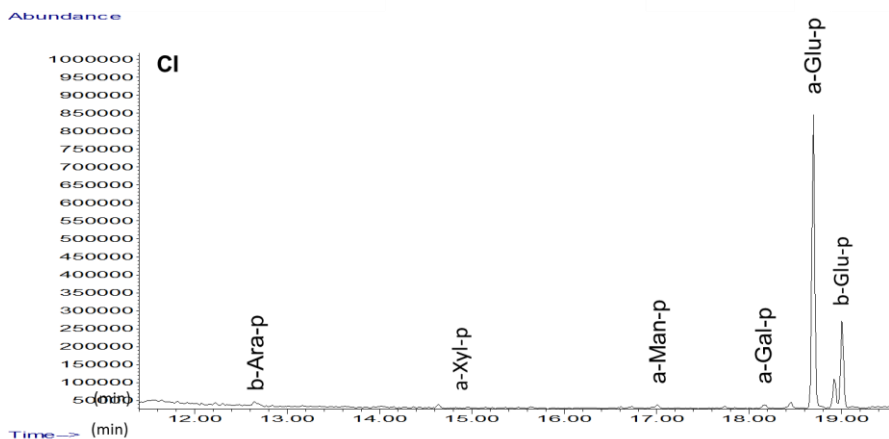


Figura 101. Cromatograma de la muestra de capa pictórica procedente de *Chichén Itzá* (CI). Acrónimos como en la figura 96

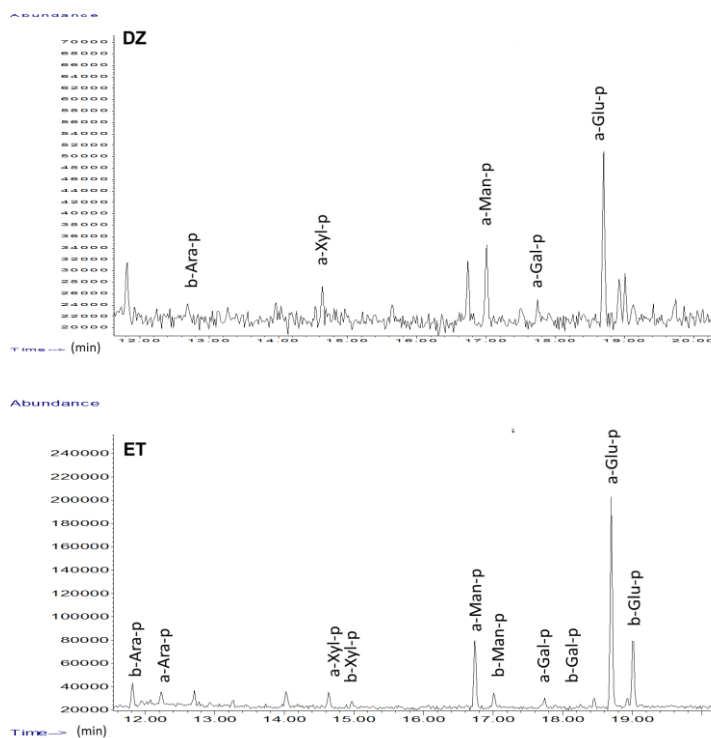
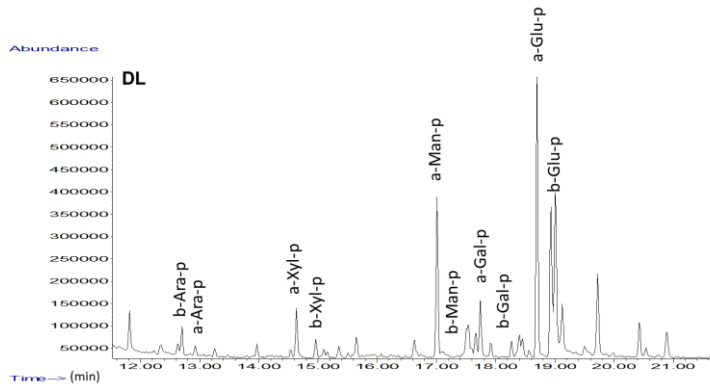
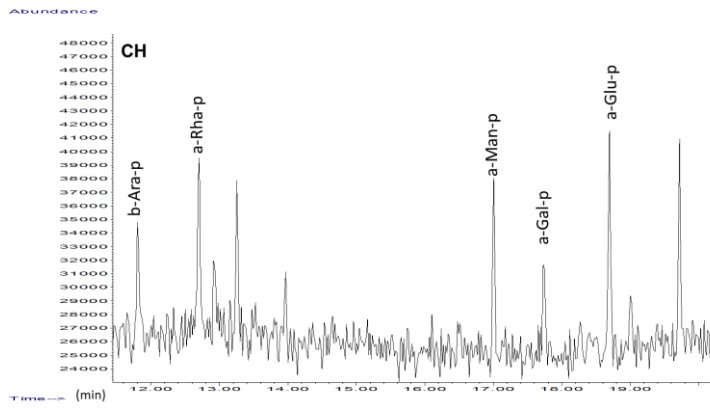
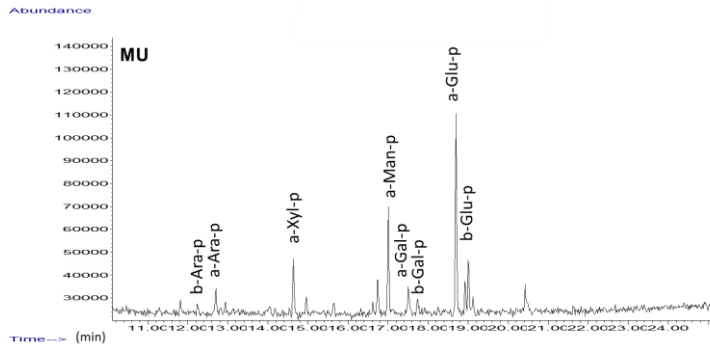


Figura 102. Cromatogramas del resto de las muestras de capa pictórica procedentes de los sitios arqueológicos del estado de Campeche: *Dzibilnocac* (DZ) y *El Tabasqueño* (ET). Acrónimos como en la figura 96



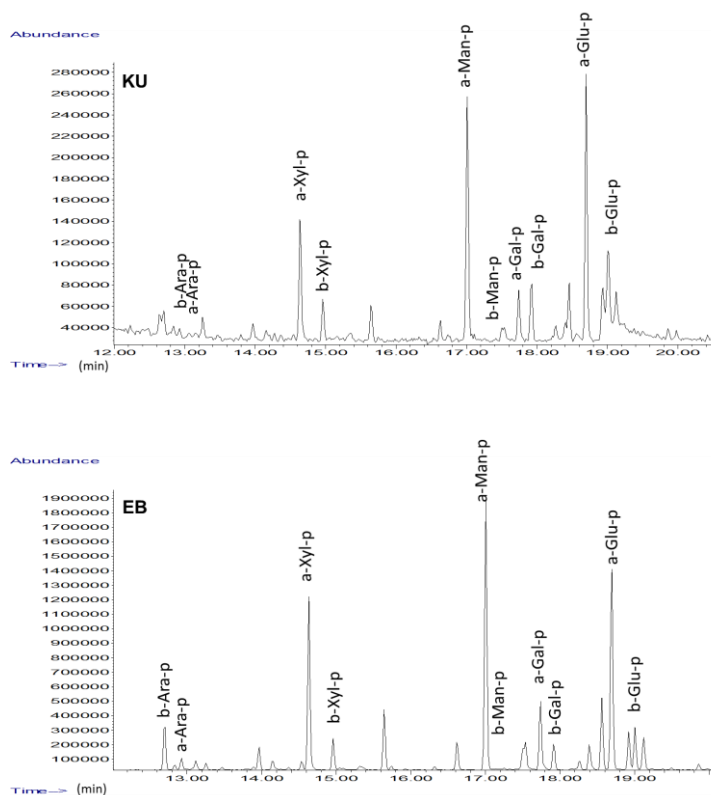


Figura 103. Cromatogramas del resto de las muestras de capa pictórica procedentes de los sitios arqueológicos del estado de Yucatán: *Mulchic* (MU); *Chacmutún* (CH); *D'zula* (DL); *Kulubá* (KU) y *Ek'Balam* (EB). Acrónimos como en la figura 96

Cabe señalar el elevado contenido en glucosa y manosa que exhiben todas las muestras, así como el moderado contenido en xilosa. Por el contrario el contenido en galactosa y arabinosa, no supera, en el mejor de los casos el 12%. El elevado contenido en estos monosacáridos, presentes en baja proporción en el conjunto de gomas propuestas como posibles aglutinantes de pintura mural, por una parte, y el bajo contenido en arabinosa y galactosa, componentes mayoritarios de la mayoría de gomas, por otra, sugiere que los materiales polisacáridos presentes en estos estratos pictóricos sean probablemente mezclas complejas de gomas y otros materiales extractables procedentes de la corteza de árboles. Otras posibles causas de variación en el contenido esperable de monosacáridos en gomas vegetales sería la acción metabólica de seres vivos, en particular, microorganismos o bien el efecto del

medio fuertemente alcalino del agua de cal en el que se preparaban estas pinturas.

El diagrama mostrado en la figura 104 muestra la relación entre el contenido en galactosa y el contenido en arabinosa hallado en las muestras de capa pictórica maya junto a la correspondiente a las gomas vegetales de referencia. Se comprueba que las muestras de pintura mural maya se agrupan (salvo por el caso de *Chacmultún*) en valores bajos de ambos monosacáridos, como se ha señalado previamente. No se observa ningún tipo de correlación asociada a la región distribuyéndose de manera aleatoria los valores del conjunto de muestras analizado independientemente de su procedencia. La desviación en el caso de *Chacmultún* se asocia al hecho de que las muestras se tomaron posteriormente a la restauración de estas pinturas en la cual se aplicaron resinas acrílicas de protección, siendo probable que la aplicación de este producto en emulsión acuosa haya modificado la composición de las pinturas y, en concreto de los materiales polisacáridos solubles en agua.

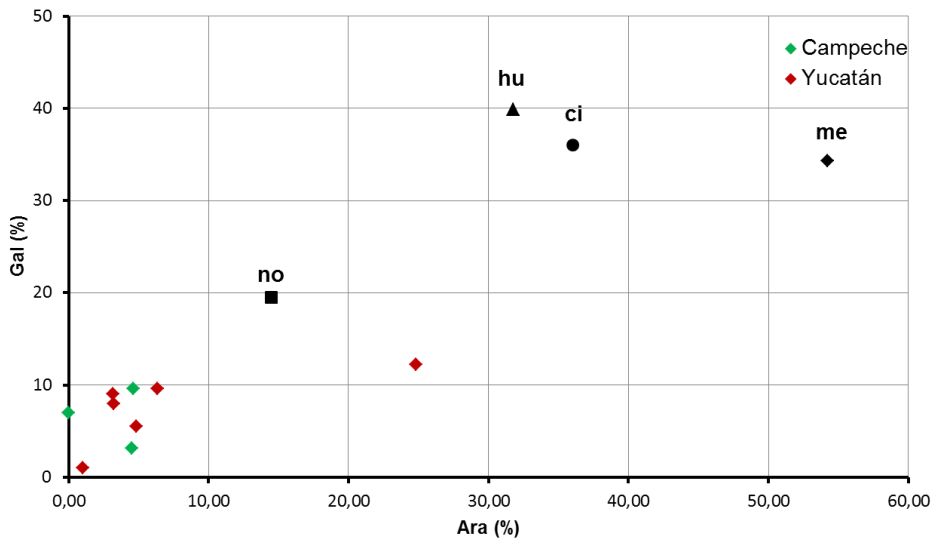


Figura 104. Contenido en galactosa vs. contenido en arabinosa encontrado en las muestras de la capa pictórica maya. Acrónimos: no: nopal; hu: huizache; ci: ciruelo; me: mezquite

### 1.2.3.2.2. El aditivo de la capa de preparación

La tabla 45 muestra los valores de porcentaje relativos de área de pico cromatográfico obtenidos experimentalmente en las capas de preparación del conjunto de las muestras analizado. Las figuras 105 y 106 muestran, a modo de ejemplo los cromatogramas obtenidos en las muestras de la capa de preparación extraídas de los sitios de *El Tabasqueño* y de *D'zula*. El resto de cromatogramas se presentan en las figuras 107 y 108.

Los resultados obtenidos son similares a los ya mostrados para las capas pictóricas, destacando el alto contenido en glucosa y manosa. Sin embargo, el contenido en galactosa, en este caso, es mayor que el hallado en la capa pictórica alcanzando valores de 71,5 y 41,9% en *Sta. Rosa Xtampak* y *Acanceh*, respectivamente. El contenido en arabinosa también se incrementa ligeramente, en general, si se compara con los valores obtenidos en las capas pictóricas para un mismo sitio arqueológico, alcanzando valores máximos de 22,2 y 19,0% en *Chacmultún* y *Mulchic* ambos sitios situados en el estado de Yucatán.

Tabla 45. Valores de porcentaje relativo de área de pico cromatográfico obtenidos experimentalmente en la capa de preparación del conjunto de muestras analizado

MONOSACÁRIDO	COMPOSICIÓN (%)									
	CAMPECHE			YUCATÁN						
	SR	DZ	ET	MU	CH	DL	KU	AC	EB	CI
Ara	13,32	5,91	5,86	19,01	22,20	8,78	7,41	11,29	<0,1%	<0,1%
Rha	-	6,52	2,62	3,81	9,73	4,23	7,41	11,24	-	-
Fuc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Xyl	-	4,65	12,19	24,36	14,76	22,33	9,95	11,34	-	-
Man	3,45	13,66	28,54	17,93	11,54	25,64	12,42	12,93	<0,1%	<0,1%
GlucU	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gal	71,59	23,27	15,93	17,39	16,85	11,94	8,35	41,91	<0,1%	<0,1%
GalU	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Glu	11,64	45,99	34,86	17,51	24,91	27,07	54,46	11,29	<0,1%	<0,1%

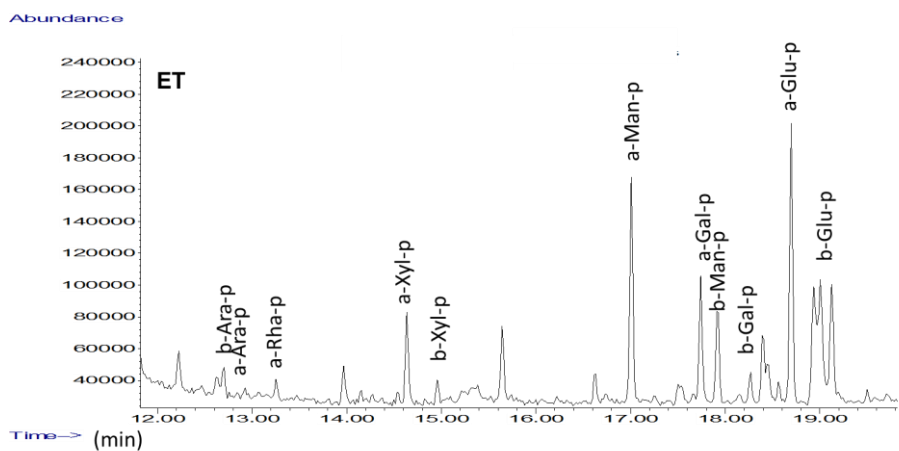


Figura 105. Cromatograma de la muestra de capa de preparación procedente de *Ei Tabasqueño* (ET). Acrónimos como en la figura 96

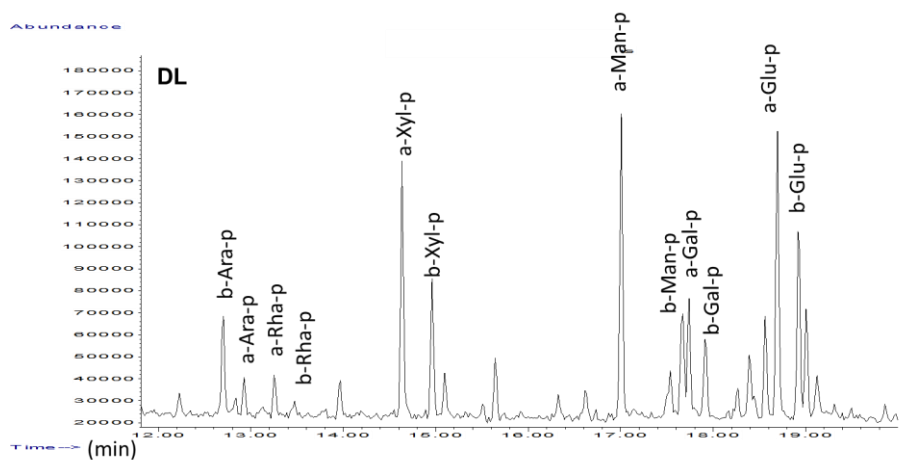


Figura 106. Cromatograma de la muestra de capa de preparación procedente de *D'zula*. Acrónimos como en la figura 96

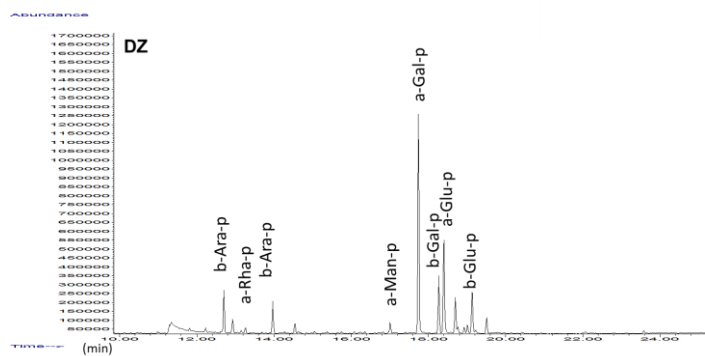
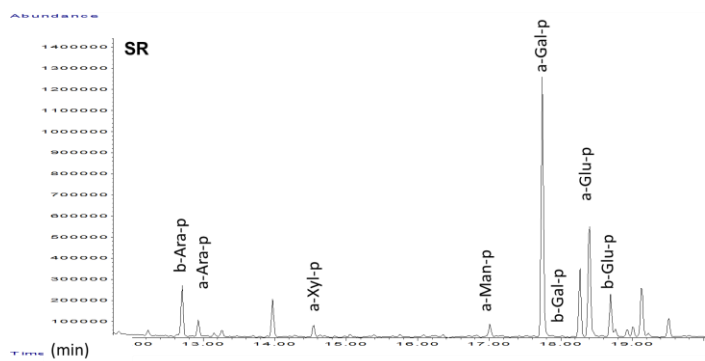
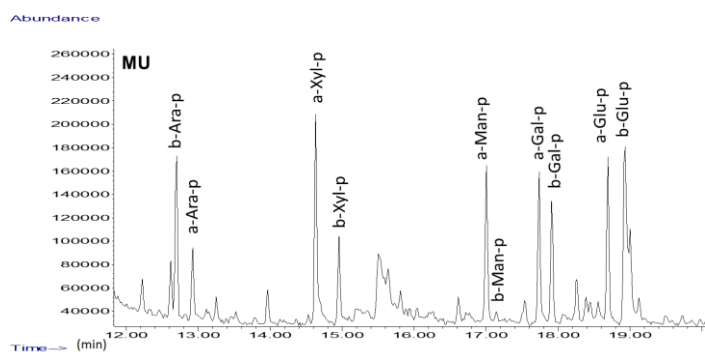
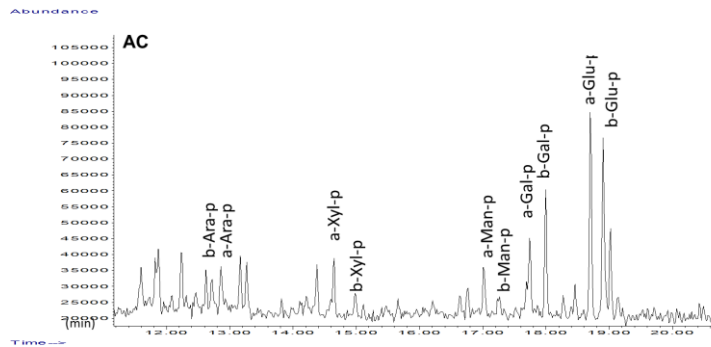
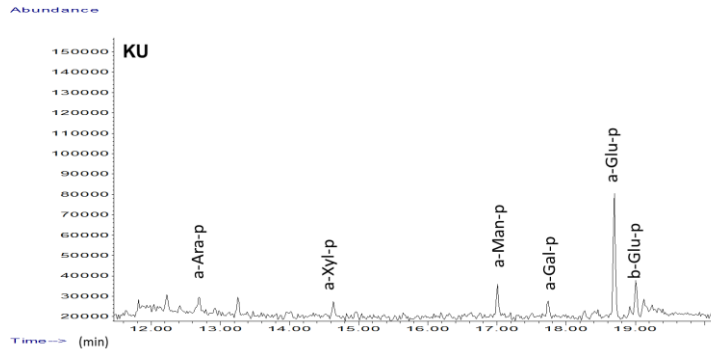
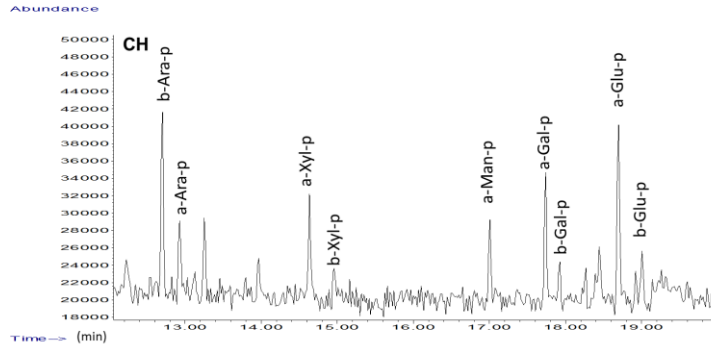


Figura 107. Cromatogramas del resto de las muestras de capa de preparación procedentes de los sitios arqueológicos del estado de Campeche: *Sta. Rosa Xtampak* (SR) y *Dzibilnocac* (DZ). Acrónimos como en la figura 96







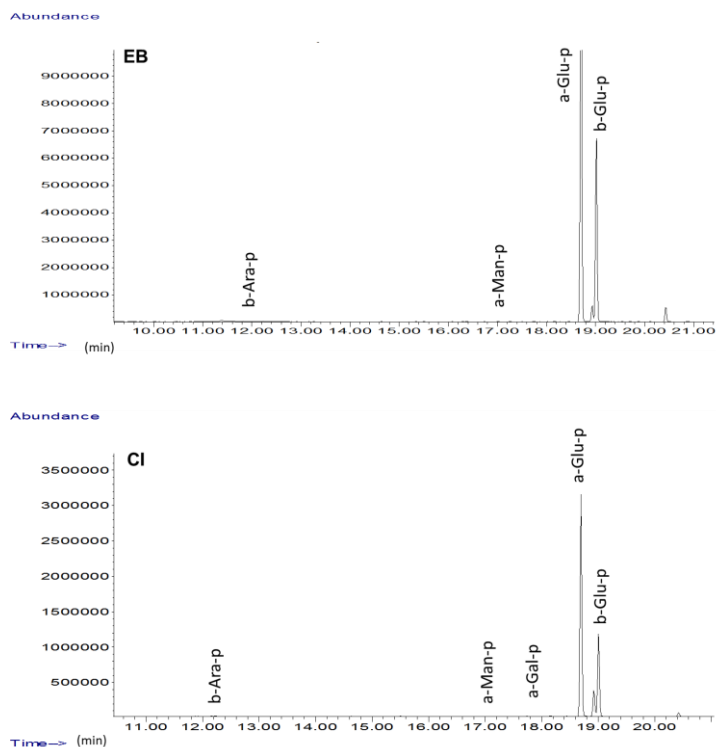


Figura 108. Cromatogramas del resto de las muestras de capa de preparación procedentes de los sitios arqueológicos del estado de Yucatán: *Mulchic* (MU); *Chacmutún* (CH); *Kulubá* (KU); *Acanceh* (AC); *Ek'Balam* (EB) y *Chichén Itzá* (CI). Acrónimos como en la figura 96

La figura 109 muestra la relación existente entre el contenido en galactosa y arabinosa en las muestras de capa de preparación estudiadas. En este conjunto de muestras parece que las procedentes de los sitios arqueológicos situados en el estado de Yucatán exhiben un mayor contenido en arabinosa mientras que las procedentes del estado de Campeche muestran mayor proporción de galactosa, si bien ambos conjuntos de puntos aparecen bastante dispersos en el diagrama. También se observa que, en general, el conjunto de muestras exhiben valores bastante próximos a los correspondientes al nopal. No obstante, el elevado contenido en manosa y glucosa que exhiben las muestras de capa de preparación, los cuales no responden a las composiciones típicas de gomas vegetales, de nuevo, parece indicar que los materiales polisacáridos presentes en este estrato constituyen, más bien, una mezcla compleja de gomas y otros materiales extractables procedentes de la corteza de los árboles.

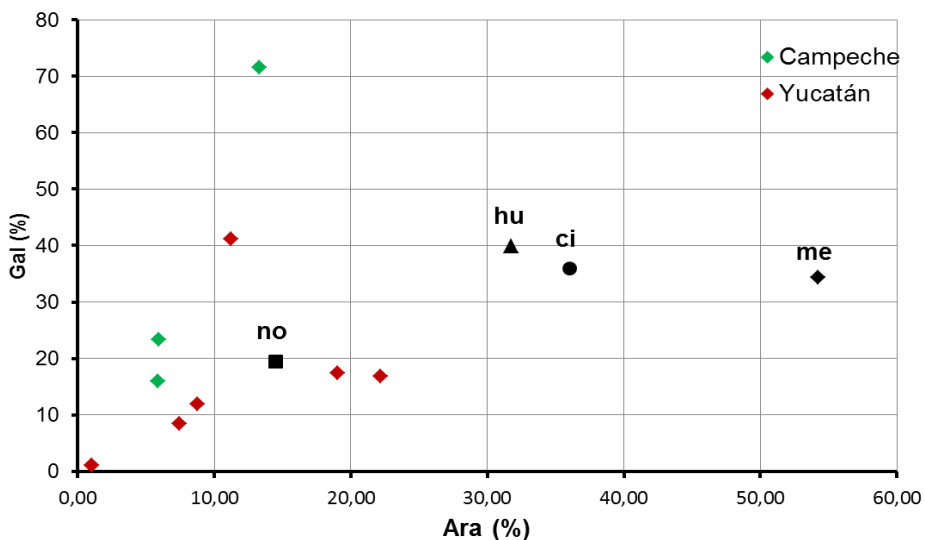


Figura 109. Contenido en galactosa vs. contenido en arabinosa de las muestras de capa de preparación del conjunto de pinturas murales estudiado. Acrónimos: no: nopal; hu: huizache; ci: ciruelo; me: mezquite

### 1.2.3.2.3. Efecto del medio alcalino en la composición de la goma

En la bibliografía se puede encontrar un número significativo de trabajos que describen el efecto que los medios alcalinos producen en los polisacáridos y que pueden principalmente producir:

- 1). Hidrólisis parcial con eliminación de unidades monoméricas o “peeling”
- 2). Procesos de isomerización: (i.e.: glucosa ↔ manosa)

Con objeto de establecer hasta qué punto el medio fuertemente alcalino en el que, presumiblemente, se prepararon las pinturas aditivadas con gomas vegetales ha influido en la composición final de las muestras, se ha diseñado un experimento con una selección de gomas vegetales de referencia. En dicho experimento las gomas vegetales se disolvieron al 1% en una disolución de hidróxido de calcio a pH 12 y se expusieron a este medio alcalino durante 72 horas. La disolución resultante se analizó siguiendo el mismo protocolo analítico que las muestras reales. Los resultados obtenidos se muestran en la

tabla 46. Las figuras 1110 y 111 muestran los cromatogramas obtenidos para la goma mezquite y para el nopal.

Tabla 46. Variación de la composición de una goma vegetal por exposición a un medio fuertemente alcalino

MONOSACÁRIDO	CONTENIDO (%)			
	GOMA MEZQUITE		NOPAL	
	Medio neutro	Medio alcalino	Medio neutro	Medio alcalino
<b>Ara</b>	52,0	76,4	14,5	-
<b>Rha</b>	2,3	1,4	6,3	-
<b>Xyl</b>	-	-	8,4	-
<b>Man</b>	4,1	-	1,7	-
<b>GlucU</b>	8,9	1,9	19,5	-
<b>Gal</b>	32,9	20,2	5,6	-
<b>Glu</b>	-	-	43,6	-

- Reducción significativa de la sensibilidad

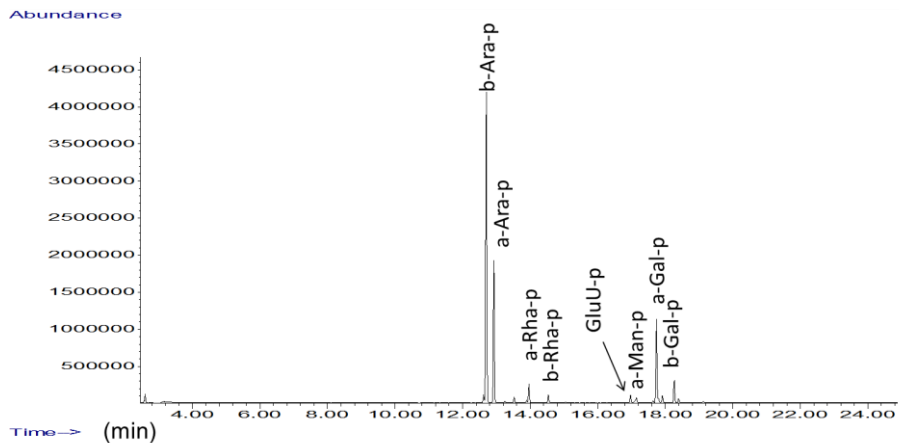


Figura 110. Cromatograma de la muestra de goma mezquite espuesta a un medio alcalino. Acrónimos como en la figura 96

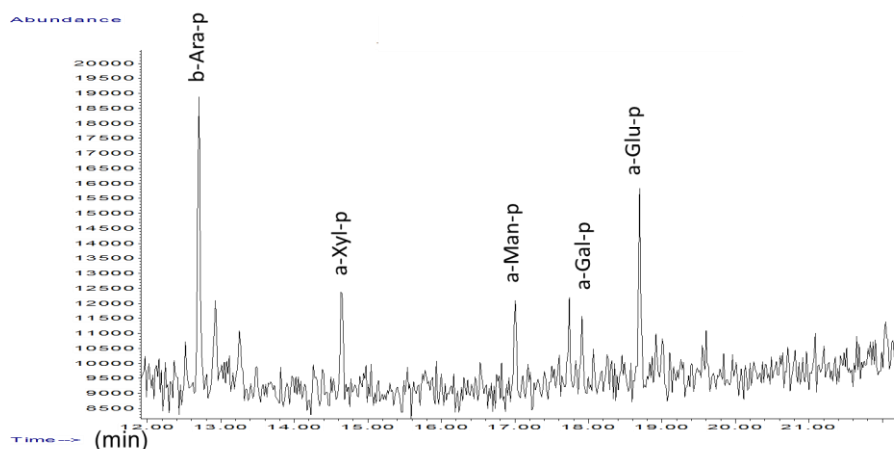


Figura 111. Cromatograma de la muestra de nopal expuesta a un medio alcalino. Acrónimos como en la figura 96

Como se puede observar en la figura 110, la goma mezquite exhibe señales cromatográficas elevadas mientras que el nopal (Figura 111), sometido al mismo medio fuertemente alcalino, exhibe una reducción drástica de las señales cromatográficas, lo cual es indicativo del mayor grado de degradación que provoca en este polímero la acción del álcali. En la goma mezquite la señal más intensa corresponde a la arabinosa, observándose una reducción significativa del contenido en el resto de monosacáridos presentes en este polisacárido. Estos resultados parecen sugerir que el efecto de los medios fuertemente alcalinos como el agua de cal es variable en las gomas vegetales en función de su composición (tipo de ramificación y monosacáridos componentes) siendo la arabinosa el monosacárido aparentemente más resistente a la acción alcalina.

Por otra parte, el resultado de este experimento sugiere que, en general, las gomas vegetales sometidas a un medio alcalino deberían exhibir contenidos mayores de arabinosa e inferiores en galactosa y otros monosacáridos. Sin embargo, los resultados experimentales obtenidos tanto en la capa pictórica como en la capa de preparación de las muestras extraídas de sitios arqueológicos mayas muestran, en conjunto, la tendencia opuesta (Figuras 104 y 109), esto es, valores de % área de pico cromatográfico inferiores para la arabinosa comparados con los de galactosa.

#### **1.2.4. DISCUSIÓN FINAL DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

- La presencia de monosacáridos integrantes de gomas vegetales permite confirmar el uso de extractos vegetales tanto en la capa pictórica como en la capa de preparación de la pintura mural maya. Sin embargo, las limitaciones tanto de las muestras como de la técnica analítica impiden la identificación de la goma vegetal empleada en cada caso. La identificación se complica más si se asume que en las muestras reales de pinturas murales pudieron estar presentes mezclas de materiales polisacáridos extractables en agua procedentes de las cortezas y partes diversas de plantas.

- La técnica de preparación de los aglutinantes y de los aditivos se basó en la extracción en medio acuoso de materiales polisacáridos a partir de las cortezas de ciertos árboles. El elevado contenido en glucosa y manosa en las muestras parece confirmar que, junto con las gomas vegetales, se extrajo cantidades significativas de otros materiales solubles en agua y en medios fuertemente alcalinos o se promovió la hidrólisis parcial de materiales no extractables integrantes de la madera y de tejidos vegetales cuyas paredes celulares son ricas en celulosas, hemicelulosas y pectinas, entre otros. La extracción/hidrólisis parcial de dichas sustancias justificarían la presencia en cantidades significativas de glucosa (procedente de la hidrólisis de la celulosa), manosa y xilosa (procedente de la hidrólisis de hemicelulosas de tipo glucomannano y glucuronoxilano). Dicho proceso estaría favorecido considerablemente por el medio fuertemente alcalino del agua de cal.

#### 1.2.4. FINAL DISCUSSION OF THE RESULTS AND CONCLUSIONS

- The presence of monosaccharides components of vegetal rubber allows to confirm the use of vegetal extracts in both, the pictorial layer and preparation layer of the Maya mural painting. However, the limitations of both, the samples and the analytical technique prevents the identification of the vegetal rubber used in each case. The identification is further complicated if it's been assumed that in the stucco samples from mural paintings, it could be found mixtures of extractable polysaccharide materials in water from bark and various parts of plants.

- The preparation technique of the binders and additives was based on the extraction in aqueous medium of polysaccharide materials from the barks of certain trees. The high content of glucose and mannose in the samples seems to confirm that, along with the vegetal rubber, significant amounts of other materials soluble in water and in strongly alkaline medium were also extracted. Either that or the partial hydrolysis of non extractable materials integrals of wood and vegetal tissues was promoted; cell walls are rich in cellulose, hemicellulose and pectin, among others. Extraction/partial hydrolysis of such substances would justify the elevated presence of glucose (from the hydrolysis of cellulose), mannose, and xylose (from the hydrolysis of glucuronoxylano glucomannan hemicelluloses type). This process would be greatly aided by the strongly alkaline medium of limewater.

**PARTE 2. NUEVAS PERSPECTIVAS EN LA ADAPTACIÓN Y LA UTILIZACIÓN DE ADITIVOS HISTÓRICOS EN LOS MORTEROS DE CAL TRADICIONALES**

## **2.1. ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS GOMAS NATURALES COMO ADITIVOS DE LOS MORTEROS DE CAL TRADICIONALES**

### **2.1.1. ANTECEDENTES**

#### **2.1.1.1. Uso de las gomas naturales como aditivos de los morteros de cal tradicionales a lo largo de la historia**

Unas de las investigaciones más completas sobre el uso de aditivos orgánicos<sup>120</sup> en los morteros de cal tradicionales, a lo largo de la historia, a partir de estudios comparativos entre los aditivos utilizados por los antiguos constructores desde la antigüedad y sobre los que no existe ninguna duda sobre su uso, son publicadas por Sickels, B. (1981 y 1982). De la consulta de sus estudios, se puede extraer una relación exhaustiva de los aditivos orgánicos utilizados en los morteros históricos y de sus propiedades (Álvarez, J.Y. *et al.*, 1995): desde la utilización de la goma arábiga en los morteros griegos (en la isla de Rodas); la utilización de albúmina de huevo, de queratina y de caseína y, además, la detección de trazas orgánicas (de huevo, de leche, de vino, de sangre animal, etc.) en los morteros egipcios (Martinete, G., 1992); de jugo de higo, de sangre, de clara de huevo y de pasta de centeno en los morteros romanos; de sangre de toro en los morteros medievales de la catedral de Rochester, a finales del siglo IX (Álvarez, J.Y. *et al.*, 1995); de proteínas animales y otros tipos de aditivos en los morteros medievales (Furlan, V., 1990); de cerveza, de cera de abejas, de huevos y las claras de huevos, de zumo de frutas, de gluten, de malta, de arroz, de azúcar, de orina, de sangre y de goma arábiga, entre el siglo XIII y el XVI (Sickels, B., 1981; Newton, G. *et al.*, 1987). Otros autores, defienden el uso de caseína, de huevos, de aceite de linaza, de sangre, de cera de abeja, de queratina, de grasa animal, de cerveza, de malta y de orina, desde la época romana hasta el siglo XVIII y el uso del aceite de linaza y de la grasa animal hasta el siglo XIX (Ashurst, J. *et al.*, 1989).

En esta investigación se realiza un vaciado de la lista de Sickels, B. (1981 y 1982) centrándolo en los aditivos orgánicos naturales de origen vegetal (gomas<sup>121</sup> naturales), ya que estos son los que nos ocupan en esta

---

<sup>120</sup> Los aditivos poliméricos naturales utilizados para la modificación de los morteros a base de cal se pueden clasificar en diferentes grupos de acuerdo a diversos criterios. De acuerdo con su origen como aditivos naturales y sintéticos; de acuerdo con la composición química como orgánico y inorgánico (Cechová, E., 2009).

<sup>121</sup> Las gomas son un grupo de carbohidratos complejos que son muy hidrofílicos. Están constituidos por miles de unidades de monosacáridos, unidos por uniones glicosídicas.



investigación. Así pues, se puede resumir que históricamente el azúcar<sup>122</sup>, como término genérico se ha utilizado para: acelerar el curado y aumentar la resistencia; emulsionar o estabilizar, produciendo mayor dureza y estabilidad a la mezcla; resistir a las heladas; modificar la plasticidad, para mejorar la trabajabilidad de los morteros; como retenedores de agua; para retrasar, solidificar y endurecer las mezclas y como consolidante y aglutinante (Sickels, L. B., 1981 y 1982). Aun así, hay que mencionar que en su lista de aditivos, solo aparece la utilización de azúcares extraídos de exudados de origen vegetal para: emulsionar o estabilizar, produciendo mayor dureza y estabilidad a la mezcla; modificar la plasticidad; mejorar el tiempo de trabajo de los morteros, asegurando una adherencia satisfactoria sobre el soporte y pudiendo trabajar la superficie de acabado; y, como consolidante y aglutinante (Sickels, L. B., 1981 y 1982).

A continuación, se presentan dos tablas de aditivos orgánicos: la primera, enumera los materiales orgánicos, agrupando solo los azúcares como término genérico, en los morteros de cal tradicionales con respecto a las funciones desarrolladas, a lo largo de la historia (Sickels, L. B., 1981 y 1982) (Tabla 47); la segunda, enumera los materiales orgánicos, agrupando solo los azúcares como término genérico, utilizados como aditivos en los morteros de cal tradicionales, en Egipto, en la época romana y según documentos que describen el proceso de construcción de algunas edificaciones en Europa (Sickels, B., 1981 y 1982) (Tabla 48).

Tabla 47. Tabla de aditivos orgánicos (azúcares como término genérico) en los morteros de cal respecto de las funciones desarrolladas, a lo largo de la historia (Sickels, L.B., 1981 y 1982). Acrónimos: 1. algodón; 2. zumo de higo; 3. zumo de fruta; 4. goma arábiga; 5. melaza; 6. azúcar; 7. almidón; 8. glucosa; 9. goma de tragacanto; 10. goma de tragacanto disuelta con agua

<b>FUNCIONES QUE DESARROLLAN</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
aceleración del curado y aumento de la resistencia		x				x	x			
emulsionadores o estabilizadores (producen una mayor dureza y estabilidad a la mezcla)			x	x		x				
resistencia a las heladas						x				
modificadores de la plasticidad para mejorar la trabajabilidad de los morteros		x				x		x		

<sup>122</sup> El nombre azúcar se utiliza para denominar diferentes monosacáridos y disacáridos, aunque por extensión se refiere a todos los carbohidratos

retardadores						x				
reductores de la necesidad de agua						x				
solidificadores, rigidizadores, endurecidos					x	x				
consolidantes, aglutinantes	x	x		x		x			x	
espesantes										x

Tabla 48. Tabla de aditivos orgánicos (azúcares como término genérico) utilizados en los morteros de cal tradicionales, en Egipto, en la época romana y según documentos que describen el proceso de construcción de algunas edificaciones en Europa (Sickels, L.B., 1981 y 1982). Acrónimos: 1. algodón; 2. zumo de higo; 3. zumo de fruta; 4. goma arábica; 5. melaza; 6. azúcar; 7. corteza de olmo

DOCUMENTOS DE EDIFICACIONES	1	2	3	4	5	6	7
Egipto, 150 a.C. <sup>123</sup>		x		x			
tiempo de Vitruvio, 46 a.C		x					
Plinio, 23 d.C		x					x
Edad Media, S. XIII			x			x	
Edad Media, S. XVI			x			x	
Plat <sup>124</sup> , año 1653				x			
a mediados del s. XVIII		x	x				
Vicat y Smith <sup>125</sup> , el año 1837					x	x	
Burnell <sup>126</sup> y periódicos de la época, el año 1850	x			x			

A parte, a mediados del siglo XX, autores como Neuburger y Hodges (Neuburger, A., 1930; Hodges, H., 1964) pioneros en el estudio de morteros históricos, testifican la utilización, ya desde la antigüedad, de la goma de tragacanto, sirviendo en los morteros como adhesivo y como sustancia obligatoria en la elaboración de morteros compatibles para la conservación y la

<sup>123</sup> Fecha que ya se corresponde dentro de la Época *Baha* de Egipto con los tiempos de las Dinastías griegas o macedónicas, que siguieron a la Conquista de Alejandro Magno, momento en qué existían muchos cambios respecto al Egipto previo a la Época Baja, marcado por su dominio en manos de muchos pueblos extranjeros (persas, asirios, entre otros y finalmente griegos) (Janot, F., 2008). En estos cambios se incluyen los relativos al uso de estos azúcares.

<sup>124</sup> Plat, Sir Hugh. *The Jewel House of Art and Nature*. London: Elisabeth Alsop, 1653.

<sup>125</sup> Louis J. Vicat, *A Practical and Scientific Treatise on Calcareous Mortars and Cements, artificial and natural*, trans Colonel J.T. Smith, R.E. (London: John Weals, Architectural Library, 1837), p.84.

<sup>126</sup> Burnell, George R. *Rudimentary Treatise on Limes, Cements, Mortars, Concretes, Mastics, Plastering, etc.* London: John Weals, 1850.

restauración de los edificios históricos de la época. En este sentido, se utilizaron estas mezclas en diferentes proyectos de restauración de la primera cincuentena del siglo XX (Bedolla, À., *et al.*, 2009; Bedolla, A., 2010). Actualmente, la goma de tragacanto se utiliza mayoritariamente en el tratamiento de pieles, como compuesto de bruñido y se utiliza ocasionalmente como un refuerzo para las telas. Como mucílago o pasta se ha utilizado como tratamiento tópico para las quemaduras. Se utiliza en los productos farmacéuticos y en los alimentos para emulsionar, espesar y estabilizar. En la industria textil es utilizada en diferentes elaboraciones de tintas de impresión; en la cerámica es usada como agente de relleno y agente de suspensión para los pigmentos. Además, es el aglutinante tradicional utilizado en la fabricación de pinturas pastel por los artistas (Whistler, R. , 1973; Glicksman, M., 1980; Aspinall, G., 1985; Cottrell, W. *et al.*, 1988). Sin embargo, no se encuentran referencias actuales sobre el uso de esta goma como consolidante o espesante en los morteros de cal.

Por lo que respecta a otros investigadores, que hacen referencia al azúcar como aditivo orgánico en los morteros de cal tradicionales, hay que destacar a Hicox, D. y Hopkins, A. (1994), los cuales en su *Recetario Industrial* describen un mortero nombrado mortero de azúcar. Estos autores explican que el mortero de azúcar se manufactura mezclando dos partes iguales de cal y de azúcar moreno con agua, resultando un mortero análogo al cemento pórtland en resistencia. Actualmente, se relaciona el azúcar con el curado del hormigón. Lapuente, R. (2008), documenta que el azúcar es un material que retrasa el curado del hormigón, por lo que puede utilizarse en los casos en que sea necesario detener el curado de este. Como curiosidad, Lapuente, R. (2008), explica que cuando se presenta un problema mecánico en un camión que transporta 6 m<sup>3</sup> de hormigón, para que no se dañe el depósito que transporta el hormigón, es suficiente adicionar 7 kg de azúcar.

### **2.1.1.2. Estudios sobre el efecto de las gomas naturales como aditivos de los morteros de cal tradicionales**

Existen diferentes grupos de investigación e investigadores que trabajan en la caracterización de los morteros históricos a base de cal y estudian el efecto de los materiales utilizados como aditivos en los morteros de cal tradicionales. Una búsqueda exhaustiva de estos grupos de investigación es elaborada por Barbero, M. (2011) en su tesis doctoral. Concretamente, los equipos de investigación, más destacados por sus resultados actuales, que se dedican a investigar sobre el efecto de las gomas naturales como aditivos de los morteros de cal forman parte de *The Getty Conservation Institute* (Los Ángeles) y de la *Universidad de Navarra* (España).

Por un lado, el equipo de investigadores de *The Getty Conservation Institute* en colaboración del *English Heritage* y la *Universidad de Granada* realizan estudios sobre el efecto de los aditivos orgánicos, tales como el nopal, en los morteros de cal (Hansen, F. *et al.*, 2002) y estudios sobre los consolidantes inorgánicos y de los tratamientos de protección aplicados a las piedras calizas, así como de los revestimientos de cal (Barbero, M., 2011). Estos investigadores pretenden entender como actúan estos aditivos para diseñar morteros de restauración. Haciendo referencia a la utilización de azúcares extraídos de exudados de origen vegetal como consolidantes y de la necesidad de encontrar un consolidante vegetal en la zona arqueológica de Teotihuacan (estado de México) (Torres, A.A. *et al.*, 2007), actualmente existen investigaciones por lo que respecta al uso de la goma de nopal como consolidante de la arquitectura de adobe bajo techo (Torres, P., 1998; Fructuós-Hernández, J., 2009; Martínez, W. *et al.*, 2008; Fernández, S.E., 2008; Martínez, F., 2009). En base a las diferentes pruebas experimentales, realizadas en el laboratorio y en el campo, con la goma de nopal, los estudios concluyen que el polisacárido consolida la arcilla de los adobes, proporcionándole firmeza y solidez (Torres, A. A. *et al.*, 2007). A parte, la goma de nopal se utiliza como aditivo de los morteros a base de cal y morteros de tierra en México y en algunas ciudades de América Central y del Sur (Kita, Y., 2013) y existen investigaciones que se basan en el estudio de las propiedades físico-mecánicas de las pastas de cal con este aditivo (Torres, P. *et al.* 2010; Pérez, A., 2009; Jáidar, Y., 2006; Cruz, S., 2013)

Además, como resultado de investigaciones de la tecnología antigua de la pintura mural de los sitios arqueológicos en el área maya, como la que se presenta en la parte 1 de esta tesis doctoral, actualmente se están utilizando morteros a base de cal con aditivos de exudados naturales de origen vegetal, para conservar-restaurar estos restos arqueológicos. En la práctica, estos

aditivos parecen beneficiar la plasticidad de las pastas de cal, el tiempo de carbonatación, el color, la adhesión y la resistencia (García, S. *et al.*, 2013; Meehan, P. *et al.*, 2013). En estos últimos años, estas mezclas se han generalizado en el área maya, para consolidar, reintegrar y fijar los morteros arqueológicos que presentan un cierto deterioro, en general, en los sitios arqueológicos de *Chicanná*, de *Becán*, de *Calakmul*, de *Chichén Itzá*, de *Ek'Balam*, de *Balamkú*, de *Río Pico* y de *Uxmal*, utilizando básicamente exudados de los árboles de *chukum*, de *holol*, de *pixoy* y de *chakah'* (García, S. *et al.*, 1997; Jáidar, Y., 2006; Jáidar, Y. *et al.*, 2008; Ruíz, C., 2007 y 2010; Herrera, H., 2008; Fuentes, A. *et al.* 2010; Meehan, P. *et al.*, 2010).

En este sentido, partiendo de los antecedentes planteados y teniendo en cuenta escritos mexicanos, de mediados y finales del siglo XIX, donde aluden que “*el nopal produce la goma tragacanto del país*” (Alzate Ramírez, J. A., 1831; Espinosa, R. A., 1897) y a sus características físico-químicas parecidas, en esta investigación se propone la selección de la goma tragacanto, como alternativa europea al nopal mexicano, para estudiar su efecto y poder evaluar su posible uso como aditivo en los morteros de cal en pasta, aplicados al campo de la conservación-restauración, ya que en esta segunda parte de esta investigación se propone un mortero de cal en pasta con aditivos orgánicos naturales, que pueda ser extrapolable a cualquier zona de estudio que reúna las condiciones óptimas para ser aplicado en el campo de la conservación-restauración de revestimientos murales. Además, cabe mencionar que no existen trabajos publicados sobre el comportamiento de morteros de cal en pasta modificados para la adición de goma de tragacanto.

Por otra parte, desde la *Universidad de Navarra*, Izaguirre, A. (2010) en su tesis doctoral realiza un estudio sobre el comportamiento de los morteros de cal aérea con aditivos, a diferentes proporciones, evaluando la influencia de su uso. Su equipo se centra en el estudio concreto de los siguientes aditivos comerciales: oleato de sodio, estearato de calcio, almidón de patata, hidroxipropil metilcelulosa (HPMC) y hidroxipropil de guaran<sup>127</sup> (derivado de la goma guar) (Izaguirre, A. *et al.*, 2009; Izaguirre, A. *et al.*, 2010a; Izaguirre, A. *et al.*, 2010b; Izaguirre, A. *et al.*, 2011a; Izaguirre, A. *et al.* 2011b). De los aditivos seleccionados en sus estudios el aditivo que proviene de un exudado de una planta es el derivado de la goma guar (hidroxipropil de guaran), que son los aditivos que nos interesan en esta investigación. La goma guar junto a la goma tragacanto son ejemplos de las gomas naturales de origen vegetal que provienen de exudados de plantas. Esta goma se introdujo en Europa en la década de los años 40, originaria de la India y de Pakistán, debido a la

---

<sup>127</sup> Polisacárido original de la goma guar.

disminución de la producción de las semillas de algarrobo. Desde hace cientos de años, la planta se utiliza en la alimentación humana y la animal, pero se utiliza como aditivo alimentario solo desde los años 50, básicamente por su capacidad al aumentar la viscosidad. Así pues en la industria alimentaria esta goma se utiliza: como estabilizante en helados; en productos que deben ser sometidos a tratamientos de esterilización a alta temperatura y en otros derivados lácticos; también como estabilizante en suspensiones y espumas. Además, los derivados de la goma guar se utilizan comúnmente en la industria del aceite, del gas, de la perforación, del textil como espesantes de la pasta para impresión, de la pintura, de la dietética, de la farmacia, de los revestimientos como modificadores de la reología, del papel, de la minería y de los explosivos (Glicksmann, M. 1969 y 1980; Dayidson, R., 1980; Funami, T. *et al.* 2005; George, A., 2007). Sin embargo, la goma guar ha recibido poca atención por lo que respecta a su potencial como aditivo de los morteros constructivos (Khayat, H., 1998; Pera, J. *et al.*, 2004), hasta que el equipo de investigadores de la Universidad de Navarra empezó sus estudios al respecto con un derivado de la goma guar.

Las investigaciones realizadas por el equipo de Izaguirre, A. durante estos últimos cinco años, del 2010 al 2015, determinan la influencia del derivado de la goma guar como un buen agente de retención de agua, en los morteros a base de cal aérea. En este sentido, partiendo de los antecedentes planteados y del reciente interés de los derivados de la goma guar como aditivo en los morteros de cemento pórtland (Poinot, T. *et al.*, 2013, 2014a y 2014b), en esta investigación se propone la incorporación de la goma guar pura, en la matriz cementante de los morteros de cal, para estudiar su efecto y poder evaluar su posible uso como aditivo en los morteros de cal en pasta, aplicados al campo de la conservación-restauración, ya que los estudios anteriores citados ensayan sus morteros utilizando un conglomerante de cal aérea en polvo, que los obliga a controlar el agua de amasado, cosa que no pasa al utilizar un conglomerante de cal aérea en pasta, la cual ya lleva incorporada de la fábrica el agua necesaria de amasado.

## 2.1.2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1.2.1. Materiales de referencia

Los materiales seleccionados para la preparación de los morteros han estado una cal aérea en pasta de St. *Astier* (clase CL 90-S PL -en pasta-, apagada en masa y con un envejecimiento mínimo de 6 meses, según la norma UNE-EN 459-1<sup>128</sup>) (Tabla 49) suministrada por la empresa NATURCAL, S.L. (Bilbao) y una arena triturada de mármol blanco de Macael<sup>129</sup>, de origen metamórfico, compuesta básicamente por calcita (hasta casi un 99% en la mayoría de los casos) suministrada por productos LAFAC, S.L. (Barcelona) con una distribución de tamaño de grano (por tamizado) de 0,063 mm a 1 mm según la norma UNE-EN 1015-1<sup>130</sup> (Figura 112 y 113).

Tabla 49. Requisitos químicos de la cal seleccionada para la preparación de los morteros, según la norma UNE-EN 459-1: 2002

TIPO DE CAL	CaO+MgO % en masa	MgO % en masa	CO <sub>2</sub> % en masa	SO <sub>3</sub> % en masa	cal libre % en masa
CL 90-S PL	≥ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2	-



Figura 112. Tamizado (tamiz de apertura de malla 1 mm) manual del árido de arena de mármol de Macael, para conseguir la curva granulométrica propuesta

<sup>128</sup> UNE-EN 459-1:2011. *Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.*

<sup>129</sup> Sacos de plástico de 25 kg aprox. de mármol triturado. Granulometría del saco: 0,8-1,8 mm.

<sup>130</sup> UNE-EN 1015-1:1999; UNE-EN 1015-1:1999/A1:2007. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 1: Determinación de la distribución granulométrica (por tamizado).*

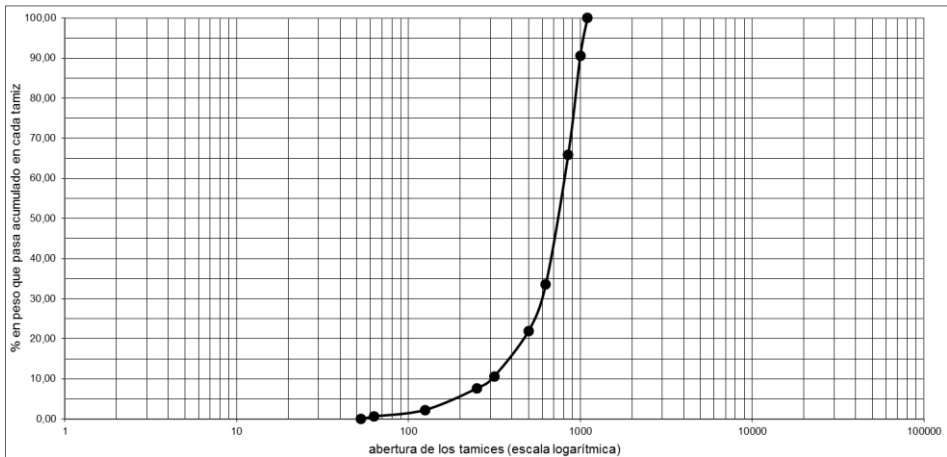


Figura 113. Curva granulométrica de la arena de mármol de Macael

Los aditivos testados han estado la goma guar y la goma de tragacanto:

- La goma guar (código de referencia en la industria alimentaria E-412) de la casa EUREKA *Repostería* (referencia: INGESP32). Se deriva del endosperma molido de la planta *Cyamopsis tetragonolobus* y *psolaroides*, de la familia de las leguminosas, originaria de la India y de Pakistán, cultivada actualmente también en los Estados Unidos. Físicamente, la goma guar es un polvo de tonalidad blanca a blanca-amarillenta. Aproximadamente, el 85% de la goma guar es *guaran*, un polisacárido soluble en agua formado por cadenas lineales de manosa, con enlaces  $1\beta\rightarrow4$ , a las que están conectadas unidades de galactosa con enlaces  $1\alpha\rightarrow6$ . La proporción de manosa respecto galactosa es 2:1: Ara (2,5%), Man (63%), Galo (34,5%) (Bonaduce, I. *et al.*, 2007).

- La goma de tragacanto (código de referencia en la industria alimentaria E-413) de la casa KREMER *Pigmento* (número de producto: K63400). Es el exudado seco de la corteza del árbol *Astragalus gummifer*, formando cintas y copos irregulares, presente en Irán y Oriente Medio. Físicamente, la goma de tragacanto se puede presentar como polvo de tonalidad blanca y ligeramente amarillenta. Químicamente se caracteriza por ser un polisacárido formado por dos fracciones principales, conocidas con el nombre de *tragacantina* y *basorina*. La *tragacantina* representa alrededor del 30% del total y es soluble en agua formando soluciones coloidales. La *basorina* es insoluble, pero se hincha para formar un gel. Ambas están formadas fundamentalmente por arabinogalactanos (Cottrell, W. *et al.*, 1988; Calvo, M., 2004): Xyl (14,9%), Ara (34,7%), Ramo (3,4%), Fuc (7,4%), GalU (13,8%), Glu (11,5%), Galo (10,8%) (Bonaduce, I. *et al.*, 2007).



## 2.1.2.2. Métodos

### 2.1.2.2.1. Preparación del mortero para la fabricación de probetas

La elaboración de las probetas de mortero se realiza en las siguientes etapas: mezcla de materiales constituyentes del mortero, amasado, enmoldado, conservación y desmoldado, según las especificaciones de la norma UNE-EN 1015-2<sup>131</sup> y la UNE-EN 480-13<sup>132</sup>.

Los materiales de referencia se mezclan en una relación en masa 1:2, es decir, los morteros se preparan mezclando 500 g de cal en pasta y 1000 g de árido (Figura 114). Según la norma UNE-EN 934-3<sup>133</sup> las proporciones de los aditivos en los morteros serán inferiores al 5% sobre el peso del conglomerante. Siguiendo esta premisa se realizaron un total de cinco probetas de mortero para cada ensayo y para cada aditivo testado: cuatro de ellas con aditivo (probeta de ensayo) y una de ellas sin aditivo (probeta testigo). Las dosificaciones ensayadas fueron 0,5, 1, 1,5 y 2% relativas al peso del conglomerante. La codificación de las muestras fue la siguiente: T (probeta testigo); 0.5G, 1G, 1.5G y 2G (probeta de ensayo con la adición de 0,5%, d'1%, de 1,5% y de 2% de goma guar, respectivamente); 0.5TG, 1TG, 1.5TG y 2TG (probeta de ensayo con la adición de 0,5%, d'1%, de 1,5% y de 2% de goma tragacanto, respectivamente) (Tabla 50).



Figura 114. De izquierda a derecha, cal en pasta de *St. Astier* (clase CL 90-S en pasta) y árido de arena de mármol Macael tamizado (granulometría: 0,063 mm <  $\Phi$  < 1.00 mm)

<sup>131</sup> UNE-EN 1015-2:1999; UNE-EN 1015-2:1999/A1:2007. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo.*

<sup>132</sup> UNE-EN 480-13:2010+A1:2011. *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 13: Mortero de referencia para albañilería para ensayos de aditivos para morteros.*

<sup>133</sup> UNE-EN 934-3:2010+A1:2012. *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 3: Aditivos para morteros para albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado.*

Tabla 50. Composición de los morteros ensayados. Acrónimos: T: testigo; G: goma guar; TG: goma tragacanto

Conglomerante	Árido	Dosificación (en masa)	Aditivo (en polvo)	Dosis de aditivo (% en masa del conglomerante)			
Cal aérea en pasta CL 90-S PL de <i>St. Astier</i>  Proveedor: NATURCAL, S.L.	Arena triturada de mármol blanco de Macael  Granulometría: 0,063 mm < $\Phi$ < 1,00 mm  Proveedor: LAFAC, S.L.	1:2 <sup>134</sup>	testigo	0%	<b>T</b>		
			goma guar Proveedor: EUREKA	0,5%	<b>0.5G</b>		
				1%	<b>1G</b>		
				1,5%	<b>1.5G</b>		
			goma tragacanto Proveedor: KREMER	2%	<b>2G</b>		
				0,5%	<b>0.5TG</b>		
				1%	<b>1TG</b>		
				1,5%	<b>1.5TG</b>		
						2%	<b>2TG</b>

#### *Amasado de los morteros*

Para facilitar la manipulación de la pasta de cal, esta se pone en un bidón y se amasa automático y manualmente hasta conseguir que la mezcla sea homogénea. La propia cal en pasta lleva el agua suficiente para disponer de una cal hidratada óptima por su uso. Primero, se pesa la cal en pasta ya homogénea y el aditivo en polvo<sup>135</sup> respectivamente con las proporciones ya indicadas anteriormente. Seguidamente se mezclan los componentes con una amasadora automática (*Manufactured by TESTIMONIS, Milano-Italy*) (según la norma UNE EN 196-1<sup>136</sup>) a velocidad lenta (velocidad 1 de la máquina) durante 2 minutos y 30 segundos. Se para el amasado automático y se acaba manualmente durante unos 30 segundos más, para asegurar que no haya quedado material sin mezclar en el fondo del recipiente. Posteriormente, se incorpora el árido, durante 15 segundos, mientras la máquina vuelve a estar en funcionamiento y se deja que continúe el amasado de los tres componentes, durante 2 minutos y 30 segundos más. Se vuelve a parar la máquina y se continúa el proceso manualmente, durante 30 segundos más, para volver a

<sup>134</sup> La dosificación en volumen de los morteros ensayados es 1:2,3. Este valor se calcula a partir de la determinación de las densidades tanto del árido como de la cal en pasta ( $d=m/V$ ; donde  $d$  es la densidad del material;  $m$  es la masa del material y  $V$  es el volumen del material).

<sup>135</sup> Se decide añadir el aditivo en polvo después de realizar distintos ensayos donde se experimenta añadir el aditivo en disolución en agua y se verifica que la mezcla no resulta homogénea o excede de agua.

<sup>136</sup> UNE-EN 196-1:2005. *Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.*

asegurar un buen amasado de todos los componentes de la mezcla. Para verificar que la mezcla sea homogénea se vuelve a activar la amasadora 30 segundos según más (Figura 115).





Figura 115. De izquierda a derecha y de arriba abajo: (a). amasado automático de la pasta de cal; (b). pesada de la cal en pasta; (c). pesada del aditivo en polvo con la proporción correspondiente; (d). mezcla de los componentes con una amasadora automática; (e). pesada del árido; (f). incorporación del árido; (g). amasado automático; (h). amasado manual.

### *Enmoldado y compactación de los morteros*

Se realizan tres tipos de probetas, prismáticas, cúbicas y cilíndricas, confeccionando así una serie de probetas geoméricamente condicionadas a las especificaciones de los ensayos hídricos, físico-mecánicos y de durabilidad realizados, tal com se desarrolla a continuación:

#### *Probetas prismáticas*

La mezcla ya homogénea de mortero se vierte en los moldes<sup>137</sup> geoméricamente preparados para confeccionar probetas en forma de prismas rectos (dimensiones 16x4x4 cm según la norma UNE-EN 1015-2 normalizados). La mezcla se vierte hasta la mitad del molde y se practican 25 golpes dentro de cada probeta, con una barrita de vidrio, para compactar la mezcla y se sacude el molde una vez siguiendo los puntos cardinales del recipiente. Seguidamente, se acaba de verter el mortero en los moldes y se vuelven a practicar 25 golpes más y una sacudida. Finalmente, se enrasan los moldes con una regla metálica para retirar el material sobrante, comprobando que en la superficie externa de la probeta no se observan burbujas de escape de aire (Figura 116). De cada amasada (1500 g en total = 500 g de cal en pasta

<sup>137</sup> Los moldes para confeccionar las probetas prismáticas, utilizados en esta investigación, son moldes de silicona fabricados con las dimensiones normalizadas (16x4x4) cm según la norma UNE-EN 1015-2.

+ 1000 g de árido) se obtiene la pasta suficiente para confeccionar 3 probetas (1 molde).



Figura 116. De izquierda a derecha, fotografías que muestran el proceso de enmoldado de las probetas prismáticas

### *Probetas cúbicas*

Para poder disponer de probetas cúbicas se procede a cortar las probetas prismáticas ya confeccionadas y carbonatadas. Para esta finalidad se utiliza una radial industrial de pie<sup>138</sup> con un disco muy fino, para perder el mínimo de material posible. De cada prisma se obtienen tres cubos de 4x4x4 cm (dimensiones según la *Commission 25-PEM RILEM*<sup>139</sup>) (Figura 117).



Figura 117. De izquierda a derecha, fotografías que ilustran el proceso de cortar las probetas prismáticas para obtener las probetas cúbicas

<sup>138</sup> gracias a la colaboración desinteresada del técnico de laboratorio el Sr. Costa del *Núcleo de Materiais Pétreos e Cerâmicos do Departameto de Materiais (NPC/DM)* (LNEC).

<sup>139</sup> *Commission 25-PEM Protection et Eróision des Monuments. Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. Recommendations provisoires RILEM (Essais et recherches, matériaux et constructions, vol. 13, n 75, 1980).*



### *Probetas cilíndricas*

La mezcla ya homogénea de mortero se vierte en los moldes geoméricamente preparados para confeccionar probetas cilíndricas (dimensiones 20 cm de diámetro por 2 cm de altura según la norma UNE-EN 1015-19<sup>140</sup> normalizados). La mezcla se vierte hasta la mitad del molde y se practican 25 golpes en cada probeta para compactar la mezcla. Seguidamente, se acaba de verter el mortero en los moldes y se vuelven a practicar 25 golpes más. Finalmente, se enrasan los moldes con una regla metálica para retirar el material sobrante y se vuelven a practicar 25 golpes más, comprobando que en la superficie externa de la probeta no se observan burbujas de escape de aire (Figura 118). De cada amasada (1500 g en total = 500 g de pasta de cal + 1000 g de árido) se obtiene la pasta suficiente para confeccionar 1 probeta (1 molde).



Figura 118. De izquierda a derecha, fotografías que muestran el proceso de enmoldado de las probetas cilíndricas

### *Desmoldado y conservación*

Según la norma UNE EN 1015-11<sup>141</sup> en el apartado 7.3 (condiciones de conservación y curado), las probetas enmoldadas se deben conservar en una cámara húmeda ( $20 \pm 2$  °C de temperatura y  $95 \pm 5\%$  de humedad relativa) durante 5 días y desmoldarlas el sexto día, conservando las probetas en la cámara húmeda 2 días más y, posteriormente conservarlas en el exterior ( $25 \pm 5$  °C de temperatura y  $65 \pm 5\%$  de humedad relativa) 21 días. Dado que esta norma regula la conservación de morteros de cemento pórtland y morteros de

<sup>140</sup> UNE-EN 1015-19:1999; UNE-EN 1015-19:1999/A1:2005. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido.*

<sup>141</sup> UNE-EN 1015-11:2000; UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.*

cemento con cal aérea, se realiza un molde de 3 probetas prismáticas de sacrificio para valorar si las condiciones de conservación que propone la norma se adaptan a los morteros de cal en pasta, que son los que nos ocupan en esta investigación. Cazalla, O. (2002), ya establece modificaciones en la norma para morteros de cal aérea, proponiendo la conservación de las probetas en condiciones de temperatura y HR ambientales, 7 días en el molde antes de ser desmoldadas y el resto de tiempo desmoldadas hasta el momento del ensayo ( $20 \pm 5$  °C de temperatura y  $60 \pm 5$  % de humedad relativa). En esta investigación, se siguen las indicaciones efectuadas por Cazalla, O. (2002), comprobando que el desmoldado de las probetas al sexto día no es posible (Figura 119), ya que los morteros de cal tienen un curado más lento y no adquieren la consistencia necesaria para ser desmoldadas en un período menor de 7 días, tal y como apunta Cazalla, O. (2002) en su tesis doctoral. Por tanto, según la experiencia adquirida y la bibliografía citada se decide modificar las condiciones de conservación siendo las siguientes: las probetas conservadas en una habitación climatizada a una temperatura de  $20 \pm 5$ °C y a una humedad relativa de  $60 \pm 5$ % durante 6 días y desmoldadas el séptimo día; la conservación de las probetas en la misma habitación climatizada a una temperatura de  $20 \pm 5$ °C y a una humedad relativa de  $60 \pm 5$ % hasta el momento del ensayo. Todas las superficies de las probetas deben estar libres para evitar la falta de CO<sub>2</sub> necesario para que el proceso de carbonatación de estos morteros se realice idóneamente (Figura 120).

La pauta de desmoldado y de conservación de las probetas cilíndricas (Figura 121) ha estado la misma que las de las probetas prismáticas y las probetas cúbicas una vez cortadas se conservan hasta el momento del ensayo (Figura 122).

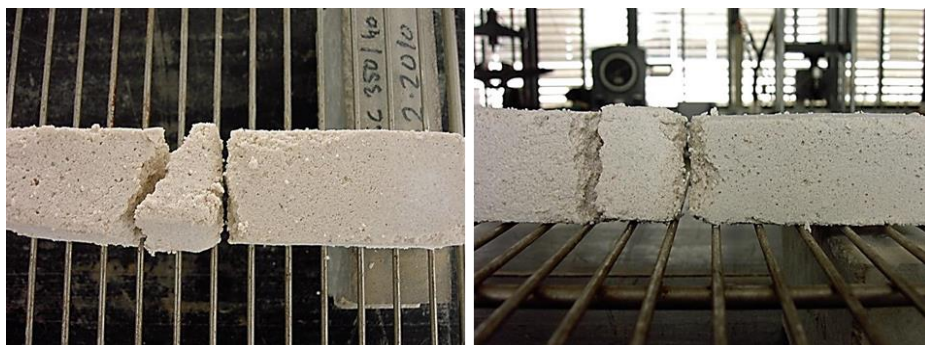


Figura 119. Aspecto de dos probetas desmoldadas el sexto día, donde se comprueba que el tiempo es insuficiente para que estas adquieran la consistencia suficiente para mantener la forma prismática



Figura 120. De izquierda a derecha y de arriba abajo: (a) y (b). desmoldado de las probetas prismáticas el séptimo día; (c) y (d). habitación climatizada ( $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  y  $60\pm 5\%$ ) donde se conservan las probetas prismáticas hasta el momento del ensayo



Figura 121. Probetas cilíndricas desmoldadas y conservadas en la habitación climatizada ( $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  y  $60\pm 5\%$ ) hasta el momento del ensayo





Figura 122. Probetas cúbicas una vez cortadas y conservadas en la habitación climatizada ( $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  y  $60\pm 5\%$ ) hasta el momento del ensayo

### 2.1.2.2.2. Probetas

A continuación, en las tablas 51, 52 y 53 se presenta el protocolo de ensayo, los tipos de probetas y el número de probetas utilizadas para cada ensayo, tanto en la determinación de las propiedades reológicas del mortero (en estado fresco) como las propiedades del mortero cuando está endurecido y la durabilidad del mortero, respectivamente:

Tabla 51. Protocolo de ensayo de las propiedades reológicas del mortero (en estado fresco)

Protocolo de ensayo		Amasada	Número de amasadas	
			Para cada mortero	Repetición del ensayo
UNE-EN <sup>142</sup> 1015-3:2000	Determinación de la consistencia del mortero fresco	1500 g = 500 g de cal en pasta + 1000 g de árido	1	3
UNE-EN <sup>143</sup> 1015-6:1999	Determinación de la densidad aparente del mortero fresco	1500 g = 500 g de cal en pasta + 1000 g de árido	se han utilizado las mismas amasadas del ensayo UNE-EN 1015-3	

<sup>142</sup> UNE-EN 1015-3:2000; UNE-EN 1015-3:2000/A1:2005. *Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).*

<sup>143</sup> UNE-EN 1015-6:1999; UNE-EN 1015-6:1999/A1:2007. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.*

UNE-EN <sup>144</sup> 1015-7:1999	Determinación del contenido en aire en el mortero fresco	2250 g = 750 g de cal en pasta + 1500 g de árido <sup>145</sup>	1	3
prEN <sup>146</sup> 1015-8:1999	Determinación de la capacidad de retención de agua	1200 g = 400 g de cal en pasta + 800 g de árido <sup>147</sup>	1	3
UNE-EN <sup>148</sup> 1015-9:2000	Determinación del período de trabajabilidad del mortero fresco	1200 g = 400 g de cal en pasta + 800 g de árido	1	3

Tabla 52. Protocolo de ensayo, tipos de probetas y número de probetas para determinar las propiedades del mortero en estado endurecido, la estructura y la carbonatación del mortero

Protocolo de ensayo		Tipo de probetas	Número de probetas	
			Para cada mortero	Total
Test No. II. 6 RILEM <sup>149</sup> 1980	Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad	cubos <sup>150</sup> (4x4x4) cm (impermeabilización de las probetas)	4	36
Test No. II. 5 RILEM <sup>151</sup> 1980 i NORMAL- 29/88 <sup>152</sup>	Determinación de la curva de evaporación	cubos (4x4x4) cm (impermeabilización de las probetas)	se han utilizado las mismas probetas del ensayo RILEM II.6	

<sup>144</sup> UNE-EN 1015-7:1999. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco.*

<sup>145</sup> cantidad superior de mortero amasado condicionado para la capacidad del recipiente normalizado del aparato con el que se realiza el ensayo.

<sup>146</sup> prEN 1015-8:1999. *Methods of test for masonry. Part 8: Determination of wáter retentivity of fresh mortar.*

<sup>147</sup> esta cantidad inferior de mortero amasado es suficiente para rellenar los tres moldes normativos.

<sup>148</sup> UNE-EN 1015-9:2000; UNE-EN 1015-9:2000/A1:2007. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del período de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco.*

<sup>149</sup> II. *Tests defining the properties connected with the presence and the movement of water. Test No. II. 6. Water absorption coefficient (capillarity), (RILEM, 1980).*

<sup>150</sup> probetas cortadas a partir de las probetas prismáticas

<sup>151</sup> II. *Tests defining the properties connected with the presence and the movement of water. Test No. II. 5. Evaporation curve, (RILEM, 1980).*

<sup>152</sup> NORMAL-29/88. *Misura dell'Indice di Asciumento (Drying Index), (NORMAL, 1988).*

Test No. II. 1 RILEM <sup>153</sup> 1980	Determinación del coeficiente de saturación	cubos 4x4x4 cm (no impermeabilización de las probetas)	4	36
Test No. I.1 RILEM <sup>154</sup> 1980	Determinación de la porosidad accesible al agua bajo condiciones al vacío	cubs 4x4x4 cm (no impermeabilización de las probetas)	se han utilizado las mismas probetas del ensayo RILEM II.1	
Test No. I.2 RILEM <sup>155</sup> 1980	Determinación de la densidad aparente y del volumen aparente	cubos 4x4x4 cm (no impermeabilización de las probetas)	se han utilizado las mismas probetas del ensayo RILEM II.1	
UNE-EN 1015- 19:1999 i EN ISO 12572:2001 <sup>156</sup>	Determinación de la permeabilidad al vapor de agua	probetas cilíndricas con un diámetro de 20 cm y altura 2 cm	3	15
UNE-EN 1015- 11:2000	Determinación de la resistencia a la flexión	probetas prismáticas 4x4x16 cm	variable	42
UNE-EN 1015- 11:2000	Determinación de la resistencia a la compresión	las dimensiones de los semiprismas resultantes del ensayo de la flexión	variable	84
UNE-EN 13295:2005 <sup>157</sup> i 14630:2007 <sup>158</sup>	Determinación de la resistencia y la profundidad a la carbonatación	las dimensiones de los semiprismas resultantes del ensayo de la compresión	se han utilizado las probetas resultantes del ensayo UNE-EN 1015:11	
Test No. I. 5 RILEM <sup>159</sup> 1980	Determinación de la distribución del tamaño de poro (porosimetría por intrusión de mercurio)	muestras irregulares de los cubos	2	10

<sup>153</sup> II. *Tests defining the properties connected with the presence and the movement of water.* Test No. II. 1. *Saturation coefficient, S*, (RILEM, 1980).

<sup>154</sup> I. *Tests defining the structure.* Test No. I.1. *Porosity accesible to water* (RILEM, 1980).

<sup>155</sup> I. *Tests defining the structure.* Test No. I.2. *Bulk densities and real densities*, (RILEM, 1980).

<sup>156</sup> EN ISO 12572:2001. *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of wáter vapour transmission properties*, (CEN, 2001)

<sup>157</sup> UNE-EN 13295:2005. *Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia a la carbonatación.*

<sup>158</sup> UNE-EN 14630:2007. *Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la profundidad de carbonatación en un hormigón endurecido por el método de la fenolftaleína.*

<sup>159</sup> I. *Tests defining the structure.* Test No. I.5. *Pore-size distribution (mercury porosimeter)*.

Tabla 53. Protocolo de ensayo, tipos de probetas y número de probetas para determinar la durabilidad del mortero

Protocolo de ensayo		Tipo de probetas	Número de probetas	
			Para cada mortero	Total
UNE-EN <sup>160</sup> 12371:2002	Determinación de la resistencia al hielo-deshielo	probetas prismáticas 4x4x16 cm	variable	19
UNE-EN <sup>161</sup> 12504-4:2006	Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos	probetas prismáticas 4x4x16 cm	se han utilizado las probetas resultantes del ensayo UNE-EN 12371:2002	

Las probetas fueron preparadas en el laboratorio de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria en Edificació de la Universitat Politècnica de València (ETSIE-UPV)<sup>162</sup>, con excepción de las necesarias para realizar los ensayos para determinar las propiedades del mortero fresco y las del ensayo de la permeabilidad al vapor de agua, que fueron amasadas en el laboratorio del *Núcleo de Revestimientos e Isolamentos do Departamento de Edifícios (LNEC)*<sup>163</sup>, Lisboa.

### 2.1.2.2.3. Ensayos para determinar las propiedades reológicas del mortero

#### *Determinación de la consistencia del mortero fresco*

El ensayo de la determinación de la consistencia en estado fresco, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1015-3:2000. El objetivo del ensayo es determinar, mediante el valor del escurrimiento, la consistencia del mortero fresco amasado, tanto de la

<sup>160</sup> UNE-EN 12371:2011. *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad.*

<sup>161</sup> UNE-EN 12504-4:2006. *Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.*

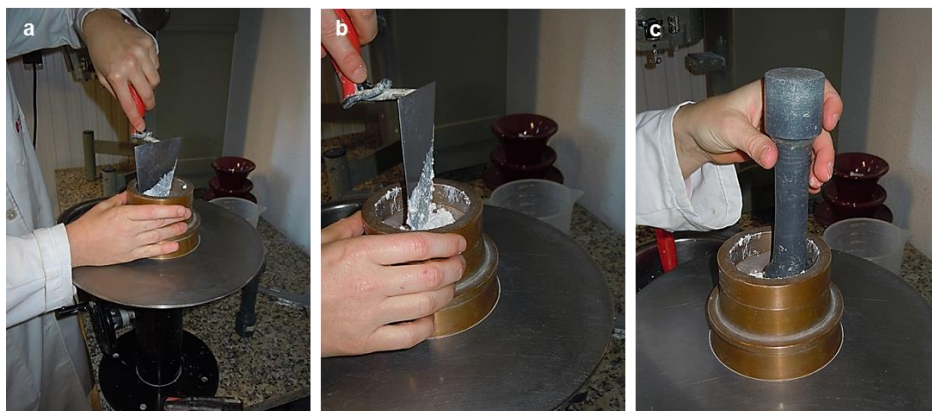
<sup>162</sup> gracias a la colaboración desinteresada del profesor José Ramón Albiol Ibáñez, del Departament de Construccions Arquitectòniques de la ETSIE (UPV) y del técnico medio de laboratorio Rafael Calabuig Pastor de la ETSIE (UPV).

<sup>163</sup> gracias a la colaboración desinteresada del técnico de laboratorio Bento del *Núcleo de Revestimientos e Isolamentos do Departamento de Edifícios (NRI/DED)* (LNEC).

amasada testigo (T) como de las amasadas con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma tragacanto –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). Se efectúan tres determinaciones para cada amasada de mortero ensayada.

El valor del escurrimiento se determina midiendo el diámetro medio<sup>164</sup>, en mm, de una muestra de mortero fresco colocado, con la ayuda de un molde determinado, sobre el disco de una mesa de sacudidas definida, donde el mortero, después de 15 segundos de haber colocado la muestra en el molde, se saca lentamente. Posteriormente, el mortero se somete a 15 sacudidas verticales, levantando la mesa de sacudidadas y dejándola caer libremente desde una altura determinada, con una frecuencia constante de aproximadamente una sacudida por segundo (Figura 123).

Cabe mencionar, que dado que este estudio tiene como objetivo determinar como la incorporación, a la matriz cementante de morteros de cal en pasta, de dos aditivos a proporciones variables, modifican las propiedades reológicas de estos, en este ensayo no se incorpora más agua de la que ya lleva incorporada la pasta de cal de fábrica. De esta manera, se puede valorar como estos afectan a la consistencia del mortero en estado fresco.



---

<sup>164</sup> Se mide el diámetro del mortero en dos direcciones perpendiculares entre sí (mm) utilizando un pie de rey. El valor de escurrimiento final resulta de la media aritmética de los valores en mm de los dos diámetros perpendicularmente opuestos del mortero asentado.

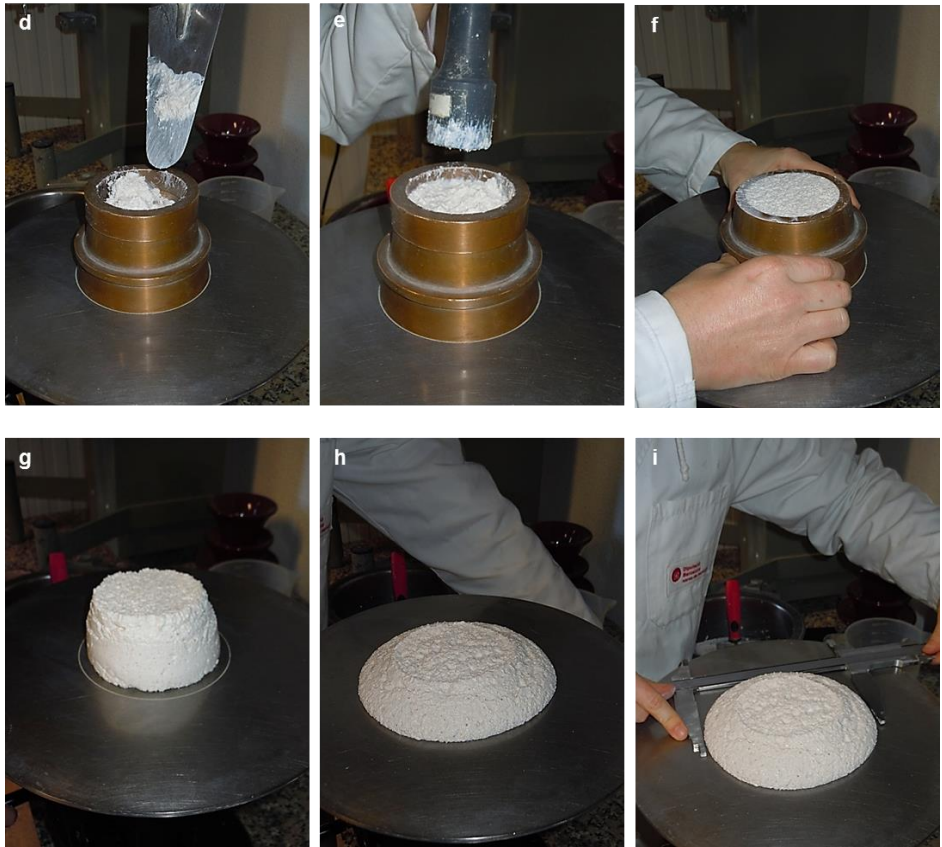


Figura 123. Determinación de la consistencia del mortero fresco, de izquierda a derecha y de arriba a abajo: (a) y (b). relleno de la mitad del molde troncocónico determinado para la muestra de mortero; (c). compactación del material con 10 golpes de pistón para asegurar el relleno uniforme del molde; (d). relleno de la segunda mitad del molde troncocónico determinado para la muestra de mortero; (e). compactación de la segunda capa de material con 10 golpes de pistón más; (f). una vez lleno el molde se saca la pieza superior y se enrasa el producto, sacando así el exceso de material y se limpian los posibles restos de los bordes y del disco; (g). desmoldado del producto, se espera 15 segundos; (h). se acciona la tabla de sacudidas a una velocidad de una sacudida por segundo, efectuando un total de 15 sacudidas. A medida que se producen las sacudidas el producto se va asentando; (i). se mide el diámetro del escurrimiento utilizando un pie de rey, en dos direcciones perpendiculares entre sí.

### *Determinación de la densidad aparente del mortero fresco*

El ensayo de la determinación de la densidad aparente en estado fresco, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1015-6:1999. El objetivo del ensayo es determinar la densidad aparente del mortero fresco amasado, tanto de la amasada testigo (T) como de las amasadas con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma tragacanto –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). Se efectúan tres determinaciones para cada amasada de mortero ensayada.

Se determina dividiendo la masa (g) del mortero ensayado por el volumen ( $\text{dm}^3$ ) que ocupa cuando se introduce, de una manera prescrita, en un recipiente de medida que tiene una capacidad dada (vaso cilíndrico de una capacidad de 0,5 l ( $0,5 \text{ dm}^3$ )). Hay que especificar, que este ensayo se realiza inmediatamente después del ensayo de la determinación de la consistencia del mortero fresco, por tanto la amasada de mortero utilizada es la misma. De esta manera, el mortero se caracteriza de manera general y continua. A parte, la norma diferencia dos procedimientos operativos dependiendo si el mortero objeto de estudio es de inyección o es plástico. En este caso, el mortero ensayado es plástico tal y como nos indican los resultados que se obtienen del ensayo de la determinación de la consistencia del mortero fresco (140 y 200 mm de escurrimiento, según la norma). Así pues el procedimiento que se sigue es el siguiente: (a). relleno del vaso cilíndrico hasta la mitad de mortero; (b). aplicación de 10 sacudidas, siguiendo los cuatro puntos cardinales del vaso, para que el mortero se vaya asentando de manera homogénea en el interior del recipiente; (c). relleno de la segunda mitad del vaso cilíndrico de mortero; (d). aplicación de 10 sacudidas más con la misma finalidad de antes; (e). enrasar el material que sobre por los bordes del recipiente con una rasqueta o similar, del medio hacia fuera; (f). pesada del vaso cilíndrico con el mortero y anotación de la masa total para la manipulación posterior de los datos para obtener el resultado<sup>165</sup>; (g). recuperación de la muestra de la amasada de mortero para ensayo posteriores (Figura 124).

---

<sup>165</sup> Hace falta tener en cuenta, que se necesita la masa del vaso cilíndrico vacío para poder realizar los cálculos posteriores de los datos.





Figura 124. Determinación de la densidad aparente del mortero fresco, de izquierda a derecha y de arriba abajo, fotografías del procedimiento operativo del ensayo de la determinación de la densidad aparente del mortero fresco



### *Determinación del contenido en aire en el mortero fresco*

El ensayo de la determinación del contenido en aire en el mortero fresco, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1015-7:1999. El objetivo del ensayo es determinar el contenido en aire que queda capturado dentro del mortero fresco amasado, tanto de la amasada testigo (T) como de las amasadas con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma tragacanto –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). Se efectúan tres determinaciones para cada amasada de mortero ensayada.

Se determina mediante el método A (método de presión) que describe la norma, ya que se realiza algún ensayo previo, para comprobar, que los morteros objetos de estudio, disponen de un valor inferior del 20% de aire atrapado en el interior del mortero. Para llevar a cabo este método se utiliza un aerómetro normalizado (FORM+TEST. Prüfsysteme, Riedlingen). Este aparato tiene una cámara de presión en la que se genera una presión determinada. La abertura de la válvula de descarga permite que la presión entre la cámara presurizada y el recipiente que contiene la muestra de mortero se equilibre, es decir, se llega a presión estable. La lectura que se realiza sobre el manómetro de calibración del aparato es la medida del contenido en aire del mortero en estado fresco, que se corresponde a la caída de presión (Figura 125).



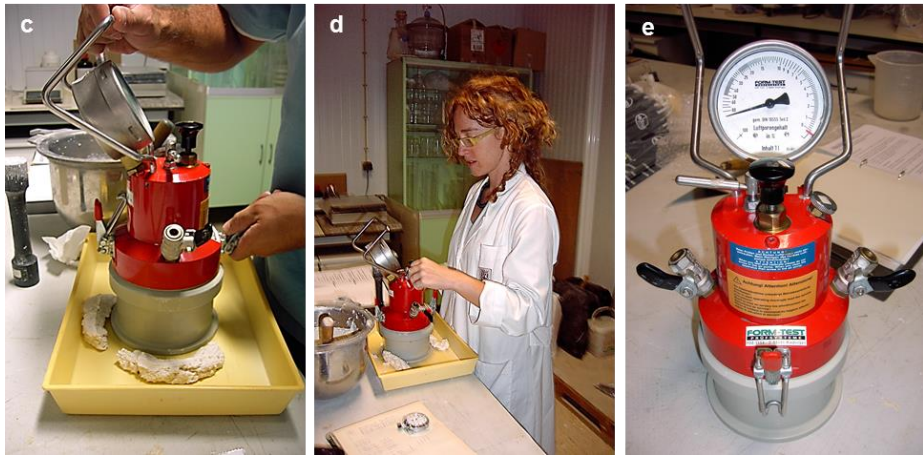


Figura 125. Determinación del contenido en aire del mortero fresco, de izquierda a derecha y de arriba abajo: (a). relleno del recipiente del aparato en 4 bancadas de material, más o menos, iguales. Compactación del material con la aplicación de 10 golpes realizados con el pistón de la mesa de sacudidas; (b). enrasar el material, enretirar el material sobrante y limpiar las bordes del recipiente; (c). se cierra el aparato y la válvula principal de ventilación situada entre la cámara de aire y el recipiente de la muestra; (d). inyección de agua por una de las válvulas hasta que salga por la otra válvula del extremo opuesto. Con esta operación se consigue desplazar el aire contenido en los poros del mortero. Posteriormente, se inyecta aire en la cámara hasta llegar a una presión estable; (e). se cierran todas las válvulas de inyección de agua y se abre la válvula que comunica la cámara de aire con la muestra, mediante un pulsador, durante 20 segundos. Para terminar, se puede leer el contenido de aire en el manómetro de calibración (%)

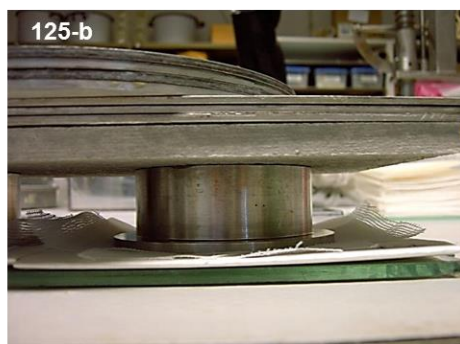
#### *Determinación de la capacidad de retención de agua en el mortero fresco*

El ensayo de la determinación de la capacidad de retención de agua en el mortero fresco, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en la prenorma pr EN 1015-8:1999<sup>166</sup>. El objetivo del ensayo es determinar el contenido de agua retenido por el mortero en estado fresco, tanto de la amasada testigo (T) como de las amasadas con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma tragacanto –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). Se efectúan tres determinaciones para cada amasada de mortero ensayada.

<sup>166</sup> Existe una norma española anterior a la expuesta. Esta norma es la UNE 83-816-93. *Morteros. Métodos de ensayo. Morteros frescos. Determinación de la capacidad de retención de agua.*

Se determina midiendo la cantidad de agua retenida en el mortero, después del tratamiento de succión normalizado (desarrollado a continuación), expresándola por el porcentaje absorbido respecto su contenido original de agua. En nuestro caso, el contenido original de agua no es conocido ya que el conglomerante utilizado en estos morteros ensayados es una cal en pasta, que como ya se ha mencionado, lleva el agua incorporada de fábrica. Por este motivo, antes de todo se determina el contenido original de agua de la cal en pasta con el ensayo<sup>167</sup> que regula la norma UNE 103300:1993<sup>168</sup>, que consiste en calcular la humedad del material a partir de someterlo al secado, mediante ciclos de 12 h en la estufa a 60 °C, hasta llegar a masa constante.

El tratamiento de succión normalizado es el que sigue: (a). pesar los moldes secos, los 8 discos de papel de filtro y las dos piezas de gasa de algodón; (b). rellenar los moldes con 10 bancadas de material, mediante una punta de espátula. Entre cada bancada de material realizar 4 sacudidas siguiendo los puntos cardinales de los moldes; (c). retirar el exceso de material con una rasqueta, del medio hacia fuera; (d). pesar el molde relleno de material; (e). cubrir la superficie del mortero con 2 piezas de gasa de algodón; (f). cubrir las dos piezas de gasa de algodón con 8 discos de papel de filtro; (g). poner una placa no porosa por encima; (h). invertir el molde encima de la placa no porosa (placa de vidrio); (y). cargar el conjunto con 2 kg de peso; (j). al cabo de 5 minutos sacar el peso, los 8 papeles de filtro y las 2 piezas de gasa de algodón; (k). pesar los 8 papeles de filtro (Figura 126).



<sup>167</sup> Este ensayo se realiza en el laboratorio TPS PROSPECCIÓ DEL SUBSÒL SL (SOIL ASSAIG) que es un laboratorio de ensayos para el control de calidad de la edificación, situado en Gornés (Lleida). Gracias a la ayuda desinteresada de los técnicos de laboratorio y de los responsables del laboratorio.

<sup>168</sup> UNE 103300:1993. *Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.*

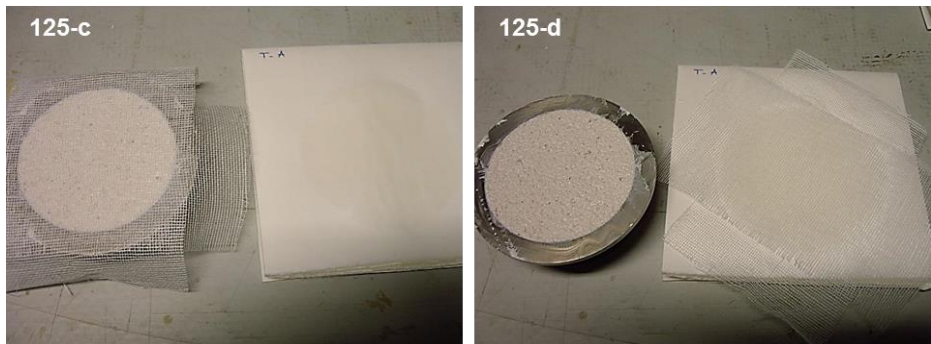


Figura 126. Determinación de la capacidad de retención de agua en el mortero fresco, de izquierda a derecha y de arriba abajo: (125-a). molde normalizado, 2 piezas de gasa de algodón y 8 papeles de filtro; (125-b). inversión de todo el sistema encima de la placa no porosa (placa de vidrio); (125-c). extracción de los 8 papeles de filtro; (125-d). extracción de las 2 piezas de gasa de algodón.

#### *Determinación del período de trabajabilidad del mortero fresco*

El ensayo de la determinación del período de trabajabilidad del mortero fresco, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en la norma UNE EN 1015-9:2000. El objetivo del ensayo es determinar el período de trabajabilidad del mortero en estado fresco, mediante el método A de la norma, tanto de la amasada testigo (T) como de las amasadas con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma alquitira –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (0,5%, 1% y 1,5%). No se determina la incorporación del 2% de aditivo, ya que con las otras proporciones queda bien caracterizada esta propiedad. Se efectúan tres determinaciones para cada amasada de mortero ensayada.

Se determina midiendo el tiempo, en minutos, a partir del cual se llega a un límite definido de resistencia a la penetración ( $0,5\text{N/mm}^2$ ) de una sonda de penetración normalizada<sup>169</sup>. El resultado se obtiene interpolando los datos obtenidos inmediatamente, por encima y por debajo, del valor límite definido.

El procedimiento que se sigue es el siguiente: (a). relleno del vaso cilíndrico normalizado del mortero, en 10 bancadas. Después de cada adición de material, el molde se sacude 4 veces, siguiendo los puntos cardinales del vaso. Para terminar, la superficie del molde se enrasa y se retira el material en

<sup>169</sup> La sonda de penetración normalizada fue cedida por la empresa SECIL ARGAMASSAS, Maceira (Lisboa), para realizar este ensayo.



exceso; (b). el molde se conserva en una habitación climatizada a una temperatura de  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  y a una humedad relativa de  $60\pm 5\%$ ; (c). en el momento de la medida, el molde (vaso cilíndrico) se coloca sobre la balanza, bajo la sonda de penetración, de tal manera que la superficie de la muestra quede situada, como mínimo a 20 mm del borde del molde o del emplazamiento de la penetración anterior; (d). seguidamente, se regula la tara de la balanza y con la ayuda de la palanca de la taladradora, la sonda de penetración se baja despacio hasta que la arandela roce la superficie; (e). el valor indicado por la balanza (g) se anota<sup>170</sup> (Figura 127).

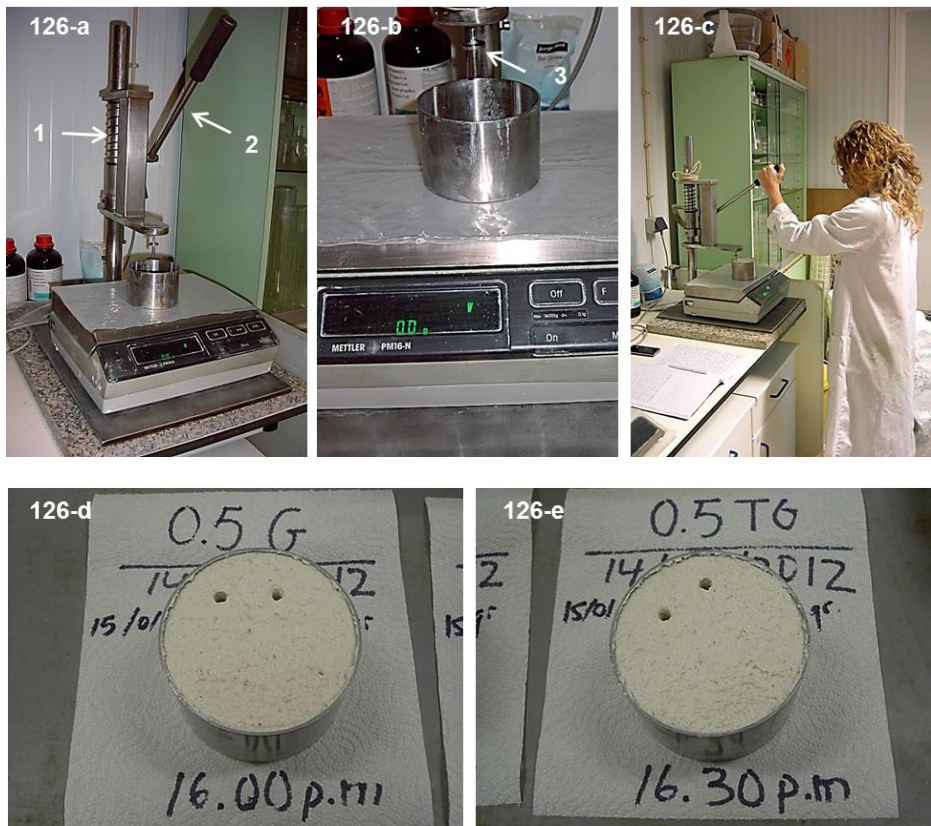


Figura 127. Determinación del período de trabajabilidad del mortero fresco, de izquierda a derecha y de arriba abajo: (126-a). (1). sonda de penetración, (2). palanca de la taladradora; (126-b). balanza, molde (vaso cilíndrico) y (3). arandela; (126-c). momento de la medida de la muestra de mortero ensayado (palanca de la taladradora bajando lentamente); (126-d). muestra de mortero (0.5G) con dos lecturas de resistencia a la penetración; (126-e). muestra de mortero (0.5TG) con dos lecturas de resistencia a la penetración.

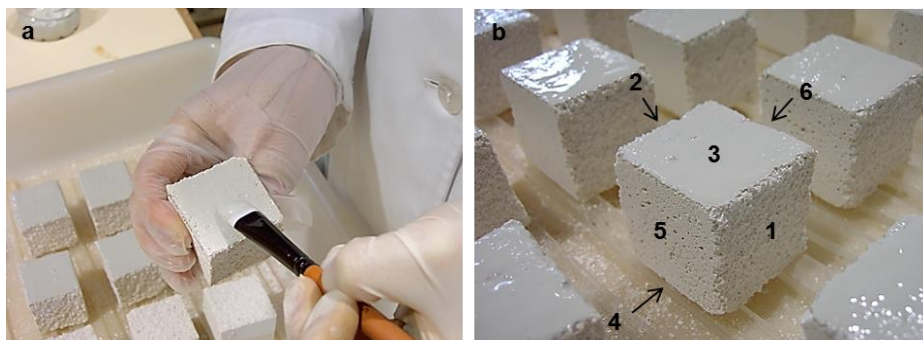
<sup>170</sup> Cabe recordar que, los valores finales se expresan en  $\text{N/mm}^2$ , por tanto se hace la conversión.

#### 2.1.2.2.4. Ensayos para determinar las propiedades del mortero en estado endurecido

##### *Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad*

El ensayo de la determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en las recomendaciones del Test No. II. 6 (RILEM, 1980). El objetivo de este ensayo es observar la capacidad de absorción de agua de los diferentes morteros mediante el mecanismo de succión capilar, tanto de las probetas cúbicas testigo (T) como de las probetas cúbicas con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma tragacanto –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). Este ensayo se lleva a término para 4 probetas cúbicas de cada familia de mortero ensayado, una vez estas están carbonatadas (mínimo 3 meses de conservación).

El ensayo consiste en proporcionar agua a las probetas solamente por una de las 6 caras de la probeta cúbica. Por este motivo, es necesario impermeabilizar con resina (ICOSIT K-101 N, Sika) 4 de las caras de la probeta, para que el ensayo sea efectivo (Figura 128). Se dejan libres sin impermeabilizar las 2 caras del corte fresco, generado en el momento de cortar las probetas prismáticas en probetas cúbicas.



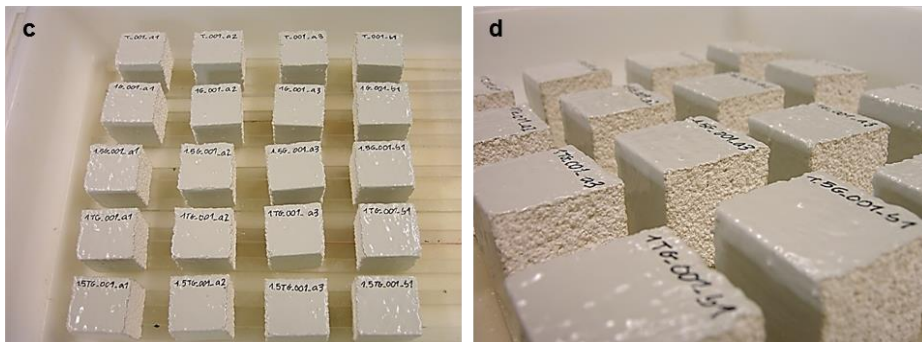


Figura 128. Proceso de impermeabilización de las probetas cúbicas, de izquierda a derecha y de arriba abajo: (a). impermeabilización con resina de una de las caras de una probeta cúbica; (b). proceso de impermeabilización para terminar: cara 1 y 2: caras no impermeabilizadas, de corte fresco; cara 3, 4, 5 y 6: caras impermeabilizadas; (c). y (d). vista general y en detalle de las probetas cúbicas ya impermeabilizadas.

Una vez pretratadas las probetas cúbicas, el procedimiento a seguir para realizar el ensayo es el siguiente: (a). secado de las probetas hasta pesada constante en la estufa a 60 °C y posterior enfriamiento de las probetas, antes de empezar el ensayo; (b). pesada de las probetas secas; (c). medida de las superficies de las caras de las probetas cúbicas que están en contacto con el agua desmineralizada<sup>171</sup>; (d). preparación de un recipiente (en este caso, un petri de laboratorio) con varillas de vidrio, para que las probetas no estén en contacto directo con la superficie del petri; (e). incorporación de una capa de 1 mm de agua desmineralizada dentro del petri; (f). introducción de las 4 probetas cúbicas, de una misma familia, dentro del petri por una de las caras no impermeabilizadas (la cara 1 o la 2). Asegurarse que cuando todas las probetas están colocadas, estas queden sobrepasadas por 1 mm de agua desmineralizada, durante todo el ensayo; (g). pesada de las probetas cúbicas a unos intervalos de tiempo preestablecidos: los 5 primeros minutos, cada minuto; después, de 5 en 5 minutos, durante la primera hora del ensayo. A partir de aquí si el ensayo no ha finalizado se toman pesadas cada hora, hasta que el material no absorba más agua (Figura 129).

Para terminar, hay que depositar las probetas cúbicas del ensayo en un recipiente cerrado con rejilla en el fondo, con 1 mm de agua desmineralizada, durante 24 h, para guardar las probetas hasta el inicio del ensayo Test No. II.5 (determinación de la curva de evaporación). De esta manera, las probetas se

<sup>171</sup> También conocida como agua desionizada. Es una agua a la cual se le han quitado sus iones, tales como los cationes de sodio, calcio, hierro, cobre y aniones como cloruros y bromuros.

mantiene saturadas de agua, condición indispensable para la realización del ensayo Test No. II.5.

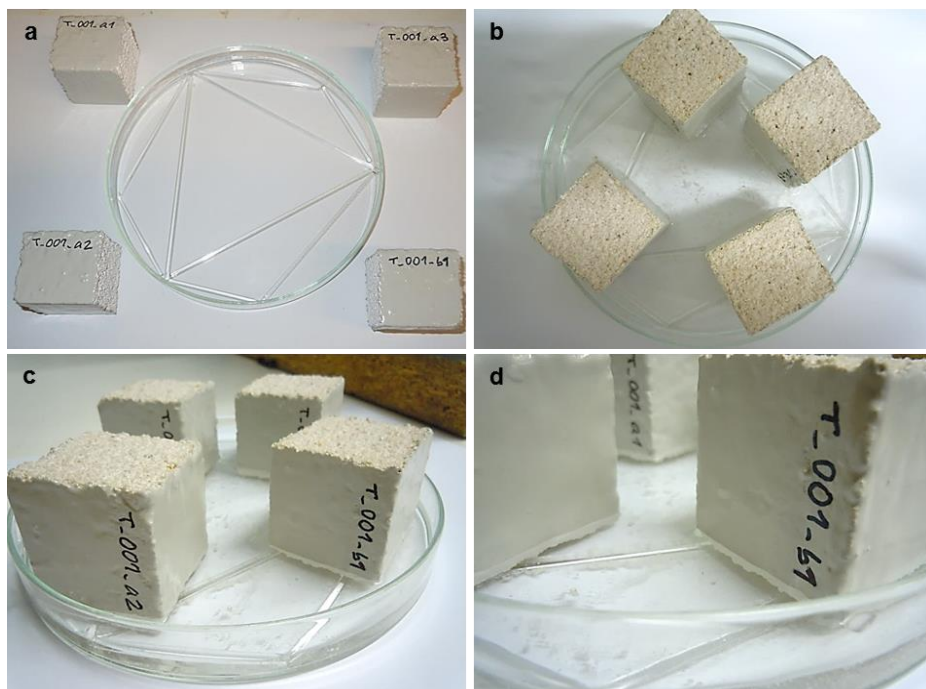


Figura 129. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad, de izquierda a derecha y de arriba abajo: (a). petri con las varillas y la capa de 1 mm de agua desmineralizada; (b). introducción de las 4 probetas cúbicas de la misma familia, dentro del petri, para una de las caras no impermeabilizadas; (c). vista lateral del sistema donde se observa que las probetas cúbicas quedan sobrepasadas por 1 mm de agua desmineralizada; (d). detalle de la imagen (c)

Los resultados obtenidos en este ensayo se representan gráficamente utilizando los incrementos de la masa (kg) de las probetas ensayadas por la unidad de superficie ( $m^2$ ), de la cara de la probeta que está en contacto con el agua desmineralizada, en función de la raíz cuadrada del tiempo ( $\sqrt{t}$ ). La ecuación matemática que expresa la cantidad total de agua absorbida  $W$  ( $kg/m^2$ ) es la siguiente:

$$W = A \cdot \sqrt{t}$$

donde  $A$  es el coeficiente de absorción capilar (WAC) ( $kg/m^2 \cdot s^{-1/2}$ ).



Este valor indica la velocidad de succión en los primeros momentos del ensayo, cuando esta es más rápida. Es un parámetro que nos permite comparar la absorción capilar de las diferentes familias de probetas ensayadas de una manera efectiva.

### *Determinación de la curva de evaporación*

El ensayo de la determinación de la curva de evaporación, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en las recomendaciones del Test No. II. 5 (RILEM, 1980). El objetivo de este ensayo es observar y determinar la capacidad de la pérdida de agua por evaporación, tanto de las probetas cúbicas testigo (T) como de las probetas cúbicas con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma tragacanto –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). Este ensayo se lleva a término con las 4 probetas cúbicas de cada familia de mortero ensayado utilizadas para realizar el ensayo Test No. II.6.

El ensayo se lleva a término siguiendo el siguiente procedimiento: (a). al cabo de 24 h de la finalización del ensayo Test No. II. 6., las probetas cúbicas se sacan del recipiente donde estaban guardadas, para mantenerlas saturadas de agua; (b). pesada de las probetas cúbicas saturadas; (c). tapar (con una película de papel autoadherente transparente<sup>172</sup>) una de las dos caras, de las probetas cúbicas, que se mantienen libres sin impermeabilizar. De esta manera se consigue que el transporte de humedad del interior del material sea un proceso unidireccional; (d). pesada de las probetas cúbicas con la incorporación de la película de papel film (pesada de la probeta saturada + el papel autoadherente transparente). Esta pesada es el peso inicial del ensayo; (e). a partir de este momento, se realizan pesadas continuadas con una temporalidad dada (a los 30 minutos; transcurrida 1 hora; a partir de aquí, cada hora hasta transcurridas 6 h; después, a las 20 h, a las 24 h, a las 44 h, a las 48 h, a las 52 h, a las 68 h, a las 72 h, a las 76 h, a las 96 h, a las 122 h, y así sucesivamente<sup>173</sup>) hasta obtener dos pesadas seguidas constantes. Este hecho, determina la finalización del ensayo. Durante el proceso de secado las probetas se conservan en una habitación climatizada a una temperatura de  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  y a una humedad relativa de  $60\pm 5\%$  y se mantienen sin impedimentos

---

<sup>172</sup> papel *Film* que se puede enganchar a las probetas con cinta adhesiva (*Celo*).

<sup>173</sup> a partir de la sexta hora se establecen 3 pesadas, por día laborable, y el fin de semana, se realiza 1 pesada para no perder la continuidad del ensayo.

de circulación de aire, porque cualquier elemento puede modificar el secado (Figura 130).

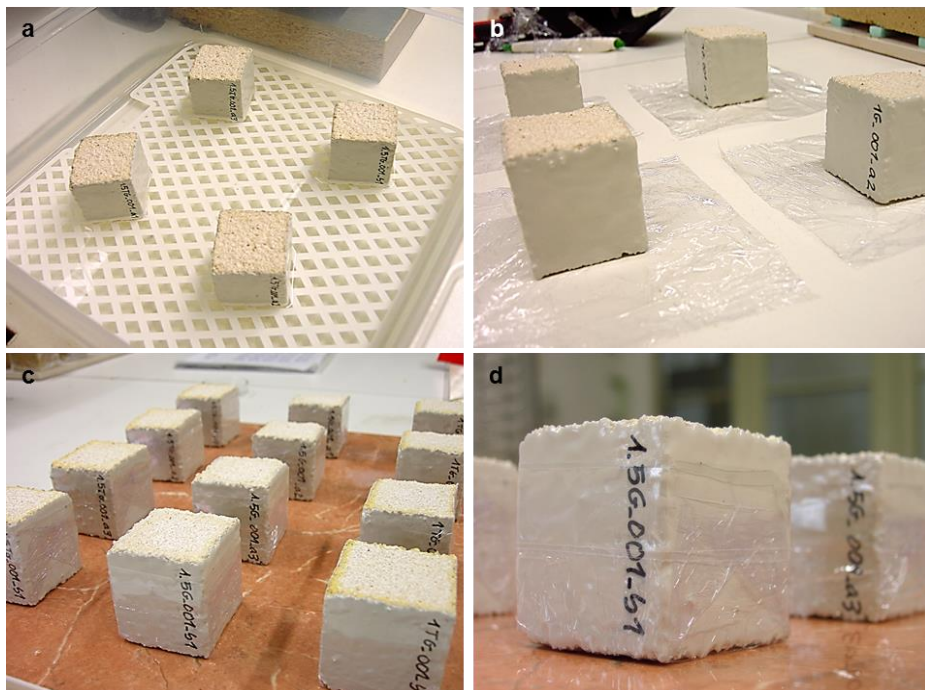


Figura 130. Determinación de la curva de evaporación, de izquierda a derecha y de arriba abajo: (a). recipiente cerrado con rejilla donde se mantienen las probetas cúbicas, durante 24 h, antes del inicio del ensayo; (b). colocación del papel autoadherente transparente para tapar una de las dos caras libres, sin impermeabilizar, de las probetas cúbicas; (c). vista general de las probetas cúbicas ya preparadas para realizar el ensayo; (d). detalle de la imagen (c).

La curva de evaporación obtenida expresa el porcentaje en peso de agua que se mantiene en la probeta medida, a cada intervalo de tiempo, en relación al peso de la probeta saturada (peso inicial del ensayo). Una manera cuantitativa de expresar los resultados de este ensayo es a partir del cálculo del índice de secado (IS) que se obtiene a partir de la norma 29/88 (NORMAL, 1988). Este cálculo se basa en la integración de área de la gráfica donde se representa la curva de evaporación. La ecuación matemática que define el IS es la que sigue:

$$I.S = \frac{\int_{t_0}^{t_i} f(w_i) \times dt}{w_0 \times t_i}$$

donde  $f(w_i)$  representa el contenido de agua de la probeta (%) en función del tiempo,  $w_0$  es el contenido inicial de agua (%) y  $t_i$  es el tiempo total del ensayo.

#### *Determinación del coeficiente de saturación*

El ensayo de la determinación del coeficiente de saturación, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en las recomendaciones del Test No. II. 1 (RILEM, 1980). El objetivo de este ensayo es determinar el contenido máximo de agua que pueden absorber, tanto las probetas cúbicas testigo (T) como las probetas cúbicas con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma tragacanto –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). Este ensayo se lleva a término con 4 probetas cúbicas de cada familia de mortero ensayado sin impermeabilizar, es decir, con todas las caras libres.

El procedimiento seguido en este ensayo es el siguiente: (a). pesada de las probetas cúbicas, no impermeabilizadas, seleccionadas para el ensayo; (b). inmersión, hasta la mitad, de las probetas cúbicas con agua desmineralizada; (c). en el momento que se observa que las probetas cúbicas están saturadas (mojadas por la superficie superior), incorporación de agua desmineralizada hasta cubrir por completo las probetas. Es recomendable que el agua sobrepase 2 cm por encima de la superficie superior de las probetas; (d). dejar las probetas en inmersión durante 48 h; (e). extracción de las probetas y pesada de todas ellas. Antes de pesarlas se debe retirar el exceso de agua. Esta medida corresponde al valor de la masa saturada de la probeta ( $M_{\text{sat(a)}}$ ); (f). introducción de las probetas en la estufa a 60 °C hasta peso constante; (g). conservación de las probetas en un desecador hasta el momento del ensayo siguiente (Figura 131).

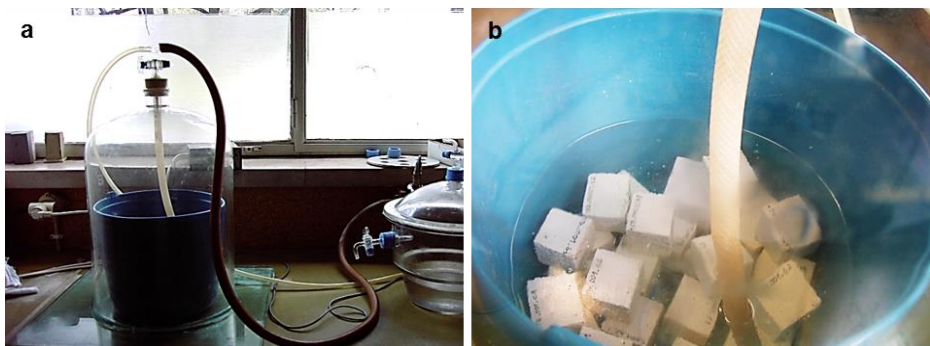


Figura 131. Determinación del coeficiente de saturación, de izquierda a derecha y de arriba abajo: (a). selección de las probetas para el ensayo; (b). inmersión, hasta la mitad, de las probetas cúbicas con agua desmineralizada; (c). detalle de la imagen b; (d). incorporación de agua desmineralizada sobrepasando 2 cm las probetas; (e). introducción de las probetas en la estufa a 60 °C hasta peso constante; (f). conservación de las probetas en un desecador hasta el momento del ensayo siguiente

*Determinación de la porosidad accesible al agua bajo condiciones al vacío y determinación de la densidad aparente y del volumen aparente*

El ensayo de la determinación de la porosidad accesible al agua bajo condiciones al vacío, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en las recomendaciones del Test No. I. 1 (RILEM, 1980). El objetivo de este ensayo es observar y determinar la cantidad de agua que pueden absorber en condiciones al vacío, tanto las probetas cúbicas testigo (T) como las probetas cúbicas con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma tragacanto –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). Este ensayo se lleva a término con las 4 probetas cúbicas de cada familia de mortero ensayado sin impermeabilizar que se han utilizado en el ensayo Test No. II.1.

A continuación, se desarrolla el procedimiento seguido para llevar a cabo el ensayo: (a). se recuperan las probetas cúbicas que están conservadas en el desecador del ensayo Test No. II.1; (b). pesada seca de las probetas ( $M_{sec}$ ); (c). colocación de las probetas en un recipiente conectado a una bomba al vacío, con una presión de 200 mbar, durante 24 h; (d). llenado del recipiente con agua desmineralizada, gota a gota, hasta que las probetas queden totalmente sumergidas; (e). se dejan las probetas sumergidas, en condiciones al vacío, durante 24 h; (f). seguidamente, se desconecta la bomba al vacío porque las probetas pasen a presión atmosférica. Se dejan inmersas a presión atmosférica durante 24 h más; (g). pesada saturada de las probetas ( $M_{sat(buit)}$ ); (h). pesada hidrostática de las probetas ( $M_{hid(buit)}$ ); (y). introducción de las probetas en la estufa a 60 °C hasta peso constante; (j). pesada seca de las probetas (Figura 132).





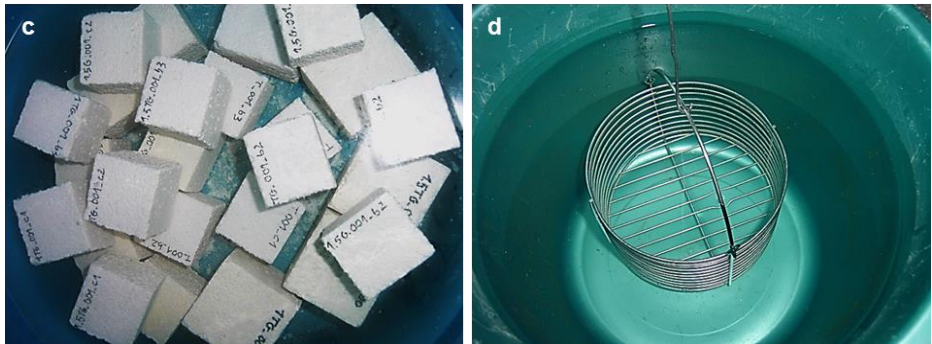


Figura 132. Determinación de la porosidad accesible al agua bajo condiciones al vacío, de izquierda a derecha y de arriba abajo: (a). recipiente conectado a una bomba al vacío; (b). probetas sumergidas en condiciones al vacío; (c). probetas inmersas a presión atmosférica; (d). pesada hidrostática.

A partir de las tres masas obtenidas en el ensayo ( $M_{\text{sec}}$ ,  $M_{\text{sat(buit)}}$  y  $M_{\text{hid(buit)}}$ ) se puede calcular la porosidad accesible al agua bajo condiciones al vacío ( $V_0$ ), tal como muestra la ecuación matemática siguiente:

$$V_0 = [(M_{\text{sat(buit)}} - M_{\text{sec}}) / (M_{\text{sat(buit)}} - M_{\text{hid(buit)}})] \times 100$$

Este valor se expresa en porcentaje (%) y hace referencia al espacio de los agujeros que se encuentran bien comunicados entre sí y que permiten la libre circulación del agua.

A parte, a partir de las tres masas obtenidas en el ensayo también se puede realizar la determinación de la densidad aparente ( $d_{\text{ap}}$ ), expresada en  $\text{kg/m}^3$  y del volumen aparente ( $V_{\text{ap}}$ ), expresado en  $\text{m}^3$  de las probetas ensayadas, teniendo en cuenta la porosidad efectiva de las probetas, es decir, asumiendo que la porosidad atrapada de las probetas no es relevante. Estos valores se determinan a partir de las recomendaciones del Test No. 1.2. Las ecuaciones matemáticas son las siguientes:

$$d_{\text{ap}} = M_{\text{sec}} / (M_{\text{sat(buit)}} - M_{\text{hid(buit)}})$$

$$V_{\text{ap}} = (M_{\text{sat(buit)}} - M_{\text{hid(buit)}}) / d_{\text{ap}}$$

Por otro lado, se puede calcular la porosidad accesible al agua por capilaridad ( $V_1$ ) (Test No. 11.6), también expresada en porcentaje (%), a partir de los valores

de las masas obtenidas en el ensayo (Test No. II.6) ( $M_{\text{sat(aèria)}}$  y  $M_{\text{sec}}$ ), tal como expresa la ecuación matemática siguiente:

$$V_1 = [(M_{\text{sat(aèria)}} - M_{\text{sec}}) / (M_{\text{sat(aèria)}} - M_{\text{hid(aèria)}})] \times 100$$

donde  $M_{\text{hid(aèria)}}$  se obtiene matemáticamente.

Para terminar, si se realiza el cociente entre la porosidad accesible al agua por capilaridad ( $V_1$ ) (Test No. II.6) respecto la porosidad accesible al agua bajo condiciones al vacío ( $V_0$ ) (Test No. I.1) se obtiene el coeficiente de saturación (S), expresado en porcentaje (%) (Test. II.1), tal como se expresa a la ecuación matemática siguiente:

$$S = V_1 / V_0 \times 100$$

Esta ecuación matemática equivale a la siguiente:

$$S = [(M_{\text{sat(aèria)}} - M_{\text{sec}}) / M_{\text{sat (buit)}} - M_{\text{sec}}] \times 100$$

De esta manera, se obtienen los parámetros más esenciales para caracterizar las propiedades hídricas del mortero en estado endurecido.

#### *Determinación de la permeabilidad al vapor de agua*

El ensayo de la determinación de la permeabilidad al vapor de agua, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en las normas UNE EN 1015-19:1999 y la EN ISO 12572:2001. El objetivo del ensayo es determinar el régimen estacionario de transporte unidireccional de vapor de agua que atraviesa los morteros ensayados, tanto de las probetas cilíndricas testigo (T) como de las de las probetas cilíndricas con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma tragacanto –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (1% y 1,5%). No se determina la incorporación del 0,5%, ni del 2% de aditivo, ya que con las otras proporciones queda bien caracterizada esta propiedad. Este ensayo se lleva a término con 3 probetas cilíndricas de cada familia de mortero ensayado.

El procedimiento que se sigue para llevar a cabo el ensayo se presenta a continuación: (a). pesada de las probetas cilíndricas seleccionadas para el ensayo; (b). medida (con un pie de rey) del espesor de las probetas en cuatros

puntos significativos, para obtener un valor real del espesor de las probetas; (c). medida del diámetro de la superficie circular superior de la probeta y del diámetro de la superficie circular inferior de la probeta; (d). dibujar una línea circular interna que delimite la zona de sellado. De esta manera se consigue que la zona por donde sale el vapor de agua siempre sea la misma; (e). introducción de 600 ml de agua desmineralizada dentro del molde normalizado. Esta cantidad de agua es la idónea para conseguir una interfase de aire 1,5 cm de espesor, entre la superficie interior de la probeta y la superficie del agua; (f). encajar la probeta en el recipiente y sellar el conjunto con parafina líquida. Primero se vierte la parafina líquida por los bordes del recipiente hasta taponar el conjunto y después se sella la superficie, con un pincel, sin sobrepasar la línea circular interna dibujada, sobre la probeta, con anterioridad; (g). pesada de la totalidad del conjunto de todas las probetas cilíndricas; (h). introducción de las probetas cilíndricas en la cámara climática (a una temperatura de  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  y a una humedad relativa de  $50\pm 5\%$ ); (y). pesada de la totalidad del conjunto de todas las probetas cilíndricas a intervalos de 24 h durante 30 días (Figura 133).





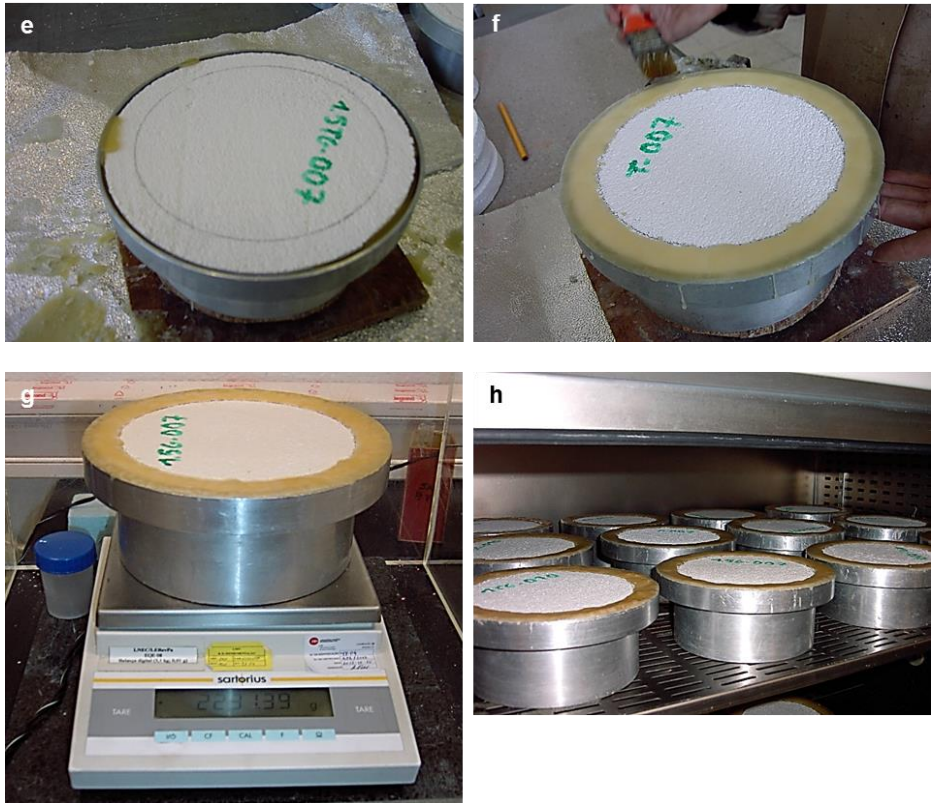


Figura 133. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua, de izquierda a derecha y de arriba abajo: (a). dibujar una línea circular interna que delimite la zona de sellado; (b). vista de todas las probetas cilíndricas a punto para ser encajadas en los moldes correspondientes; (c). introducción de 600 ml de agua desmineralizada dentro del molde normalizado; (d). encaje de las probetas cilíndricas en los moldes; (e). vertido de la parafina líquida por los bordes del recipiente hasta taponar el conjunto; (f). sellado de la superficie, con un pincel, sin sobrepasar la línea circular interna dibujada; (g). pesada de la totalidad del conjunto de la probeta cilíndrica; (h). introducción de las probetas cilíndricas en la cámara climática (a una temperatura de  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  y a una humedad relativa de  $50\pm 5\%$ ).

La gráfica resultante del ensayo evalúa la pérdida de masa de cada conjunto con respecto a cada intervalo de tiempo que se pesa el conjunto, durante el ensayo. A partir de la gráfica se puede determinar la tasa del flujo de vapor de agua ( $G$ ) que pasa a través de las probetas cilíndricas, expresada en g/h.

A parte, se puede calcular la permeabilidad al vapor de agua  $\delta$  ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$ ) a partir de la ecuación matemática siguiente:

$$\bar{\delta} = (G \times d) / (A \times \Delta p_v \times 36 \cdot 10^5)$$

donde  $d$  (m) es el espesor de la probeta cilíndrica;  $A$  ( $m^2$ ) es la media aritmética del área (área de la superficie superior más el área de la superficie inferior entre 2);  $\Delta p_v$  (Pa) es el incremento de la presión de vapor, que en este caso, el valor es  $1446,924^{174}$  Pa.

Para terminar, se puede calcular el espesor de la capa de aire equivalente a la difusión del vapor de agua (*Water vapour diffusion-equivalent air layer thickness*) (m) a partir de la ecuación matemática siguiente:

$$S_d = \bar{\delta}_a \times d / \bar{\delta}$$

donde  $\bar{\delta}_a$  (kg/m.s.Pa) es el coeficiente de difusión de vapor de agua en el aire a presión atmosférica que es  $1,95 \cdot 10^{-10}$ .

#### *Determinación de la resistencia a la flexión y determinación de la resistencia a la compresión*

El ensayo de la determinación de la resistencia a la flexión y a la compresión, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en la norma UNE EN 1015-11:1999. El objetivo del ensayo es determinar la resistencia que muestran los morteros ensayados a la flexión y a la compresión, tanto de las probetas prismáticas testigo (T) como de las probetas prismáticas con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma tragacanto –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). Este ensayo se lleva a término con una cantidad variable de probetas prismáticas de cada familia de mortero ensayado, dependiendo de la disponibilidad, asegurando la reproducibilidad, entre tres y dos probetas de cada familia.

El procedimiento<sup>175</sup> que se sigue es el que se desarrolla a continuación: (a). introducción de las probetas prismáticas seleccionadas en la estufa a 60 °C hasta peso constante; (b). pesada de las probetas prismáticas seleccionadas;

---

<sup>174</sup> Dato elaborado por el laboratorio del Núcleo de *Materiais Pétreos e Cerâmicos do Departameto de Materiais* (NPC/DM) (LNEC).

<sup>175</sup> gracias a la colaboración desinteresada de la técnica de laboratorio M<sup>a</sup> Cruz del *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja* (IETCC) de Madrid.

(c). medida de las dimensiones de las probetas prismáticas seleccionadas; (d). una de las caras de la probeta prismática (que ha estado en contacto con las paredes del molde durante el enmoldado) se coloca sobre los rodillos de apoyo de la máquina de ensayo de resistencia normalizada (AUTOTEST/CIB, Ibertest); (e). aplicación de una carga controlada sobre la probeta prismática para determinar la resistencia a la flexión. La carga se aplica sin aceleraciones bruscas. Según la norma, la ruptura de la probeta se debe producir entre los 30 y los 90 segundos. Aun así, incluso, utilizando la velocidad más baja 10 kN/s, no es posible cumplir con los 30 segundos requeridos por la norma. Este hecho se produce debido a la baja resistencia de los morteros ensayados. Esta cuestión también la especifica Gomes, M. I. *et al.* (2012) en sus análisis experimentales de morteros de tierra con aditivos, los cuales también presentan una resistencia muy baja; (f). la carga máxima aplicada (N) se registra; (g). los semiprismas resultantes de la resistencia a la flexión se colocan en el otro brazo de la máquina específico para este ensayo. Concretamente, se colocan sobre las placas de carga de la máquina, de tal manera que la carga se aplique en toda la anchura de las caras; (h). aplicación de una carga controlada sobre el semiprisma para determinar la resistencia a la compresión. La carga se aplica sin aceleraciones bruscas. En este ensayo tampoco es posible obtener la ruptura del semiprisma en el tiempo requerido por la norma, de 30 a 90 segundos; (y). la carga máxima aplicada (N) se registra; (j). conservación del resto de las probetas en bolsas de plástico herméticas (Figura 136).

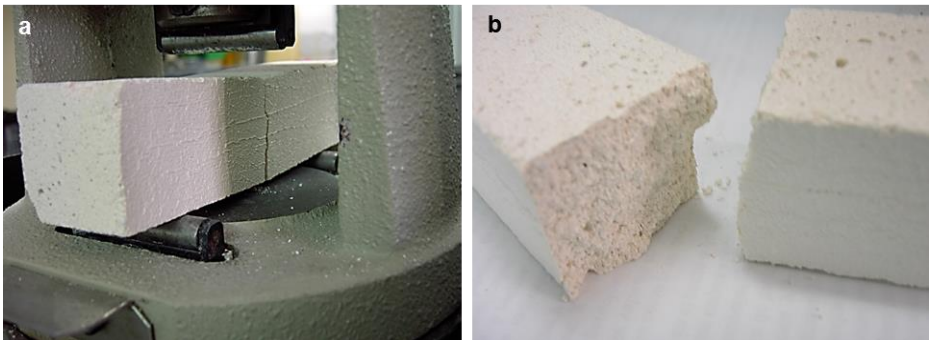




Figura 136. Determinación de la resistencia a la flexión y a la compresión, de izquierda a derecha y de arriba abajo: (a). aplicación de la carga sobre una probeta prismática, para determinar la resistencia a la flexión; (b). aspecto del corte de ruptura de la probeta prismática; (c). aplicación de la carga sobre un semiprisma, para determinar la resistencia a la compresión; (e). vista de la máquina de ensayo de resistencia normalizada (AUTOTEST/CIB, Ibertest) con los dos brazos de carga, de izquierda a derecha de la fotografía, el de flexión y el de compresión, respectivamente; (f). vista general del resultado de una aplicación de la carga sobre un semiprisma, para determinar la resistencia a la compresión.

El cálculo de los resultados de la resistencia a la flexión ( $f$ ), en  $\text{N/mm}^2$ , se calcula mediante la siguiente ecuación matemática:

$$f = 1,5 (Fl / bd^2)$$

donde,  $F$  (N) es la carga máxima aplicada en la probeta;  $l$  es la distancia entre los ejes de los rodillos de apoyo, en mm (100 mm);  $b$  es la anchura de la probeta (mm) y  $d$  es el espesor de la probeta (mm).

El cálculo de los resultados de la resistencia a la compresión ( $\text{N/mm}^2$ ), se calcula dividiendo la carga máxima soportada por la probeta por la sección transversal.

#### *Determinación de la resistencia y de la profundidad a la carbonatación*

El ensayo de la determinación de la resistencia y de la profundidad a la carbonatación, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en las normas UNE-EN 13295:2005 y la UNE-EN 14630:2007. El objetivo del ensayo es determinar la resistencia que muestran los morteros ensayados a la carbonatación y determinar los frentes de carbonatación, tanto de los morteros testigo (T) como de los morteros con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma tragacanto –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). Este ensayo se lleva a término con los restos de las probetas resultantes del ensayo UNE-EN 1015:11 conservadas en bolsas de plástico herméticas, que tienen 180 días, 270 días y 365 días de edad. De esta manera, se puede establecer una evolución de la carbonatación en el tiempo.

Para llevar a cabo el ensayo<sup>176</sup>, según la norma se aplica un reactivo nombrado fenoltaleína<sup>177</sup>, a una cara fresca de las probetas ensayadas, el cual reacciona si la muestra de contacto tiene un  $\text{pH} > 8$ , indicando que la muestra no está carbonatada. En nuestro caso, este test nos mide el grado de carbonatación del hidróxido de calcio o portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) presente en las probetas de mortero ensayadas, ya que la portlandita es un compuesto químico de naturaleza básica ( $\text{pH} = 12$ , más o menos). Por tanto, es fácilmente detectable

---

<sup>176</sup> gracias a la colaboración desinteresada del personal de apoyo a la investigación, Virtudes del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETCC) de Madrid.

<sup>177</sup> La disolución utilizada se compone de: 1 g de fenoltaleína + 30 g de agua desmineralizada + 70 g de etanol.



por el cambio de color a rosa que experimenta la muestra al entrar en contacto con el indicador de la fenolftaleína (Figura 137).

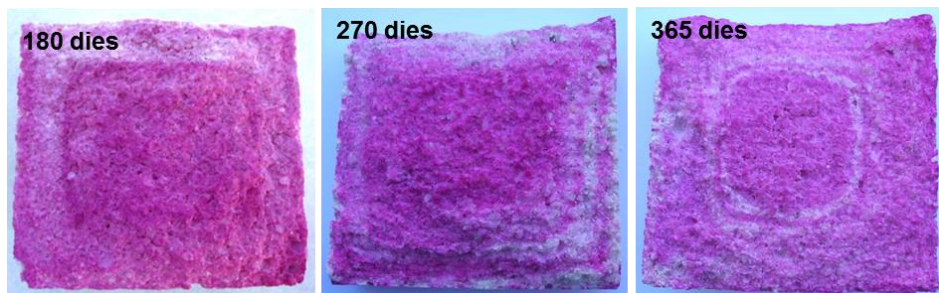


Figura 137. Determinación de la resistencia y de la profundidad a la carbonatación, de izquierda a derecha: 180 días, 270 días y 365 días de edad: aspecto de la evolución en el tiempo, de la carbonatación, a partir del test de la fenolftaleína

En cambio, el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) resultante de la carbonatación es un compuesto neutro que no hace variar el color transparente del indicador (Peroni, S. *et al.*, 1981). De esta manera se puede determinar a qué profundidad ha llegado la carbonatación en una muestra dada en un tiempo determinado.

#### *Determinación de la distribución del tamaño de poro (porosimetría por intrusión de mercurio)*

El ensayo de la determinación de la distribución del tamaño de poro (porosimetría por intrusión de mercurio)<sup>178</sup>, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en las recomendaciones del Test No. I. 5 (RILEM, 1980). El objetivo de este ensayo es determinar la distribución del tamaño de los poros por donde circula el agua, tanto del mortero testigo (T) como de los morteros con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma tragacanto –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (1% y 1,5%). No se determina la incorporación del 0,5%, ni del 2% de aditivo, ya que con las otras proporciones quedan bien caracterizados los cambios, que ejerce el aditivo al mortero, de la distribución

---

<sup>178</sup> gracias a la colaboración desinteresada del técnico de laboratorio el Sr. Nunes del Núcleo de Materiais Pétreos e Cerâmicos do Departameto de Materiais (NPC/DM) (LNEC).

del tamaño de poro. Este ensayo se lleva a término de 2 muestras irregulares de cada familia de morteros ensayados.

Esta técnica se basa en la inyección de mercurio, por efecto de una presión aplicada, dentro de la red porosa de la muestra y permite razonar mejor el comportamiento del mortero frente al agua líquida y a la permeabilidad efectiva. Un dato importante en este sentido es conocer que el agua líquida no puede penetrar por debajo de un radio de acceso de  $0,0075 \mu\text{m}$ , que corresponde a una presión de inyección de mercurio de 200 Mpa. Por tanto, esta técnica mide correctamente el rango de la microporosidad y, en gran parte, de la macroporosidad y nos da la información sobre la distribución del tamaño de los poros por donde circula el agua líquida.

El procedimiento que se sigue para llevar a cabo este ensayo es el siguiente: (a). secado en la estufa a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  de las muestras seleccionadas para el ensayo; (b). enfriamiento de las muestras a temperatura ambiente; (c). colocación de la muestra en el recipiente de portamuestras de vidrio (el penetrómetro) en forma de tubo capilar; (d). a través de este tubo capilar la muestra es sometida a un proceso previo de evacuación, para eliminar los fluidos existentes en sus poros y posteriormente, como respuesta de un aumento escalonado de la presión, el mercurio entra en la muestra a través de este capilar; (e). después de llegar a la presión definida en el ensayo (200 Mpa), empieza una reducción de la misma, que permite al mercurio salir de la red porosa del material. Debido a la morfología de los poros y a otros fenómenos físicos, la curva de extrusión no sigue la misma trayectoria que la curva de intrusión; (f). extracción de la muestra del equipo. Antes de sacar la muestra del equipo, es importante asegurarse que la presión del interior del puerto de alta presión ha vuelto a la presión atmosférica.

La curva de distribución del tamaño de los poros resultante del ensayo de la porosimetría de mercurio, relaciona el máximo volumen de mercurio que penetra como respuesta a la aplicación de la presión del ensayo (cc/g) (volumen total de poro por gramo de muestra), en escalera logarítmica, respecto al radio de los poros ( $\mu\text{m}$ ).

Diferentes autores han realizado clasificaciones tratando de agrupar los tipos de poros según su tamaño. Cada clasificación ofrece unos límites diferentes en función del campo de aplicación: clasificación de poro de *Choquette and Pray* (1970), aplicada a estudios de petrología sedimentaria; clasificación de poro de

la IUPAC según las normas ISO 15901-1:2005 y ISO 15901-2:2006<sup>179</sup>; clasificación de poro de *Russel* (1927), aplicada a materiales pétreos y ornamentales; y, clasificación de poro de *Setzer* (1990), aplicada a los diferentes poros y agujeros existentes a cementos y a hormigones. Aunque, hoy en día el tamaño y la clasificación de los poros continúa siendo un tema de controversia, la clasificación de la IUPAC es actualmente la más aceptada para los estudios técnicos. Por esta razón, en esta investigación se utiliza la clasificación de la IUPAC para determinar la distribución del tamaño de los poros de las diferentes familias de morteros ensayados (Tabla 54).

Tabla 54. Clasificación de los poros de la IUPAC, según las normas ISO 15901-1:2005 y ISO 15901-2:2006

TAMAÑO DE POROS	RADIO (r)	DIÁMETRO (D)
Microporus	$r < 0,001 \mu\text{m}$	$D < 0,002 \mu\text{m}$
Mesoporus	$0,001 \mu\text{m} < r < 0,025 \mu\text{m}$	$0,002 \mu\text{m} < D < 0,050 \mu\text{m}$
Macroporus	$r > 0,025 \mu\text{m}$	$D > 0,050 \mu\text{m}$

### 2.1.2.2.5. Ensayos para determinar la durabilidad del mortero

#### *Determinación de la resistencia al hielo-deshielo*

El ensayo de la determinación de la resistencia al hielo-deshielo, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12371:2002. El objetivo del ensayo es determinar la resistencia que muestran los morteros ensayados a ciclos de congelación al aire y deshielo en agua, tanto de las probetas testigo (T) como de las probetas con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma tragacanto –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). Este ensayo se lleva a término con una cantidad variable de probetas prismáticas de cada familia de mortero ensayado, dependiendo de la disponibilidad, asegurando la reproducibilidad, entre tres y dos probetas de cada familia. Las probetas tienen 365 días de edad.

<sup>179</sup> ISO 15901-1:2005: "Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption - Part 1: Mercury porosimetry"; ISO 15901-2:2006: "Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption - Part 2: "Analysis of mesopores and macropores by gas adsorption".



La totalidad de un ciclo de hielo-deshielo dura 24 h, que se divide en dos períodos: período de hielo al aire, que dura 16 h, a una  $T^a = -15 \pm 2$  °C; período de deshielo sumergido, que dura 8 h, a una  $T^a = 20 \pm 2$  °C. Hay que tener en cuenta, que para el deshielo total de las probetas es necesario esperar 3 h mínimo, desde que se sumergen las probetas en agua desmineralizada. En este momento, es cuando se toman las medidas de control pertinentes. Después de medir sumergir inmediatamente hasta la finalidad del período de deshielo.

El procedimiento que se sigue para llevar a cabo el ensayo es el siguiente: (a). introducción de las probetas prismáticas seleccionadas en la estufa a 60 °C hasta peso constante; (b). pesada de las probetas prismáticas seleccionadas; (c). medida de las dimensiones de las probetas prismáticas seleccionadas; (d). medida del impulso ultrasónico de las probetas prismáticas seleccionadas (se toman 3 medidas para tener un valor representativo); (e). colocación de las probetas prismáticas en un recipiente de plástico hermético con rejilla. Las probetas prismáticas se colocan verticalmente separadas entre ellas unos 15 mm. Es importante mantener la misma distribución durante todo el ensayo; (f). sumergir las probetas prismáticas con agua desmineralizada; (g). dejar las probetas sumergidas durante 120 h, para conseguir su saturación (dos pesadas consecutivas constantes) (Figura 138);





Figura 138. Imágenes que ilustran el procedimiento de sumergir las probetas prismáticas con agua desmineralizada, para saturarlas.

(h). pesada saturada de las probetas prismáticas. Antes de pesarlas retirar el exceso de agua; (y). medida del impulso ultrasónico de las probetas prismáticas saturadas (se toman 3 medidas para tener un valor representativo); (j). colocación de las probetas prismáticas en un recipiente y, posteriormente, introducción del recipiente en un congelador ( $T^a = -15 \pm 2$  °C). En este momento, se inicia el CICLO 1, período de hielo (16 h); (k). cuando hayan pasado las 16 h del período de hielo, extracción de las probetas del recipiente del congelador y, posterior introducción de las probetas en el recipiente que se mantiene con el agua desmineralizada utilizado para la saturación de estas. Este recipiente está situado en un contenedor normalizado preparado por mantener las condiciones prescritas de deshielo ( $T^a = 20 \pm 2$  °C). En este momento, se inicia el período de deshielo del CICLO 1; (l). transcurridas 3 h de deshielo es cuando se toman las medidas de control pertinentes: inspección visual, pesada saturada y medida del impulso ultrasónico. Después de medir sumergir inmediatamente hasta la finalidad del período de deshielo (8 h); (m). extracción de las probetas del recipiente del contenedor de deshielo e introducción de estas en el recipiente del congelador. En este momento, se inicia el CICLO 2, período de hielo (16 h). Y así sucesivamente hasta la finalidad del ensayo. En nuestro caso, se llega hasta el CICLO 15 (Figura 139).



Figura 139. Infraestructura necesaria para llevar a cabo el ensayo de la determinación de la resistencia al hielo-deshielo, de izquierda a derecha y de arriba abajo: (a). y (b). congelador donde se lleva a cabo el período de hielo del ensayo ( $T^a = -15 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ); (c). y (d). contenedor normalizado donde se lleva a cabo el período de deshielo del ensayo ( $T^a = 20 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

A continuación, se pasa a desarrollar las medidas de control que se toman en cada ciclo, de hielo-deshielo, del ensayo para determinar el deterioro de las probetas:

### *Inspección visual*

Se examinan todas las caras y los bordes de las probetas y su comportamiento se valora de acuerdo a la siguiente clasificación que se prescribe para determinar el deterioro de las probetas: 0 → probeta intacta; 1 → daños mínimos (redondeos mínimos de las bordes) que no comprometan la integridad de la probeta; 2 → una o diferentes fisuras pequeñas ( $< 0,1 \text{ mm}$  de anchura) o ruptura de pequeños fragmentos ( $< 10 \text{ mm}^2$ , por fragmento); 3 → una o diferentes fisuras, agujeros o ruptura de fragmentos de mayor tamaño que los

definidos en la escala 2, o alteración del material en vetas; 4 → probeta rota en dos o con grandes grietas; 5 → probeta rota en trozos o desintegrada.

Cuando la inspección visual llega a la clasificación 3 se determina que el material sufre un deterioro significativo.

#### *Cambios de peso de las probetas*

La medida de los cambios de peso de las probetas durante los ciclos de hielo-deshielo del ensayo hace posible calcular el porcentaje de variación de peso respecto del peso inicial de las probetas ensayadas.

La variación en porcentaje (%) del peso de las probetas ( $\Delta M_{\text{sat}}$ ) a  $n$  ciclos se calcula como sigue:

$$\Delta M_{\text{sat}} = [(M_{\text{sat}(i)} - M_{\text{sat}(n)})] / (M_{\text{sat}(i)}) \times 100$$

#### *Medida del impulso ultrasónico*

Con la medida del impulso ultrasónico en cada ciclo se determina la uniformidad del mortero, la presencia de fisuras o agujeros y posibles cambios de las propiedades que pueda experimentar, a medida que van avanzando los ciclos, tal como se desarrolla a continuación.

#### *Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos*

El ensayo de la determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos, de los morteros ensayados se realiza a través del procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12504-4:2006. Este ensayo se agrupa dentro de los ensayos no destructivos. El objetivo del ensayo es determinar la uniformidad del mortero, la presencia de fisuras o agujeros y posibles cambios de las propiedades que pueda experimentar, en el tiempo, los morteros ensayados, tanto las probetas testigo (T) como las probetas con la incorporación de los dos aditivos seleccionados (goma guar –G- y goma tragacanto –TG-), con las proporciones ya especificadas en la tabla 50 (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). Este ensayo se lleva a término con las probetas utilizadas para el ensayo de la norma UNE-EN 12371:2002.

El aparato normalizado que se utiliza para medir los impulsos ultrasónicos (PUNDIT PLUS, CNS Farnell) consiste en un generador de impulsos electrónicos, un par de palpadores o sensores, un amplificador y un temporizador electrónico para la medida del intervalo de tiempo transcurrido entre el comienzo de la onda del impulso, generada en el palpador transmisor y el comienzo de la onda a su llegada, al palpador receptor.

El procedimiento que se sigue para llevar a cabo este ensayo es el siguiente: (a). introducción de las probetas prismáticas seleccionadas en la estufa a 60 °C hasta peso constante; (b). pesada de las probetas prismáticas seleccionadas; (c). medida de las dimensiones de las probetas prismáticas seleccionadas; (d). colocar una película de gel en los palpadores o sensores para que el impulso ultrasónico se transmita mejor por la probeta prismática; (e). colocación de la probeta prismática entre los dos palpadores o sensores. Aguantar bien los palpadores presionando la probeta; (f). activar el aparato para tomar la medida del impulso ultrasónico. Registrar la medida cuando esta se estabiliza. Se toman tres medidas de cada probeta para asegurar que la medida sea fiable. La medida registrada es el tiempo (T) que tarda el impulso en su trayectoria ( $\mu\text{s}$ ); (g). retirar los palpadores de la probeta; (h). limpieza de los palpadores y de la probeta, para retirar el gel conductor (Figura 134).

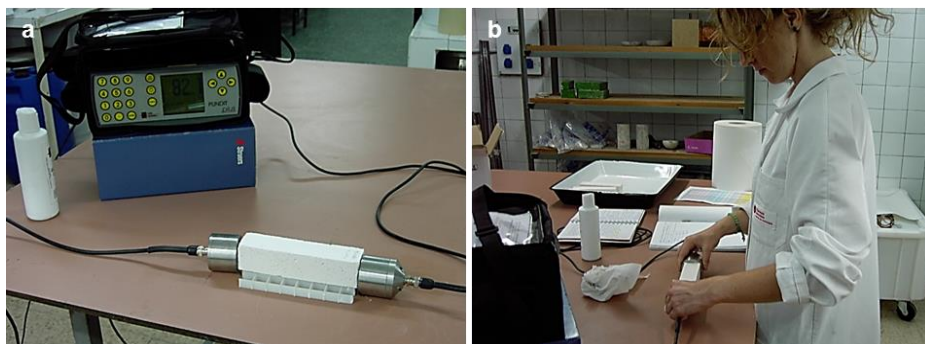


Figura 134. Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos, de izquierda a derecha: (a). aparato de medida de impulsos ultrasónicos y palpadores colocados en la probeta, justo antes de tomar la medida; (b). medida del impulso ultrasónico de una probeta prismática

Según la norma, existen diferentes maneras de tomar las medidas de los impulsos ultrasónicos. En nuestro caso, se realiza una transmisión directa, es decir, la medida se toma situando los palpadores en las dos caras cuadradas opuestas del prisma que conforma la probeta (Figura 135).

En transmisiones directas la velocidad del impulso ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) se calcula mediante la ecuación matemática siguiente:

$$V = L / T$$

donde, L es la longitud de la trayectoria, en mm y T es el tiempo que tarda el impulso en su trayectoria, en  $\mu\text{s}$ .

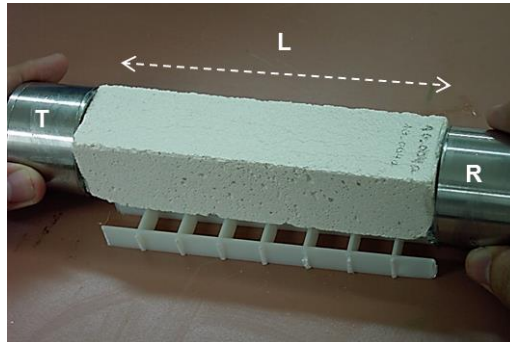


Figura 135. Sistema utilizado para la medida de los impulsos ultrasónicos de las probetas prismáticas seleccionadas. Acrónimos: T: palpador o sensor transmisor; R: palpador o sensor receptor; L: longitud de la trayectoria.

### 2.1.2.3. Instrumentación

Las dos técnicas instrumentales de análisis utilizadas en esta parte para caracterizar la microestructura y estudiar la evolución del proceso de la carbonatación de las familias de morteros ensayadas son la microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX) y la espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR), respectivamente. Estas técnicas ya han estado desarrolladas en la parte 1 de esta investigación.

### 2.1.2.4. Extracción y pretratamiento de las muestras

Para llevar a cabo la caracterización de la microestructura y la caracterización química de la evolución del proceso de la carbonatación a lo largo del tiempo con las técnicas instrumentales de análisis mencionadas en el apartado anterior (2.1.2.3. *Instrumentación*) se lleva a cabo una extracción de muestras de mortero de las probetas ensayadas y un pretratamiento de las mismas.

### *Extracción de muestras para la caracterización de la microestructura del mortero*

Para esta finalidad se utiliza uno de los trozos de las probetas resultantes del ensayo UNE-EN 1015-11:1999 para cada familia de morteros ensayada. Hay que seleccionar uno de los trozos de los semiprismas que mantenga un corte fresco de la cara cuadrada del prisma.

### *Extracción de muestras para la caracterización química de la evolución del proceso de la carbonatación del mortero, a lo largo del tiempo*

Para esta finalidad se utiliza también uno de los trozos de probetas resultantes del ensayo UNE-EN 1015-11:1999 para cada familia de morteros ensayada. Hay que seleccionar otro de los trozos de los semiprismas que mantenga un corte fresco de la cara cuadrada del prisma. En este caso, se decide extraer dos muestras de cada corte fresco, de cada mortero ensayado: una de exterior (1) y una de interior (3), de unos 10 g por cabeza, tal como se muestra en la figura 140. Ya que a partir de la determinación de la resistencia y de la profundidad a la carbonatación mediante el test de la fenolftaleína (normas UNE-EN 13295:2005 y UNE-EN 14630:2007), mayoritariamente, se observan dos zonas claramente diferenciadas por los frentes de carbonatación.

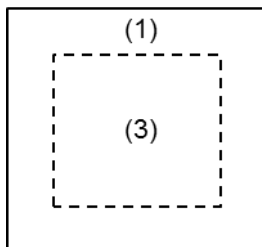


Figura 140. Localización de la extracción de muestras para el estudio de la evolución del proceso de la carbonatación del mortero. Acrónimos: (1): muestra exterior; (3): muestra interior.

### *Pretratamiento de las muestras del mortero*

El procedimiento que se utiliza para el pretratamiento de las muestras de mortero ha demostrado ser un buen método para frenar el proceso de carbonatación de los morteros ensayados. Este procedimiento se basa en la congelación de las muestras mediante la combinación de etanol más acetona

(Zhang, J. *et al.*, 2011). De esta manera se pueden reservar diferentes muestras de morteros, de edades diferentes (180 días, 270 días y 365 días de edad), para el estudio posterior de la evolución del proceso de la carbonatación de los morteros ensayados y para la caracterización de la microestructura de estos.

El procedimiento que sigue para el pretratamiento de las muestras de mortero se muestra en la tabla 55 y se ilustra en la figura 141.

Tabla 55. Etapas de pretratamiento de las muestras de mortero (Zhang, J. *et al.*, 2011).

<b>Etapa</b>	<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>
1	Congelación de la muestra con etanol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Introducción de la muestra en la bomba de vacío con filtro.</li> <li>- Adición de etanol absoluto hasta cubrir la muestra, durante 2 min.</li> <li>- Encender la bomba de vacío hasta filtrar el etanol por el filtro. Mover un poco el material para ayudar a que se filtre correctamente.</li> <li>- Parar la bomba.</li> </ul>
2	Congelación de la muestra con acetona	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adición de acetona hasta cubrir otra vez la muestra, durante 2 min.</li> <li>- Encender la bomba de vacío hasta filtrar la acetona por el filtro. Mover un poco el material para ayudar a que se filtre correctamente.</li> <li>- Parar la bomba.</li> </ul>
3	Secado de la muestra	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desmontar la bomba de vacío y extracción del material con el filtro.</li> <li>- Secado del material juntamente con el filtro a T<sup>a</sup> ambiente.</li> </ul>
4 <sup>180</sup>	Tamizado de la muestra	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tamizar la muestra obtenida con el tamiz de malla &lt; 63 micras, para descartar el árido del mortero de la muestra.</li> <li>- Recuperación y almacenamiento de la muestra en un recipiente de vidrio (no susceptible a ser atacado por los vapores de acetona que pueda desprender la muestra).</li> </ul>

<sup>180</sup> La etapa 4 del procedimiento solo se tiene que realizar, en el caso de las muestras extraídas, para el estudio de la evolución del proceso de la carbonatación del mortero.



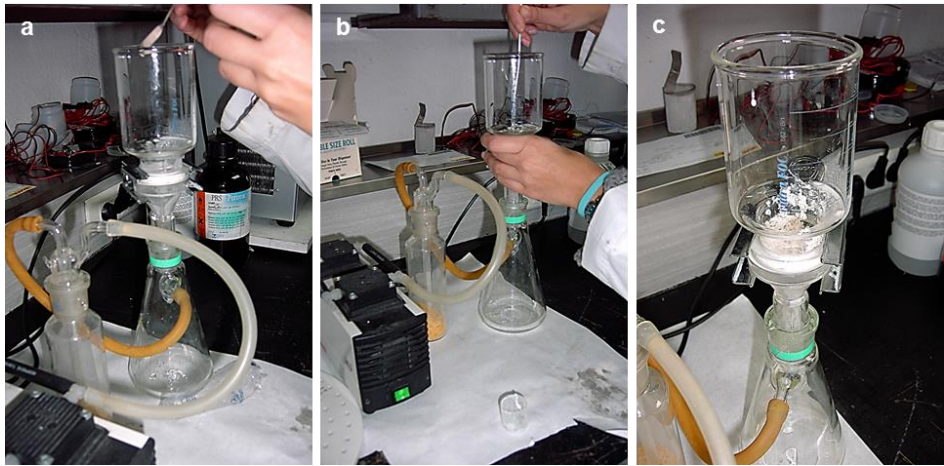


Figura 141. Procedimiento de congelación de las muestras de morteros para estudios posteriores, de izquierda a derecha: (a). introducción de la muestra en la bomba de vacío con filtro; (b). movimiento del material para ayudarlo a que se filtre correctamente mientras la bomba de vacío se mantiene encendida para filtrar el etanol o la acetona; (c). material resultante una vez se ha filtrado el etanol o la acetona

## 2.1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.1.3.1. Caracterización de las propiedades reológicas del mortero en estado fresco

#### 2.1.3.1.1. Determinación de la consistencia, de la densidad aparente, del contenido en aire, de la capacidad de retención de agua y del período de trabajabilidad

Para estudiar y caracterizar las propiedades reológicas del mortero (en estado fresco) se lleva a término la determinación de la consistencia del mortero, de la densidad aparente, del contenido en aire, de la capacidad de retención de agua y del período de trabajabilidad del mortero. Con el conjunto de los resultados de estos ensayos se puede evaluar de una manera óptima el comportamiento del mortero en estado fresco y si la adición de las gomas varía su comportamiento. A continuación, en la tabla 56 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos para caracterizar las propiedades reológicas de las diferentes familias de morteros ensayadas (T, 0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG y 2TG).

Tabla 56. Resultados de las propiedades reológicas del mortero en estado fresco, de las diferentes familias de morteros ensayadas (T, 0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG i 2TG)

	<b>Escurrecimiento (mm)</b>	<b>Densidad aparente (g/l)</b>	<b>Contenido aire (%)</b>	<b>Capacidad retención agua (%)</b>	<b>Período de trabajabilidad (min)</b>
<b>T</b>	156,7	1894	4,6	80,10	5760
<b>0.5G</b>	150,5	1893	5,0	89,30	6480
<b>1G</b>	149,2	1886	5,5	86,09	5776
<b>1.5G</b>	143,8	1880	5,4	88,72	3966
<b>2G</b>	140,5	1872	5,4	88,19	-
<b>0.5TG</b>	142,5	1838	7,3	94,68	5970
<b>1TG</b>	131,0	1845	7,0	91,51	5437
<b>1.5TG</b>	120,0	1843	6,5	88,70	3046
<b>2TG</b>	110,5	1833	5,9	94,29	-

Seguidamente, se desarrollan para cada ensayo realizado los resultados obtenidos, para caracterizar las propiedades reológicas de las diferentes familias de morteros ensayadas:

### Determinación de la consistencia del mortero

Antes que nada, hay que tener en cuenta que este ensayo para determinar la consistencia se realiza sin adicionar agua en ningún momento, ya que el que se quiere evaluar es como influye el aditivo a diferentes proporciones sin modificar el agua que lleva incorporada de fábrica la cal en pasta.

Dicho esto, hay que especificar que la norma UNE-EN 1015-3:2000 establece que “para que un mortero sea plástico” debe tener un escurrimiento entre 140 y 200 mm mediante la mesa de sacudidas. Como se puede observar en la figura 142 el mortero testigo (T), presenta un escurrimiento que está dentro de los márgenes establecidos por la norma (156,7 mm de escurrimiento). Por tanto, como es de esperar el mortero de cal en pasta es un mortero con una plasticidad óptima. Por lo que respecta, a la adición de las gomas (G y TG) en el mortero, estas se comportan diferente una con respecto a la otra y también a diferentes proporciones (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). El mortero con la adición de goma guar (G) decrece su escurrimiento a medida que se aumenta la proporción adicionada de goma. Aunque, se mantiene dentro de los márgenes establecidos por la norma de mortero plástico. En cambio, el mortero con la adición de goma tragacanto (TG) también decrece sustancialmente su escurrimiento a medida que aumenta la proporción adicionada de goma, pero a partir del 1% de goma tragacanto (TG), los valores obtenidos de escurrimiento están fuera del que se considera, según la norma, un mortero plástico. Por tanto, se puede determinar que sin adición de agua para modificar el escurrimiento del mortero, las gomas testadas (G y TG), como aditivos de morteros de cal en pasta, se comportan como espesantes del mortero.

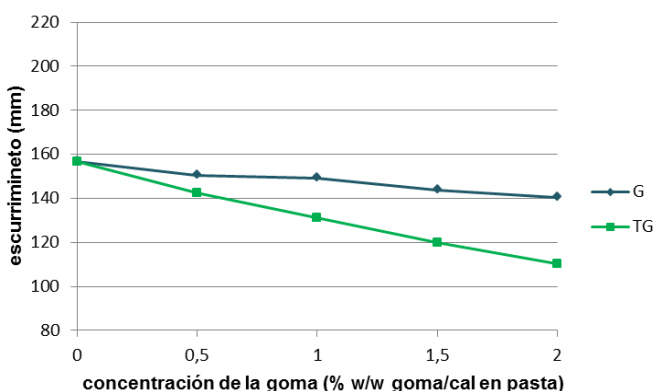


Figura 142. Resultados de la determinación de la consistencia de los morteros ensayados con la adición de goma guar (G) y de goma tragacanto (TG) a diferentes proporciones (0,5%, 1%, 1,5%, 2%) y del mortero testigo (0%)

### Determinación de la densidad aparente

La figura 143 presenta los resultados obtenidos de la determinación de la densidad aparente de las diferentes familias de morteros ensayadas, a diferentes proporciones (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). Como se puede observar, la adición de las gomas (G y TG) modifica sustancialmente la densidad aparente del mortero en estado fresco respecto de la densidad aparente del mortero testigo (T). Aunque, la adición de goma guar (G) respecto la adición de goma tragacanto (TG) influyen de manera diferente la densidad aparente del mortero en estado fresco. Por un lado, los morteros con la adición de goma guar (G) decrecen progresivamente su densidad aparente a medida que aumenta la proporción de la goma (a partir del 0,5%). Como se puede comprobar la adición del 0,5% de goma guar (G) en el mortero mantiene la densidad aparente respecto la densidad aparente del mortero testigo (T). Por otro lado, los valores de la densidad aparente obtenidos de los morteros con la adición de goma tragacanto (TG) presentan dos puntos de inflexión: un primer punto de inflexión en la proporción del 0,5% de goma, en el que el valor de la densidad aparente decrece significativamente respecto el valor de la densidad aparente del mortero testigo (T). Seguidamente, el mortero con la adición del 1% de goma experimenta una ligera recuperación de la densidad aparente; un segundo punto de inflexión en la proporción del 1,5% de goma, en el que el valor de la densidad aparente vuelve a decrecer hasta la proporción del 2% de goma. De la síntesis de los resultados obtenidos a partir de la determinación de la densidad aparente de los morteros ensayados, se puede determinar que las dos gomas (G y TG) reducen la densidad aparente del mortero, destacando que la goma tragacanto es la que reduce de manera más significativa la densidad aparente del mortero respecto el mortero testigo (T).

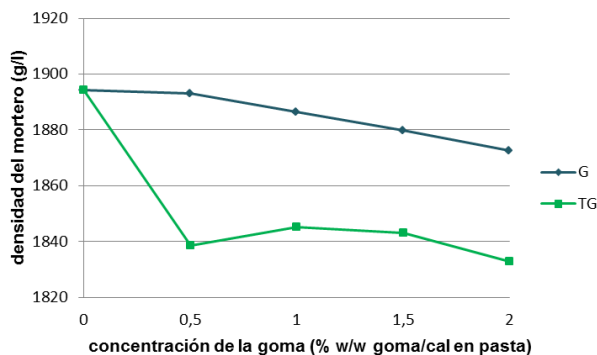


Figura 143. Resultados de la determinación de la densidad aparente de los morteros ensayados con la adición de goma guar (G) y de goma tragacanto (TG) a diferentes proporciones (0,5%, 1%, 1,5%, 2%) y del mortero testigo (0%)

### Determinación del contenido de aire

De los resultados obtenidos de la determinación del contenido de aire, antes que nada, se determina que el mortero testigo (T) está dentro del valor marcado por la norma UNE-EN 480-13:2010 como óptimo de contenido de aire, ya que esta especifica que el contenido de aire del mortero de referencia sin aditivo no debe exceder del 5% en volumen y el valor obtenido de contenido de aire del mortero testigo ensayado es 4,6% (Figura 144). Al observar los valores obtenidos de la determinación del contenido de aire de los morteros con la adición de goma guar (G) se determina que la adición de la goma incorpora aire, en términos generales, a la estructura del mortero. Específicamente, la adición del 0,5% de goma guar (G) incorpora sutilmente aire respecto el valor del mortero testigo (T). Aun así, las otras proporciones ensayadas de goma guar (G) (1%, 1,5% y 2%) incorporan casi bien un 1% más de aire en volumen que el valor del mortero testigo (T). En cambio, los valores obtenidos de la determinación del contenido de aire de los morteros con la adición de goma tragacanto (TG) muestran un gran aumento del volumen de aire dentro de la estructura del mortero. Concretamente, la adición del 0,5% de goma tragacanto (TG) en el mortero es el valor que despunta más respecto los otros valores obtenidos con las otras proporciones (1%, 1,5% y 2%), los cuales decrecen progresivamente, pero siempre manteniéndose por encima del valor de contenido de aire del mortero testigo (T) y de los valores de contenido de aire de los morteros con la adición de goma guar (G). Por tanto, se puede determinar que las gomas testadas (G y TG), como aditivos de morteros de cal en pasta, se comportan como aireadores del mortero, siendo la goma tragacanto (TG) la goma que incorpora mucho más aire.

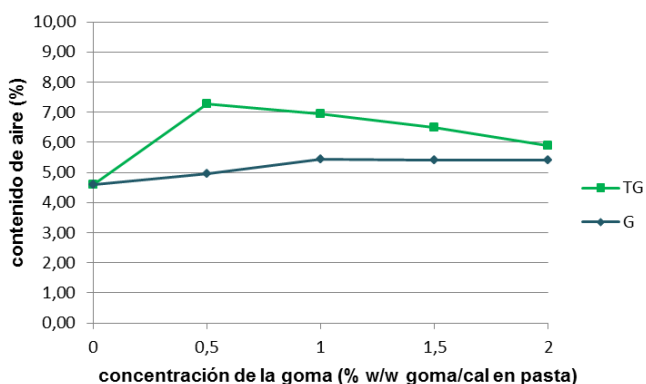


Figura 144. Resultados de la determinación del contenido de aire de los morteros ensayados con la adición de goma guar (G) y de goma tragacanto (TG) a diferentes proporciones (0,5%, 1%, 1,5%, 2%) y del mortero testigo (0%)

### *Determinación de la capacidad de retención de agua*

La figura 145 presenta los resultados obtenidos de la determinación de la capacidad de retención de agua del mortero en estado fresco. A nivel general, se puede observar que la adición de las gomas (G y TG) aumenta la capacidad de retención de agua del mortero. Si se comparan los resultados obtenidos de los morteros con la adición de goma guar (G) respecto los resultados obtenidos de los morteros con la adición de goma tragacanto (TG) se determina que la goma tragacanto (TG) aumenta más la capacidad de retención de agua. Específicamente, en términos generales, los morteros con la adición de goma guar (G) aumentan entre un 6% y un 9% la capacidad del mortero de retener agua y los morteros con la adición de goma tragacanto (TG) aumentan entre un 11% y un 15% la capacidad del mortero de retener agua. Hay que añadir, que la proporción que aumenta más la capacidad de retención de agua de la goma guar (G) es la del 0,5%, siendo muy similares los valores obtenidos de las otras proporciones (1%, 1,5% y 2%). Así mismo, las proporciones que aumentan más la capacidad de retención de agua de la goma tragacanto (TG) son las del 0,5% y la del 2%.

Por tanto, se puede determinar que las gomas testadas (G y TG) como aditivos de morteros de cal en pasta se comportan como retenedores de agua del mortero, siendo la goma tragacanto (TG) la goma que retiene más agua.

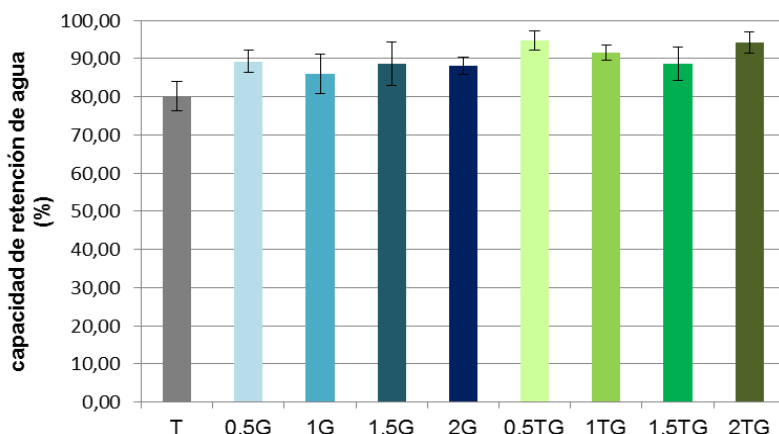


Figura 145. Resultados de la determinación de la capacidad de retención de agua de los morteros ensayados con la adición de goma guar (G) y de goma tragacanto (TG) a diferentes proporciones (0,5%, 1%, 1,5%, 2%) y del mortero testigo (0%)

### Determinación del período de trabajabilidad

De los resultados obtenidos de la determinación del período de trabajabilidad, en primer lugar, se determina que aumenta el período de trabajabilidad a medida que disminuye la proporción de las gomas (G y TG). A nivel general, los morteros con la adición tanto de la goma guar (G) como de la goma tragacanto (TG) en la proporción del 0,5% aumentan el período de trabajabilidad respecto del mortero testigo (T). En la adición del 1% de las gomas (G y TG) se ve una diferencia entre los morteros con la adición de las gomas respecto el mortero testigo (T): los morteros con la adición del 1% de goma guar (G) mantienen el período de trabajabilidad respecto el mortero testigo (T), mientras que los morteros con la adición del 1% de goma tragacanto (TG) disminuyen el período de trabajabilidad respecto el mortero testigo (T). A partir, de la adición del 1,5%, tanto de la goma guar (G) como de la goma tragacanto (TG), el período de trabajabilidad decrece de manera significativa respecto los otros valores obtenidos de los morteros con la adición de goma guar (G) y de goma tragacanto (TG) y respecto de los valores obtenidos del mortero testigo (T). Para terminar, si se comparan los valores obtenidos del período de trabajabilidad de los morteros con la adición de goma guar (G) respecto los valores obtenidos de los morteros con la adición de goma tragacanto (TG) se determina que la goma guar (G) aumenta más el período de trabajabilidad, despuntando el valor obtenido del mortero con la adición del 0,5% de goma guar (G), tal y como se puede apreciar en la figura 146.

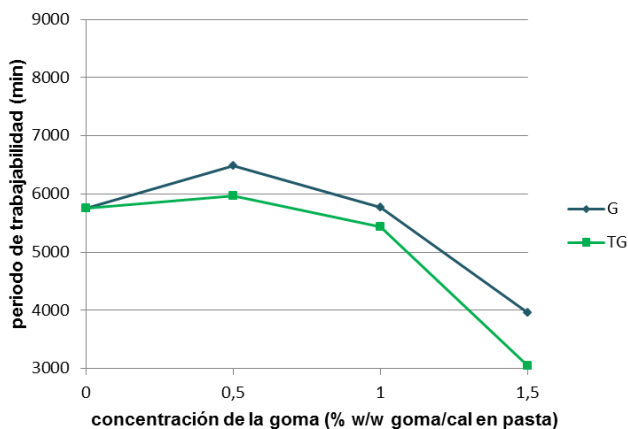


Figura 146. Resultados de la determinación del período de trabajabilidad de los morteros ensayados con la adición de goma guar (G) y de goma tragacanto (TG) a diferentes proporciones (0,5%, 1%, 1,5%) y del mortero testigo (0%)

De la síntesis de los resultados de los ensayos de la caracterización de las propiedades reológicas del mortero en estado fresco se determina, en términos generales, que las dos gomas testadas, tanto la goma guar (G) como la goma tragacanto (TG), modifican todas las propiedades reológicas ensayadas: la consistencia, la densidad aparente, el contenido de aire, la capacidad de retención de agua y el período de trabajabilidad. Su comportamiento está condicionado a la naturaleza química del polisacárido y al porcentaje de goma que ha sido adicionado en el mortero (0,5%, 1%, 1,5% y 2%), tal como sigue a continuación:

- Antes que nada, la adición de las gomas (G y TG) en el mortero de cal en pasta, sin modificación del agua de amasado, disminuye la consistencia del mortero. Este efecto se traduce en que estas gomas actúan como espesantes del mortero, siendo la goma tragacanto (TG) la que tiene un comportamiento más espesante en todas las proporciones ensayadas. Por tanto, en todos los casos ensayados, se requeriría una incorporación de agua adicional si se quisiera conseguir la misma consistencia que la del mortero testigo (T).

- En segundo término, la adición de las gomas (G y TG) en el mortero de cal en pasta, reduce la densidad aparente del mortero. En este sentido, la adición en general de goma tragacanto (TG) reduce de manera más sustancial la densidad aparente del mortero, sobre todo en la proporción del 0,5% de la goma, en contraposición de la adición del 0,5% de goma guar (G), la cual mantiene bastante la densidad aparente respecto del mortero testigo (T).

- Estos resultados obtenidos de la determinación de la densidad aparente del mortero se pueden correlacionar con los resultados obtenidos de la determinación del contenido de aire del mortero, ya que la incorporación de aire a la estructura del mortero se traduce en una disminución de la densidad aparente. Así pues, la adición de goma tragacanto (TG) en el mortero aumenta más el contenido de aire que la goma guar (G), destacándose la proporción del 0,5% de goma tragacanto (TG). En cambio, donde se ve una incorporación de aire más considerable con la adición de goma guar (G) en el mortero, es en las proporciones del 1%, del 1,5% y del 2%. En este sentido, existen otros estudios al respecto que determinan que los polímeros orgánicos naturales tienen propiedades tensoactivas inherentes que hacen que disminuya la tensión superficial de la fase acuosa de la pasta del mortero, dando lugar a la entrada de burbujas de aire a la estructura del mortero (Izaguirre, A.A. *et al.*, 2011b; Rixom, R. *et al.*, 1999; Seabra, P. *et al.*, 2009). Así pues, debido a la forma esférica de las burbujas de aire, estas actúan como lubricante del mortero en estado fresco, mejorando la docilidad de este (Rodríguez-Mora, O., 2003).



- Además, la adición de las gomas (G y TG) en el mortero de cal en pasta, aumenta la capacidad de retención de agua del mortero. En ambos casos, las proporciones que retienen más cantidad de agua son el 0,5% y el 2% de goma (G y TG) respectivamente. En esta propiedad reológica, es la adición de goma tragacanto (TG) la que retiene más cantidad de agua, por encima de la adición de la goma guar (G), entre un 11-15% frente a un 6-9%.

- Para terminar, la adición de las gomas (G y TG) en el mortero de cal en pasta, aumenta el período de trabajabilidad, a proporciones relativamente pequeñas de la goma, respecto del período de trabajabilidad del mortero testigo (T). En este sentido, con la adición de goma guar (G) al 0,5% y al 1% aumenta el período de trabajabilidad; en cambio, el mortero con la adición de goma tragacanto (TG) solo aumenta el período de trabajabilidad con la adición del 0,5% de goma. A proporciones más altas de las indicadas, en ambos casos, los morteros ensayados con la adición de las gomas (G y TG) disminuyen su período de trabajabilidad sustancialmente.

### **2.1.3.2. Caracterización del mortero en estado endurecido**

#### **2.1.3.2.1. Comportamiento petrofísico**

Para estudiar y caracterizar el comportamiento petrofísico del mortero (en estado endurecido) se lleva a término la determinación del coeficiente de agua por capilaridad, de la curva de evaporación, la porosidad accesible al agua bajo condiciones al vacío, de la porosidad accesible al agua por capilaridad, del coeficiente de saturación, de la densidad aparente y de la permeabilidad al vapor de agua. Con el conjunto de los resultados de estos ensayos se puede evaluar de una manera óptima el comportamiento petrofísico del mortero en estado endurecido y si la adición de las gomas varía su comportamiento

##### **2.1.3.2.1.1. Determinación del coeficiente de agua per capilaridad**

El objetivo de este ensayo es observar la capacidad de absorción de agua de las diferentes familias de morteros ensayadas (T, 0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG y 2TG) mediante el mecanismo de succión capilar.

El tipo de curvas obtenidas de los morteros ensayados se componen de dos segmentos rectos. Estas curvas son típicas de los materiales que poseen poro de dimensiones homogéneas y bien comunicados (Brito, V., 2009). Por un lado, el primer segmento de la recta corresponde al relleno de la mayoría de los

poros pequeños que son los que más tensión o succión capilar<sup>181</sup> ejercen y nos sirve por calcular el coeficiente de absorción capilar (WAC) ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-1/2}$ ) a partir de la pendiente de la recta. Este valor indica la velocidad de succión en los primeros momentos del ensayo, cuando esta es más rápida y nos permite comparar la absorción de los diferentes morteros ensayados. Por otro lado, el segundo segmento de la recta corresponde al relleno adicional del resto de los poros restantes por difusión (Brito, V., 2009). Según desarrolla Díaz Gonçalves, T. (2007) en su tesis doctoral, el punto de inflexión entre los dos segmentos de la recta nos determina el momento en que la franja capilar llega a la superficie de la probeta del mortero ensayado (Figura 147 y 148).

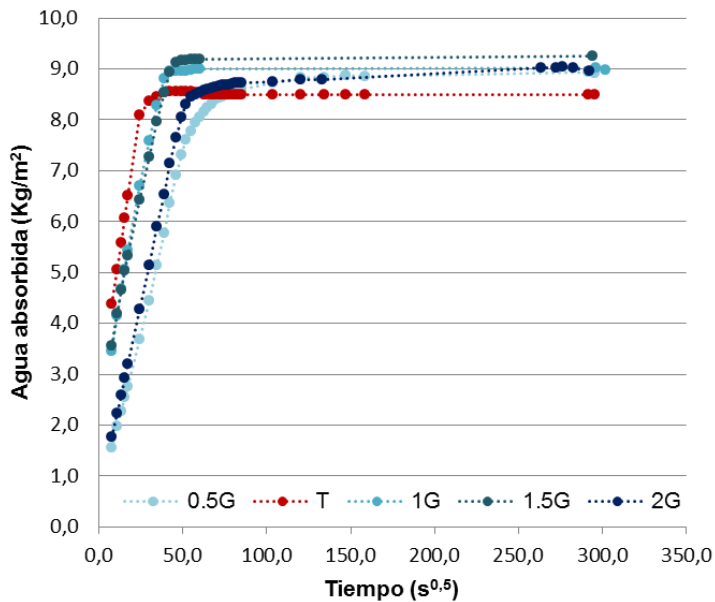


Figura 147. Curvas de absorción de los morteros ensayados con la adición de goma guar (G) a diferentes proporciones (0.5G, 1G, 1.5G, 2G) y del mortero testigo (T)

<sup>181</sup> La tensión o succión capilar es una fuerza ascensional inversamente proporcional al radio del capilar que se basa en la Ley de *Jurin-Laplace*, según la ecuación matemática siguiente:  $h = \frac{2 \cdot \gamma}{r \cdot g \cdot p \cdot \cos\theta}$ , donde h: altura de ascensión de un líquido en un capilar;  $\gamma$ : tensión superficial del líquido; r: radio del capilar, es decir, del poro; g: constante gravitatoria; p: densidad del líquido que asciende;  $\cos\theta$ : coseno del ángulo del menisco del líquido en el capilar (poro).

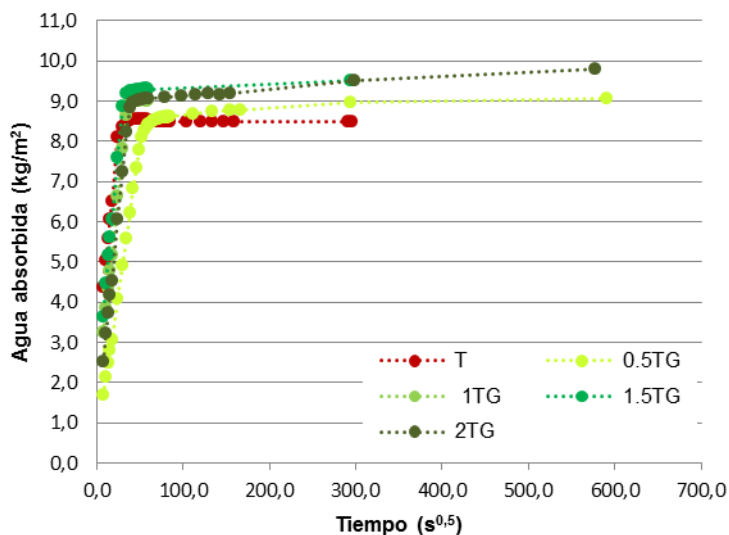


Figura 148. Curvas de absorción de los morteros ensayados con la adición de goma tragacanto (TG) a diferentes proporciones (0.5TG, 1TG, 1.5TG, 2TG) y del mortero testigo (T)

En la tabla 57 siguiente, se presentan los resultados obtenidos del cálculo del coeficiente de absorción capilar (WAC), de los morteros ensayados. Los valores se presentan en segundos (s), en minutos (min) y en horas (h), ya que al transformarlos se tiene una perspectiva más clara de la variabilidad de los datos obtenidos. Hay que destacar, que la manera más generalizada de presentar estos resultados son expresados en  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ .

Tabla 57. Resultados del cálculo del coeficiente de absorción capilar (WAC) de las diferentes familias de morteros ensayadas. Entre paréntesis se presenta la desviación estándar de los valores obtenidos

	WAC ( $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ )	WAC ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ )	WAC ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ )
<b>T</b>	0,23 (0,007)	1,79	13,8
<b>0.5G</b>	0,14 (0,003)	1,07	8,3
<b>1G</b>	0,17 (0,005)	1,35	10,5
<b>1.5G</b>	0,16 (0,006)	1,21	9,4
<b>2G</b>	0,16 (0,011)	1,21	9,4
<b>0.5TG</b>	0,14 (0,003)	1,12	8,7
<b>1TG</b>	0,21 (0,009)	1,60	12,4
<b>1.5TG</b>	0,23 (0,007)	1,78	13,8
<b>2TG</b>	0,21 (0,005)	1,64	12,7

Además, para facilitar la lectura de los resultados obtenidos presentados en la tabla 57, estos se representan en un gráfico de barras, para observar mejor las variaciones que se dan en los diferentes morteros ensayados (Figura 149).

En la figura 149 donde se representan gráficamente los valores obtenidos del coeficiente de absorción (WAC) de los morteros ensayados, se aprecia en términos generales como la adición de las gomas (G y TG) en los morteros disminuye la capacidad de succión capilar de los morteros, porque las gomas generan más macroporo y la incorporación de aire en forma de burbujas, haciendo que se reduzca la tensión capilar que genera la porosidad de un material, es decir, aumento del radio de poro y peor comunicación. Si se compara el comportamiento de los morteros con la adición de goma guar (G) respecto de los morteros con la adición de goma tragacanto (TG), se comprueba que la goma guar (G) influye mucho más al modificar el comportamiento del mortero frente a la absorción capilar. Los morteros con la adición de goma tragacanto (TG), a nivel general, prácticamente no modifican su absorción capilar respecto del mortero testigo (T). Solo, hay que destacar el mortero con la adición del 0,5% de goma tragacanto (TG), en el que se obtiene un valor del coeficiente de absorción significativamente menor, pareciéndose a los valores obtenidos por los morteros con la adición de goma guar (G).

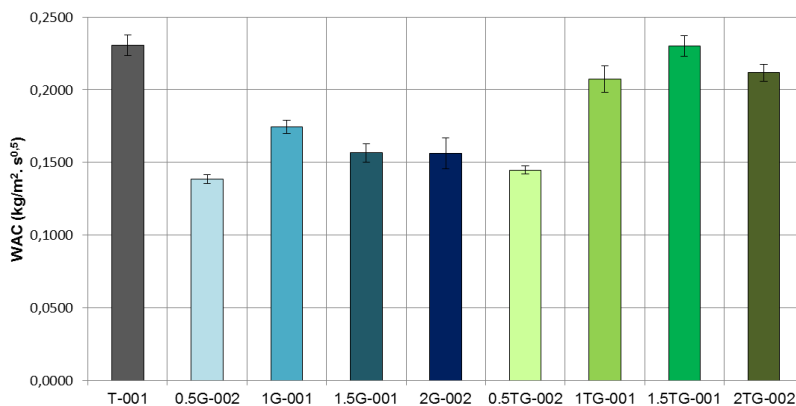


Figura 149. Resultados de los valores obtenidos del coeficiente de absorción (WAC) de los morteros ensayados a diferentes proporciones (0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG i 2TG) y del mortero testigo (T)

### 2.1.3.2.1.2. Determinación de la curva de evaporación

El objetivo de este ensayo es observar y determinar la capacidad de la pérdida de agua por evaporación de las diferentes familias de morteros ensayadas (T, 0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG y 2TG).

Macroscópicamente, el proceso de secado de un material se puede dividir en tres fases diferenciadas: Fase 1: esta fase corresponde al inicio del proceso de secado del material. En este momento el agua líquida es transportada a la superficie exterior, principalmente debido a fuerzas de capilaridad; Fase 2: esta fase se inicia cuando el flujo capilar se vuelve insuficiente y el agua líquida es incapaz de llegar a la superficie. Según Diaz Gonçalves, T. (2007), en esta fase el flujo capilar insaturado no consigue compensar la evaporación y el frente de secado recae por dentro del material. En este momento, aumenta progresivamente el transporte de vapor por difusión en detrimento del transporte líquido por capilaridad. Como resultado la tasa de secado del material disminuye; Fase 3: esta fase se inicia cuando la continuidad líquida es inexistente y es dominada por la difusión de vapor (dominio higroscópico). Se caracteriza por una tasa de secado que va disminuyendo despacio hasta extinguirse (Brito, V., 2009) (Figura 150).

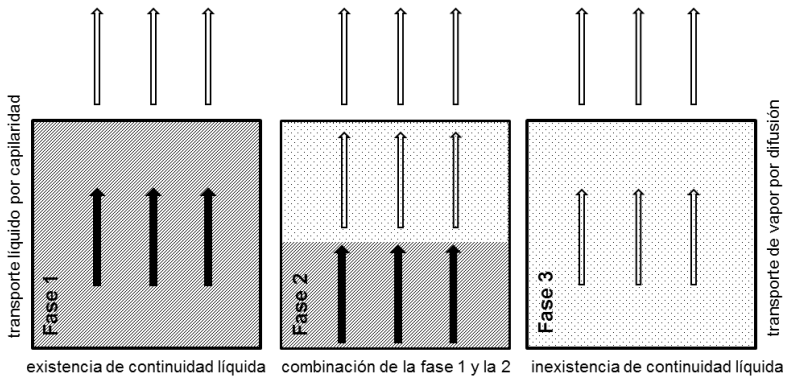


Figura 150. Fases del proceso de secado de un material. Autor dibujo: Diaz Gonçalves, T. (2007) y adaptado per Brito, V. (2009) y finalmente modificado por el autor de la tesis

Estas tres fases teóricas del proceso de secado de un material se ven reflejadas en las curvas obtenidas a partir del ensayo de la determinación de la curva de evaporación (Figura 151 y 152). La primera fase descrita (Fase 1) corresponde al segmento recta de la curva de secado. Por tanto, en este tramo de la recta la disminución de la cantidad de agua es lineal y la tasa de secado

(DR) es constante. La tasa de secado de esta primera fase (DR Fase 1) se puede calcular matemáticamente a partir de la pendiente de este primer tramo de la recta, expresada en  $\text{g}/\text{cm}^2$ . A partir de este momento, la curva deja de ser lineal. Este punto de inflexión de la curva se define como cantidad *de agua crítica* (Brito, V., 2009) y corresponde al momento de transición entre la Fase 1 y la Fase 2, es decir, entre el transporte líquido por capilaridad y el transporte de vapor por difusión y la tasa de secado pasa a ser decreciente. Para terminar, como se puede observar en las curvas de secado obtenidas en nuestro caso, la transición entre la Fase 2 y la Fase 3 no está definida, como normalmente pasa en la mayoría de los materiales porosos.

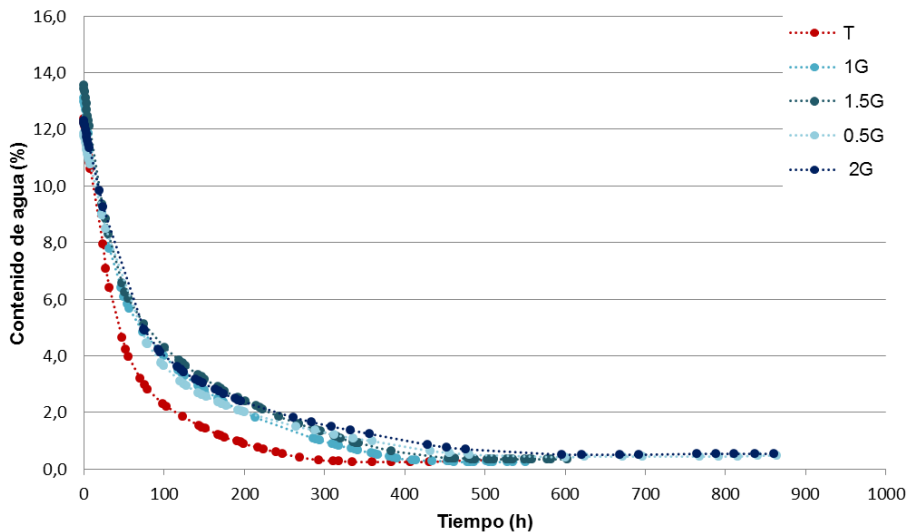


Figura 151. Curvas de la evaporación de los morteros ensayados con la adición de goma guar (G) a diferentes proporciones (0.5G, 1G, 1.5G, 2G) y del mortero testigo (T)

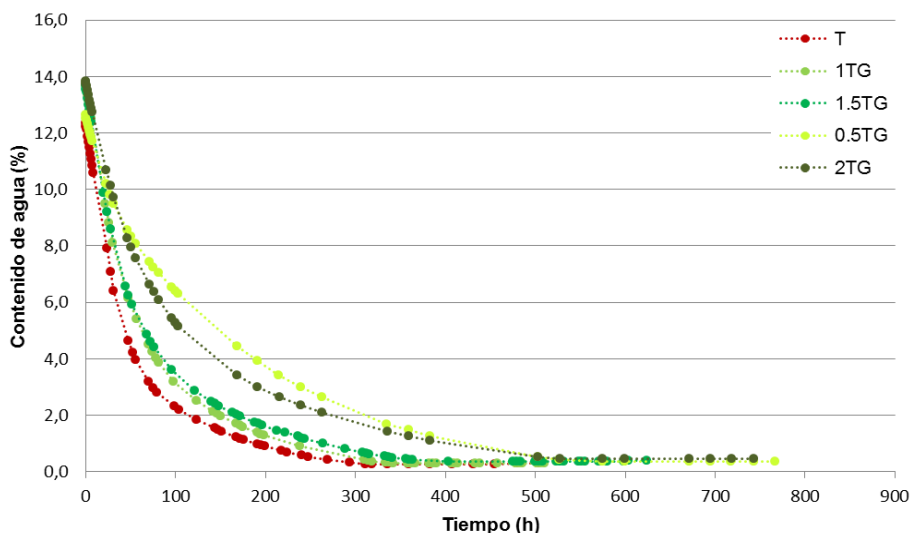


Figura 152. Curvas de la evaporación de los morteros ensayados con la adición de goma tragacanto (TG) a diferentes proporciones (0.5TG, 1TG, 1.5TG, 2TG) y del mortero testigo (T)

Por tanto, el secado de las diferentes familias de mortero ensayadas se puede caracterizar, por un lado, a partir de la tasa de secado de la primera fase (DR Fase 1), ya que según Diaz Gonçalves, T. (2007) el segmento recto de la curva de secado depende de la porosidad del material y de la rugosidad superficial del material. Por otro lado, a partir del cálculo del índice de secado (IS o DI) total del material (norma 29/88 NORMAL, 1988). En la tabla 58 siguiente, se presentan los resultados obtenidos de la tasa de secado de la primera fase (DR Fase 1) y del índice de secado del material (IS o DI), de los morteros ensayados.

Tabla 58. Resultados obtenidos de la tasa de secado de la primera fase (DR Fase 1) y del índice de secado del material (IS), de los morteros ensayados. Entre paréntesis se presenta la desviación estándar de los valores obtenidos

	DR Fase I (g/h.cm <sup>2</sup> )	IS o DI
<b>T</b>	0,0149 (0,0003)	0,20 (0,006)
<b>0.5G</b>	0,0100 (0,0003)	0,23 (0,010)
<b>1G</b>	0,0140 (0,0003)	0,22 (0,005)
<b>1.5G</b>	0,0138 (0,0005)	0,22 (0,008)
<b>2G</b>	0,0095 (0,0003)	0,23 (0,019)
<b>0.5TG</b>	0,0090 (0,0005)	0,28 (0,012)
<b>1TG</b>	0,0143 (0,0002)	0,21 (0,005)
<b>1.5TG</b>	0,0149 (0,0002)	0,21 (0,005)
<b>2TG</b>	0,0110 (0,0001)	0,28 (0,002)

Para facilitar la lectura de los resultados obtenidos presentados en la tabla 58, estos se representan en un gráfico de barras, para observar mejor las variaciones que se dan en los diferentes morteros ensayados. Los valores obtenidos de la tasa de secado de la primera fase (DR Fase 1) se representan en la figura 153 y los resultados obtenidos del cálculo del índice de secado (IS o DI) se representan en la figura 154.

En la figura 153 donde se representan gráficamente los valores obtenidos de la tasa de secado de la primera fase (DR Fase 1), se aprecia como la adición de las gomas (G y TG) afecta sustancialmente el inicio del proceso de secado del material (Fase 1), es decir, en el momento que el agua líquida es transportada a la superficie exterior, principalmente debido a fuerzas de capilaridad. Se observa una disminución de la tasa de secado en todas las proporciones de gomas ensayadas (0,5%, 1%, 1,5% y 2%). Aunque hay que puntualizar que las proporciones donde la disminución de la tasa de secado es más clara es con la adición del 0,5% y del 2%, tanto de la goma guar (G) como de la goma tragacanto (TG). En conjunto, estos resultados nos indican que la adición de las gomas en los morteros de cal en pasta propicia que el secado del mortero, en los primeros momentos, dominado por un transporte del agua líquida por capilaridad, sea más lento.

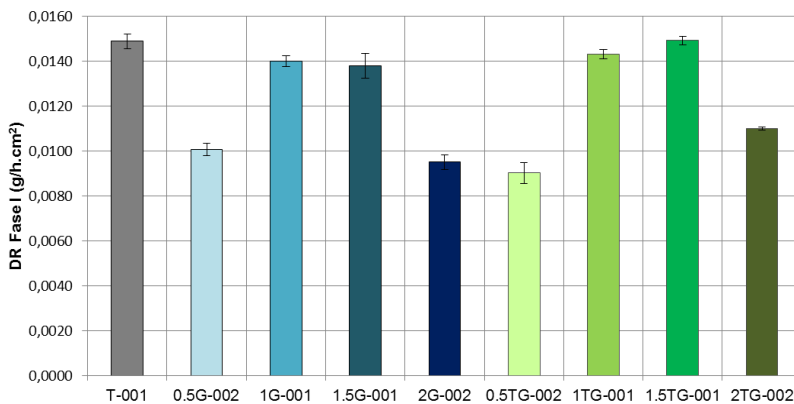


Figura 153. Resultados de los valores obtenidos de la tasa de secado de la primera fase (DR Fase 1) de los morteros ensayados a diferentes proporciones (0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG y 2TG) y del mortero testigo (T)



En la figura 154 donde se representan gráficamente los valores del índice de secado del material (IS o DI) de los morteros ensayados, se aprecia como estos son más elevados en los morteros con la adición de las gomas (G y TG). Este hecho nos indica que el proceso de secado de los morteros con la adición de las gomas es más lento y más largo en el tiempo, respecto el proceso de secado del mortero testigo (T). En este caso, también los valores de los morteros con la adición del 0,5% y del 2%, tanto de la goma guar (G) como de la goma tragacanto (TG) se diferencian del resto de los morteros, indicando que estas proporciones aún afectan de una manera más sustancial el proceso de secado retardándolo. Esta disminución de la velocidad del secado está claramente justificada por tres factores: (a). al incremento de la macroporosidad; (b). a la formación de burbujas que disminuyen la comunicación de la red porosa. Es decir, las gomas modifican la configuración del sistema poroso dificultando el transporte por capilaridad de la Fase 1 del secado y haciendo que se disminuya la pendiente del segmento recto de la curva de secado (DR Fase 1); (c). a la capacidad de retención de agua de las gomas, tal como indican los resultados del ensayo de la determinación de la capacidad de retención de agua del mortero.

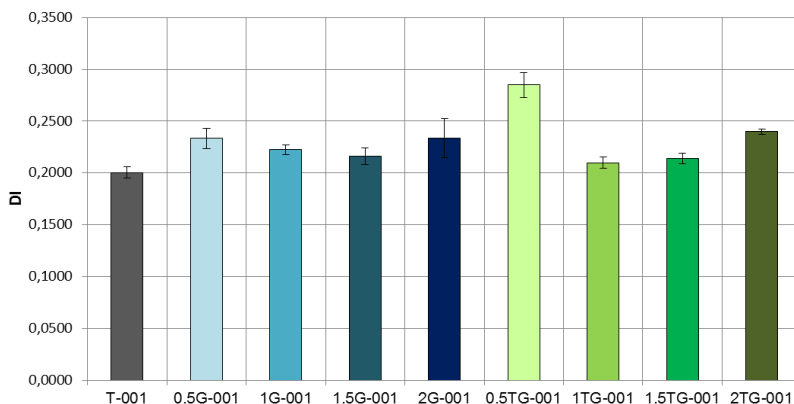


Figura 154. Resultados de los valores obtenidos del índice de secado (IS o DI) de los morteros ensayados a diferentes proporciones (0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG y 2TG) y del mortero testigo (T)

### 2.1.3.2.1.3. Determinación de la porosidad accesible al agua bajo condiciones al vacío, de la porosidad accesible al agua por capilaridad, del coeficiente de saturación y de la densidad aparente

A partir de los ensayos que se desarrollan en el apartado de materiales y métodos de la parte 2 de esta tesis doctoral (apartado 2.1.2.2), el Test No. I.1, el Test No. II.6, el Test No. II.1 y el Test No.I.2, se obtienen los parámetros más esenciales para caracterizar las propiedades hídricas del mortero en estado endurecido. Los objetivos de estos ensayos son determinar la cantidad de agua que pueden absorber en condiciones al vacío ( $V_0$ ) y por capilaridad ( $V_1$ ) las diferentes familias de morteros ensayadas, a diferentes proporciones (T, 0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG y 2TG). A parte, determinar el contenido máximo de agua que pueden absorber los morteros (S) y la densidad aparente de los diferentes morteros ( $d_{ap}$ ).

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 59 siguiente:

Tabla 59. Resultados obtenidos de la determinación de la porosidad accesible al agua bajo condiciones al vacío, de la porosidad accesible al agua por capilaridad, del coeficiente de saturación y de la densidad aparente. Acrónimos:  $V_0$  (%): porosidad accesible al agua bajo condiciones al vacío;  $V_1$  (%): porosidad accesible al agua por capilaridad; S (%): coeficiente de saturación;  $d_{ap}$  ( $\text{kg/m}^3$ ): densidad aparente. Entre paréntesis se presenta la desviación estándar de los valores obtenidos.

	$V_0$ (%)	$V_1$ (%)	S (%)	$d_{ap}$ ( $\text{kg/m}^3$ )
<b>T</b>	33,95 (0,270)	24,63 (0,324)	72,55 (1,238)	1769 (0,312)
<b>0.5G</b>	31,61 (0,326)	24,68 (0,171)	78,09 (0,269)	1830 (0,563)
<b>1G</b>	34,84 (0,162)	25,54 (0,119)	73,25 (0,221)	1746 (0,181)
<b>1.5G</b>	35,05 (0,299)	26,14 (0,433)	74,59 (0,617)	1736 (0,427)
<b>2G</b>	32,21 (0,103)	25,13 (0,064)	78,01 (0,378)	1809 (0,153)
<b>0.5TG</b>	33,64 (0,104)	24,80 (0,204)	73,73 (0,432)	1778 (0,208)
<b>1TG</b>	37,06 (0,265)	26,09 (0,259)	70,40 (1,180)	1679 (0,372)
<b>1.5TG</b>	36,29 (0,148)	26,40 (0,355)	72,74 (1,164)	1699 (0,185)
<b>2TG</b>	33,11 (0,235)	26,84 (0,155)	81,08 (0,603)	1783 (0,425)

La porosidad accesible al agua ( $V_0$ ) bajo condiciones al vacío disminuye en los morteros con la adición del 0.5% y del 2% tanto de goma guar (G) como de goma tragacanto (TG). En el caso de la proporción del 0,5% esta disminución es más acentuada. Hay que destacar, que si se compara la disminución de la porosidad accesible al agua de los morteros con la adición de goma guar (G) respecto los morteros con la adición de goma tragacanto (TG), la disminución es menor en los morteros con goma tragacanto (TG). Por lo que respecta a las otras proporciones estudiadas (1% y 1,5%), los valores obtenidos de la porosidad accesible al agua aumentan con respecto a los valores obtenidos del

mortero testigo (T). Este hecho, se puede deber a la variabilidad que puede dar la misma elaboración del mortero y no determina la tendencia general que se observa en este ensayo.

#### 2.1.3.2.1.4. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua

El objetivo del ensayo es determinar el régimen estacionario de transporte unidireccional de vapor de agua que atraviesa las diferentes familias de morteros ensayadas (T, 1G, 1.5G, 1TG y 1.5TG).

Tabla 60. Resultados de la permeabilidad al vapor de agua de las diferentes familias de morteros ensayados. Acrónimos: Sd: espesor de la capa de aire equivalente a la difusión del vapor de agua. Entre paréntesis se presenta la desviación estándar de los resultados obtenidos.

	Flujo de vapor de agua (G)	Permeabilidad ( $\delta$ )	Sd
	(g/d)	(kg/m.s.Pa)	(m)
<b>T</b>	2,40 (0,09)	$1,96 \cdot 10^{-11}$ ( $5,69 \cdot 10^{-13}$ )	0,20 (0,01)
<b>1G</b>	2,50 (0,02)	$2,04 \cdot 10^{-11}$ ( $3,46 \cdot 10^{-13}$ )	0,19 (0,001)
<b>1.5G</b>	2,46 (0,14)	$1,97 \cdot 10^{-11}$ ( $7,21 \cdot 10^{-13}$ )	0,19 (0,01)
<b>1TG</b>	2,42 (0,17)	$1,95 \cdot 10^{-11}$ ( $1,27 \cdot 10^{-12}$ )	0,20 (0,01)
<b>1.5TG</b>	2,31 (0,04)	$1,87 \cdot 10^{-11}$ ( $5,29 \cdot 10^{-13}$ )	0,20 (0,005)

Los resultados de la tabla 60 nos indican la tasa del flujo de vapor de agua (G) que pasa a través de las probetas cilíndricas ensayadas, la permeabilidad al vapor de agua ( $\delta$ ) y el espesor de la capa de aire equivalente a la difusión del vapor de agua (Sd) obtenidos a partir de la determinación de la permeabilidad al vapor de agua. La permeabilidad al vapor de agua es una de las propiedades más importantes a tener en cuenta cuando se habla de morteros de revestimiento, en este caso, aplicados en el campo de la conservación-restauración. Estos morteros deben tener un nivel de permeabilidad al vapor aceptable, para permitir que el vapor de agua circule por dentro del mortero, ya que de no ser así se produce una retención de agua en el mortero y la condensación del material, con todas las consecuencias que eso comporta si este mortero es de reposición (Izaguirre, A.A. *et al.*, 2009). Así pues, era del todo necesario determinar como la adición de las gomas (G y TG) afectan el mortero, por lo que respecta a la permeabilidad al vapor de agua. Los resultados nos indican que la variabilidad que se determina en los morteros con la adición de goma guar (G) y de goma tragacanto (TG), a diferentes proporciones (1% y 1,5%) no son apreciables como para creer que las gomas modifican de manera sustancial la permeabilidad al vapor de agua del mortero.

Aun así, se puede observar un sutil aumento de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros con la adición de goma guar (G), ya que en estos morteros no se detecta tanta cantidad de aire incorporado y la difusión del vapor de agua por la red porosa es adecuada. En cambio, se puede observar una sutil disminución de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros con la adición de goma tragacanto (TG), ya que en estos morteros se detecta más incorporación de aire que dificulta la difusión del vapor de agua por la red porosa, con respecto a los valores obtenidos del mortero testigo (T). Pero en conjunto, se puede determinar que las gomas testadas se pueden considerar aptos para ser utilizadas como aditivos de los morteros de cal en pasta, por lo que respecta a la permeabilidad al vapor de agua.

De la síntesis de los resultados de los ensayos de la caracterización de las propiedades petrofísicas del mortero se determina, en términos generales, que las dos gomas testadas, tanto la goma guar (G) como la goma tragacanto (TG), modifican sus propiedades hídricas. Así pues, los resultados obtenidos nos indican una disminución, en general, de la succión capilar y de la velocidad de secado. En parte, se aprecia una disminución de la porosidad accesible al agua ( $V_o$ ), especialmente con la adición de la goma guar (G). Este comportamiento físico frente al agua se produce fundamentalmente por la combinación de los siguientes factores:

- El incremento de la proporción de macroporo disminuye la tensión capilar del sistema poroso del mortero, dado que en conjunto la goma dificulta la acción de la succión capilar de los microporos (*Ley de Jurin-Laplace*). Este incremento de la macroporosidad se produce por la formación de una microestructura entrelazada del polímero de la goma y su unión a las partículas de la cal, tal como se observa y se determina mediante la porosimetría de intrusión de mercurio y mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM).
- La incorporación de aire que propicia la adición de las gomas, generando la formación de vacuolas o burbujas dentro del mortero. Estas burbujas (poros cerrados) dificultan la comunicación de la red porosa del mortero, disminuyendo la succión capilar. Esta microestructura se determina mediante la de la microscopía electrónica de barrido (SEM) y del ensayo de la determinación de la incorporación de aire en el mortero.
- La retención de agua por parte de la estructura química de las gomas, la cual se determina en la caracterización de las propiedades reológicas del mortero (en estado fresco).

Así pues, por una parte, la combinación de estos tres factores explican por sí mismos, en general, la disminución de la velocidad de secado. Es decir, las gomas modifican la configuración del sistema poroso del mortero endurecido, ya que dificultan el transporte por capilaridad, principalmente de la Fase 1 del proceso de secado y disminuyen por tanto, la pendiente de la recta correspondiente a la fase inicial (DR Fase 1).

Por otra parte, se observa una disminución de la porosidad accesible en algunas de las proporciones de adición de las gomas (G y TG), especialmente en la adición del 0,5% de goma guar (G). Este hecho también se corresponde con los resultados obtenidos mediante la porosimetría de intrusión de mercurio, los cuales nos indican una reducción del volumen de la intrusión de mercurio. Eso se produce por la formación de la microestructura del mortero ya mencionada, la cual se genera por la interacción de las gomas con las partículas de la cal. En cambio, la disminución de la porosidad, en el caso de la adición del 2%, tanto de la goma guar (G) como de la goma tragacanto (TG), se puede atribuir, además, por la gran compacidad que genera el exceso de goma en la estructura y que dificulta también la entrada del agua en la red porosa. Así pues, en general las gomas producen una disminución de la porosidad accesible al agua que es idónea aplicada en morteros que tengan que estar expuestos a fenómenos ambientales (Izaguirre, A.A., 2011a).

Estos resultados de la porosidad accesible se pueden correlacionar con los resultados obtenidos de la determinación de la densidad aparente ( $d_{ap}$ ) del mortero en estado endurecido. La disminución de los espacios vacíos en el mortero, ya explicada por la formación de la microestructura entrelazada y determinada mediante la porosimetría de intrusión de mercurio, comporta un aumento de la densidad aparente. Por este motivo, los morteros con la adición del 0,5%, tanto de goma guar (G) como de la goma tragacanto (TG), presentan por tanto un aumento de la densidad aparente. En cambio, la incorporación de aire en el mortero, que se va incrementando con el aumento de la proporción de las gomas, especialmente con la adición de goma tragacanto (TG), produce el efecto contrario, haciendo disminuir la densidad, tal como indican los valores obtenidos por los morteros con la adición del 1%, del 1,5% y del 2%, tanto de goma guar (G) como de goma tragacanto (TG).

### 2.1.3.2.2. Comportamiento mecánico

#### 2.1.3.2.2.1. Determinación de la resistencia a la flexión y a la compresión

El objetivo del ensayo es determinar la resistencia que muestran las diferentes familias de los morteros ensayados (T, 0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG y 2TG) a la flexión y a la compresión, a 180 días de edad. Hay que especificar, que los resultados que se presentan a continuación (Tabla 61) no son del todo significativos, ya que a 180 días de edad los morteros ensayados están débilmente carbonatos aún.

Tabla 61. Resultados de la determinación de la resistencia a la flexión y a la compresión de las diferentes familias de los morteros ensayados, a 180 días de edad. Entre paréntesis se presenta la desviación estándar de los resultados obtenidos.

	<b>Compresión (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Flexión (N/mm<sup>2</sup>)</b>
<b>T</b>	1,98 (0,07)	0,83 (0,04)
<b>0.5G</b>	2,45 (0,01)	0,95 (0,05)
<b>1G</b>	2,10 (0,21)	0,85 (0,07)
<b>1.5G</b>	2,43 (0,04)	0,75 (0,05)
<b>2G</b>	1,43 (0,18)	0,95 (0,07)
<b>0.5TG</b>	1,78 (0,05)	1,15 (0,05)
<b>1TG</b>	1,89 (0,23)	0,70 (0,05)
<b>1.5TG</b>	1,74 (0,12)	0,68 (0,04)
<b>2TG</b>	1,59 (0,58)	0,90 (0,07)

Por un lado, la determinación de la resistencia a la compresión nos indica la uniformidad de los morteros ensayados. En este caso, el tipo de ruptura que se observa en los semiprismas de las probetas de los morteros de las diferentes familias con la adición de las gomas (G y TG) y de las probetas del mortero testigo (T) ensayadas nos indica una buena homogeneidad de los morteros, por lo que respecta a la distribución de los áridos a la pasta de cal y a una buena cohesión entre el árido y el conglomerante (Figura 155, 156 y 157).

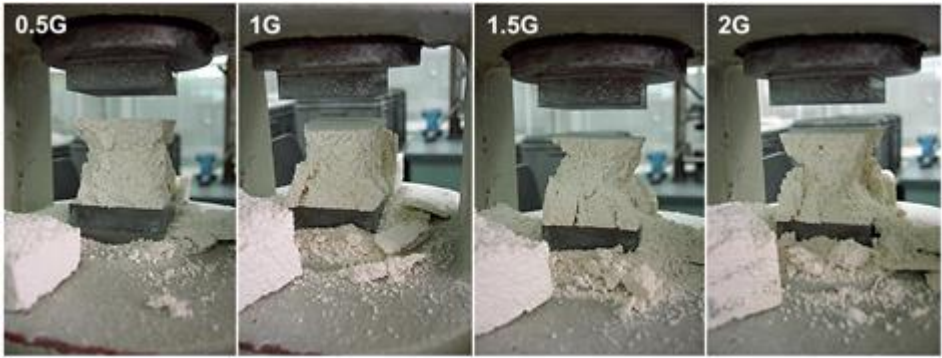


Figura 155. Tipo de rupturas en los semiprismas de las probetas de los morteros de las diferentes familias con la adición de la goma guar (G), a 180 días de edad

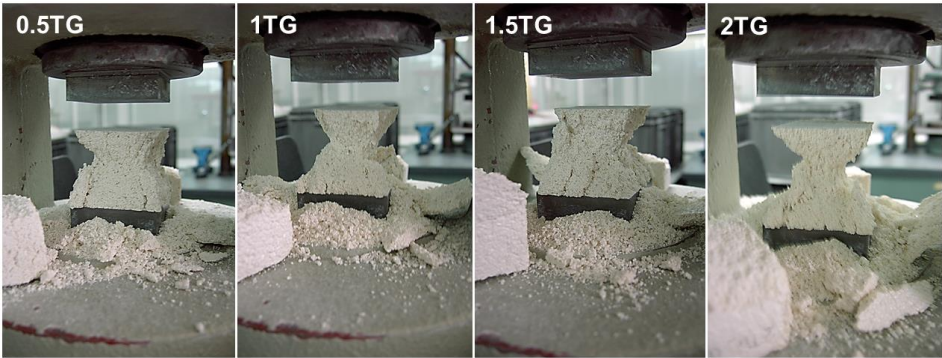


Figura 156. Tipo de rupturas en los semiprismas de las probetas de los morteros de las diferentes familias con la adición de la goma tragacanto (TG), a 180 días de edad

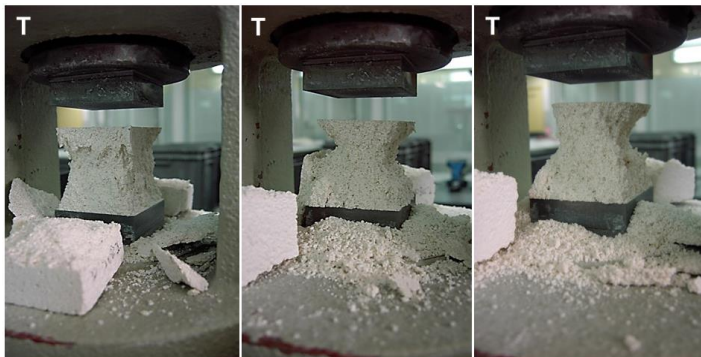


Figura 157. Tipo de rupturas en los semiprismas de las probetas del mortero testigo (T), a 180 días de edad

Los resultados de la resistencia a la compresión de los morteros ensayados con la adición de goma tragacanto (TG), a 180 días de edad, nos muestran una disminución de la resistencia a la compresión generalizada en todas las proporciones ensayadas (0,5%, 1%, 1,5% y 2%) de goma, respecto el mortero testigo (T) y un aumento de la resistencia a la compresión en los morteros con la adición del 0,5%, del 1% y del 1,5% de goma guar (G). En cambio, en los morteros con la adición del 2% de goma guar (G) se observa una significativa disminución de la resistencia a la compresión. Estos resultados nos indican que los morteros con la adición de goma guar (G) son morteros más uniformes respecto el mortero testigo (T). Aunque, si la proporción de goma es muy elevada el mortero pierde la uniformidad. En cambio, los morteros con la adición de goma tragacanto (TG) son muy menos uniformes con respecto al mortero testigo (T) y también respecto a los morteros con la adición de goma guar (G) (Figura 158).

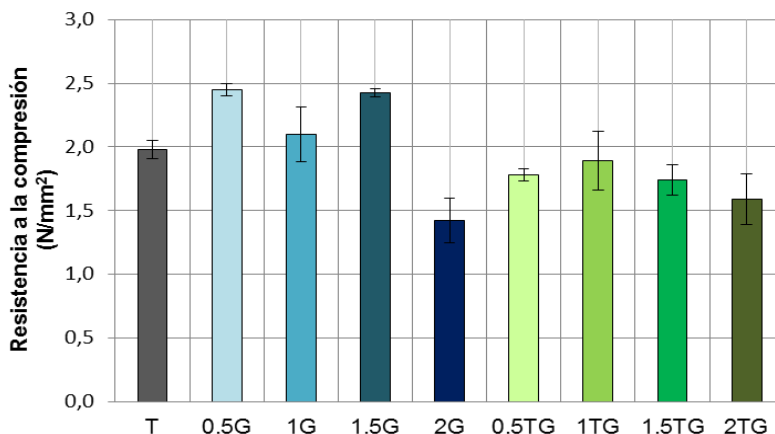


Figura 158. Resultados de la resistencia a la compresión de las diferentes familias de los morteros ensayados con la adición de goma guar (G) y de goma tragacanto (TG), a 180 días de edad

Por otro lado, la determinación de la resistencia a la flexión es más sensible a las modificaciones de la microestructura de los morteros ensayados. Los resultados de la resistencia a la flexión de los morteros ensayados, a 180 días de edad, nos determinan en términos generales que la adición del 0,5% y del 2%, tanto de la goma guar (G) como de la goma tragacanto (TG), comporta un aumento de la resistencia a la flexión del mortero, con respecto al mortero testigo (T), sobre todo en el mortero con la adición del 0,5% de goma tragacanto (TG). En cambio, los resultados de la resistencia a la flexión de los morteros ensayados con la adición del 1% y del 1,5%, tanto de la goma guar



(G) como de la goma tragacanto (TG), nos determinan una disminución en la resistencia a la flexión del mortero (Figura 159).

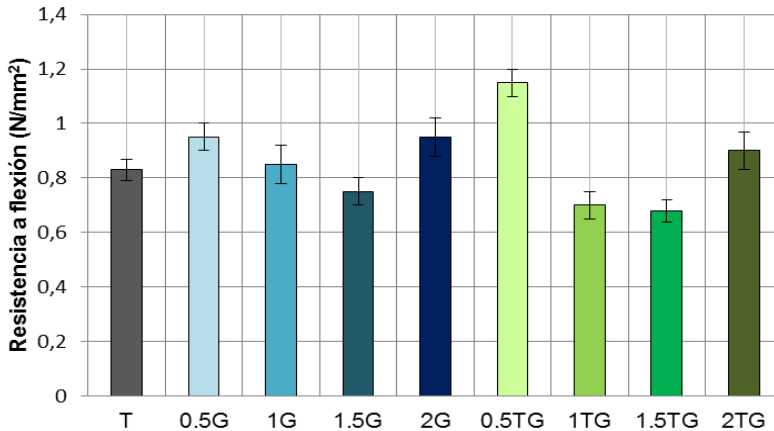


Figura 159. Resultados de la resistencia a la flexión de las diferentes familias de los morteros ensayados con la adición de goma guar (G) y de tragacanto (TG), a 180 días de edad

### 2.1.3.3. Caracterización de la estructura porosa y de la microestructura del mortero

Cabe mencionar, que aunque los resultados de la caracterización de la estructura porosa y de la microestructura del mortero se presentan a continuación, éstos son relevantes para determinar los resultados y la discusión de los apartados anteriores, tal como queda expuesto.

#### 2.1.3.3.1. Determinación de la distribución del tamaño de poro mediante la porosimetría por intrusión de mercurio

La porosimetría por intrusión de mercurio nos permite determinar la distribución del tamaño de poro de las diferentes familias de morteros ensayadas. Para esta finalidad se utilizan las siguientes familias de morteros ensayados: T, 1G, 1TG, 1.5G y 1.5TG. Se lleva a término de 2 muestras irregulares de cada familia de morteros seleccionados.

La figura 160 que se presenta a continuación muestra los resultados de la distribución del tamaño de poro de los morteros ensayados. Todas las muestras ensayadas presentan una distribución unimodal con un pico

importante único (la moda de la curva), relacionado con el tamaño de poro macroporo ( $r > 0,025 \mu\text{m}$ ), aproximadamente a  $0,2 \mu\text{m}$ . Hay que especificar, que los morteros de las familias ensayados con la adición de goma tragacanto (TG) del 1% y del 1,5% muestran un pequeño desplazamiento de la moda de la curva hacia tamaños de poros más grandes, situándose aproximadamente a  $0,22 \mu\text{m}$ . A parte, también se detectan la presencia de pequeños cuellos en las curvas de los morteros con la adición, tanto de goma guar (G) como de goma tragacanto (TG), respecto el mortero testigo (T). Estos cuellos detectados, se distribuyen por la zona de tamaño de poro que corresponde a los macroporos. Por tanto, se puede determinar que la adición tanto de la goma guar (G) como de la goma tragacanto (TG), a diferentes proporciones, aumenta la macroporosidad de los morteros. Además, por un lado, se puede observar un descenso en el volumen de mercurio introducido de las muestras de mortero con la adición de las dos gomas (G y TG), respecto el mortero testigo (T), del pico a  $0,2 \mu\text{m}$ . Por otra parte, si se compara la intrusión de mercurio de los morteros con la adición de goma guar (G) respecto los morteros con la adición de goma tragacanto (TG), los morteros con la adición de goma guar (G) presentan menor intrusión de mercurio. Estos resultados pueden estar relacionados con la acción que ejerce el polisacárido que forma cada goma ensayada (G y TG) en los morteros de cal en pasta.

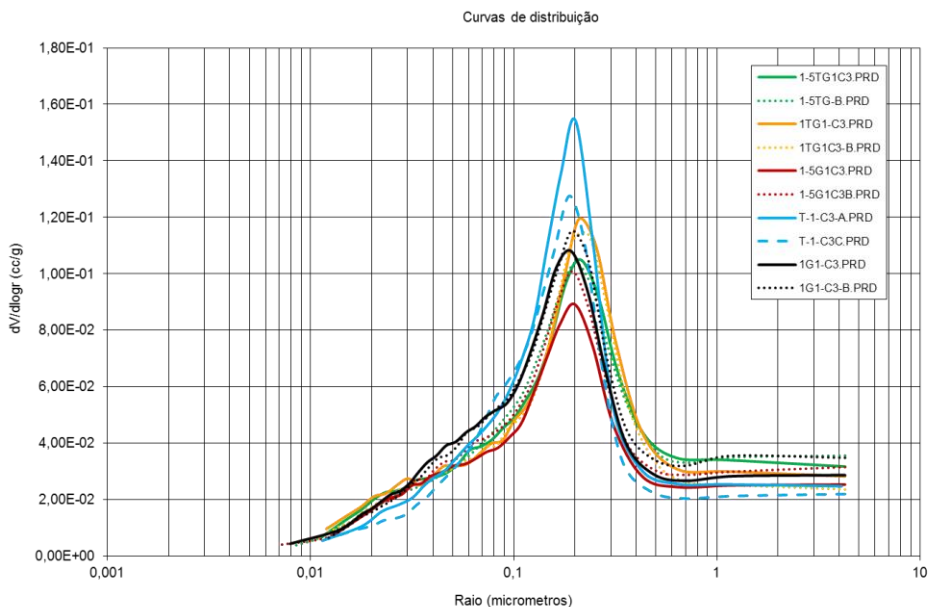


Figura 160. Distribución del tamaño de poro, a través de la porosimetría de intrusión de mercurio, de las diferentes familias de morteros ensayados: T, 1G, 1.5G, 1TG y 1.5TG

Así pues, para interpretar los resultados de los estudios porosimétricos por intrusión de mercurio se debe tener en cuenta que se producen dos procesos, en paralelo, dentro de la estructura del mortero:

- La reticulación o formación de enlaces secundarios entre las cadenas del polímero. Como consecuencia, la goma origina una estructura más entrelazada (*entanglement*) y/o entrecruzada (*cross-linking*).
- La adherencia o unión de las cadenas del polímero a las partículas de cal, principalmente, las partículas de portlandita (de hidróxido de calcio). Se trata de un fenómeno de adsorción química, dado que el polisacárido es capaz de acomplejarse y crear puentes de hidrógeno con el hidróxido de calcio.

Como resultado de estos dos procesos se producen cambios en la configuración de la red porosa y el grado de comunicación entre los poros. En primer lugar, se produce una disminución del volumen de intrusión del mercurio, en diferentes grados según la naturaleza del tipo de polisacárido. En segundo lugar, se produce un aumento del volumen de la macroporosidad.

Por tanto, en nuestro caso es posible que los resultados obtenidos se expliquen precisamente por la combinación de los dos procesos mencionados. Como resultado de los dos procesos se configura una microestructura diferente del mortero, que se caracteriza por la formación de agregados de diferentes partículas de cal unidos por la red entrelazada del polímero. Este hecho reduce el volumen intrapartícula, disminuye el volumen de los poros pequeños y se forman nuevos poros, entre estos agregados rodeados de las cadenas del polímero, pero con un diámetro más ancho (Figura 161).

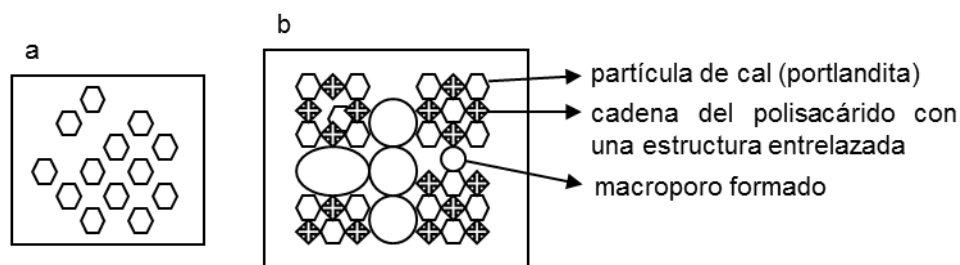


Figura 161. Esquema de la microestructura del mortero, de izquierda a derecha: a. microestructura del mortero sin aditivo; b. microestructura del mortero con la adición de las gomas (G y TG)

Siguiendo esta línea argumental, se puede determinar que la goma guar (G) propicia la creación de una estructura más entrelazada que la goma tragacanto

(TG). Para terminar, si se comparan las diferentes proporciones de goma incorporadas en el mortero, a medida que la proporción de goma aumenta la estructura se determina más entrelazada. Izaguirre, A.A. (2011a), en su estudio, también relaciona el descenso en el volumen de intrusión de mercurio con una estructura más entrelazada. Aunque, en su caso la goma guar aumenta el volumen de intrusión de mercurio. Hay que especificar al respecto que, como ya se ha comentado en el apartado de antecedentes de esta parte, Izaguirre, A.A. en sus estudios, utiliza un derivado de la goma guar, no la goma guar pura, en unas proporciones diferentes, con una cal aérea en polvo y con una dosificación del mortero diferente, por tanto los resultados no se pueden correlacionar.

#### **2.1.3.3.2. Caracterización de la microestructura mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM)**

La microscopía electrónica de barrido (SEM) nos permite realizar la caracterización de la microestructura de las diferentes familias de morteros ensayados. Para esta finalidad se utilizan las muestras congeladas previamente, que provienen de los trozos de las probetas resultantes del ensayo UNE-EN 1015-11:1999, para las familias de morteros ensayadas siguientes, a 365 días de edad: T, 0.5G, 0.5TG, 1G, 1TG, 2G y 2TG. Hay que especificar, que las muestras no reciben ningún tratamiento de pulimento ni de recubrimiento con carbono.

A continuación, se representa gráficamente la estrategia de observación que se sigue para la caracterización de la microestructura de las diferentes familias de morteros ensayadas (Figura 162). Esta estrategia sigue el criterio establecido para la extracción de las muestras realizadas, para la caracterización química de la evolución del proceso de la carbonatación del mortero, a lo largo del tiempo, en el que se definen dos zonas de extracción de muestras: una de exterior (1) y una de interior (3). Así pues, la caracterización de la microestructura de los morteros sigue las mismas dos zonas de estudio, para valorar si se pueden establecer correspondencias entre los diferentes resultados obtenidos con las diferentes técnicas instrumentales de análisis. Las muestras tienen un tamaño aproximado  $1 \text{ cm}^2$ .

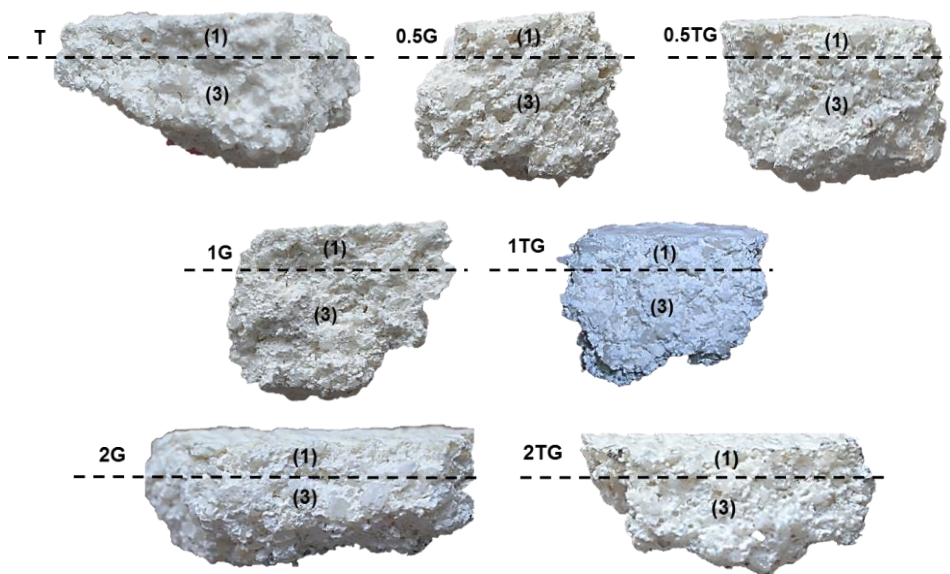


Figura 162. Zonas de estudio, (1) exterior y (3) interior, establecidas para la caracterización de la microestructura a través de SEM, de los morteros ensayados: T, 0.5G, 0.5TG, 1G, 1TG, 2G y 2TG

#### *Mortero testigo (T) a 365 días de edad*

La caracterización de la microestructura del mortero testigo (T) nos determina, por un lado, que la zona 1 establecida se subdivide en dos subzonas, nombradas (1a) y (1b). La subzona (1a) se define como *estrato superficial gel* y, en superficie, presenta una textura continua formada por agregados muy irregulares con forma y dimensiones de partículas irregulares de morfología amebode y es poco porosa; la subzona (1b) se define como *estrato microcristalino* y presenta una textura microcristalina heterométrica y heterogénea formada por granos de forma subangulosa con una cierta tendencia a formas poliédricas subhedrales y es porosa. También se observan algunos cristales mosaico, que se componen por agregados de microcristales que forman un macrocristal euédrico, de forma romboédrica, de tamaño entre 20 y 50  $\mu\text{m}$  (Figura 163 - T-003-b-1).

Por otro lado, la zona (3) también presenta una textura microcristalina, pero con una presencia significativa de cristales de portlandita, muchos de geometría hexagonal bien conformados (euhédricos), frecuentemente en forma de láminas o placas. Eso nos indica que la carbonatación no está del todo

desarrollada. Estas observaciones coinciden con los resultados del test de la fenolftaleína, cuando esta coge tonalidades rosadas.

También se observan cristales capilares y aciculares que rellenan los poros de la microestructura. Este hecho se puede originar por una redisolución y precipitación del carbonato de calcio, durante las fases de carbonatación que experimenta el mortero. A parte, también se observan algunos cristales lenticulares y prismáticos de calcita y una porosidad significativa de tipo intrapartícula (Figura 163 – T-003-b-2).

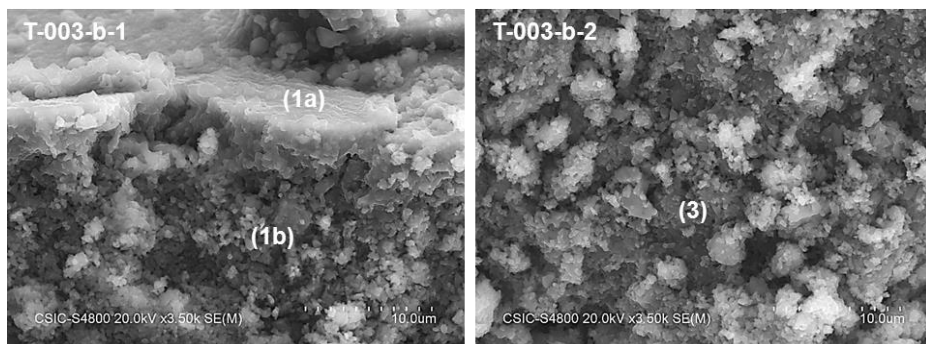


Figura 163. Imágenes de electrones retrodispersados (BSK) de la microestructura del mortero testigo (T): T-003-b-1 (3500x); T-003-b-2 (3500x)

#### *Mortero con la adición del 0,5% de goma guar (0.5G) a 365 días de edad*

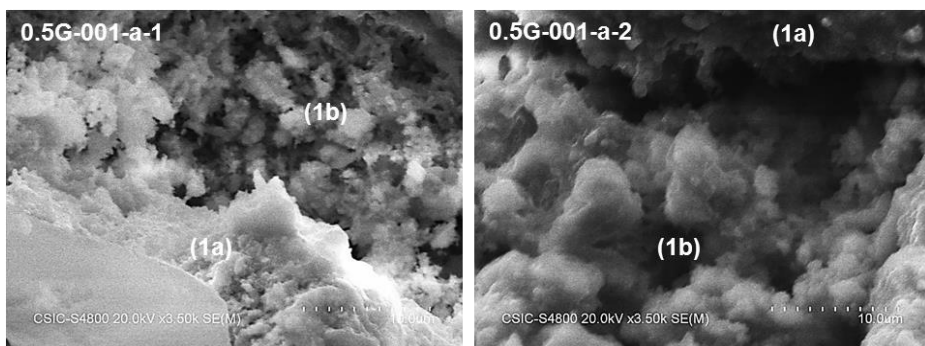
La caracterización de la microestructura del mortero con la adición del 0,5% de goma guar (G) nos determina, por un lado, que la zona 1 establecida se subdivide en dos subzonas, nombradas (1a) y (1b). La subzona (1a) se define como *estrato superficial gel* y, en superficie, presenta una textura continua semejante a la descrita para el mortero testigo (T); la subzona (1b) se define como *estrato microcristalino*, que en este caso, presenta una textura nodulosa, ya que la goma rodea la textura microcristalina definida por esta subzona en el mortero testigo (T). A parte, se observa un aumento de la porosidad, con respecto al mortero testigo (T) y una separación más definida o diferenciada entre la subzona (1a) y la subzona (1b) (Figura 164 – 0.5G-001-a-1 y 0.5G-001-a-2).

Este tipo de microestructura confirma el modelo planteado en el apartado de los resultados de la porosimetría por intrusión de mercurio (consultar la figura 161) de formación de agregados de multipartículas unidas por una estructura

entrelazada (*entanglement*) y/o entrecruzada (*cross-linking*) del polímero del polisacárido. También confirma la modificación de la porosidad por la adición de estos tipos de aditivos.

Por otro lado, en este caso, la zona (3) también se subdivide en dos subzonas, nombradas (3a) y (3b), con una microestructura diferente. La subzona (3a) presenta una textura formada por agregados de cristales lenticulares y romboédricos más evolucionados con un crecimiento más definido; la porosidad es abundante y el tamaño del poro es de tipo mesoporo. En cambio, la subzona (3b) es menos porosa y de tamaño de poro más pequeño que la otra subzona; se observa una textura granulosa que presenta dos tipos de partículas: el primer tipo de partículas son más grandes y de formas irregulares, a pesar que muchas de ellas tienden a ser subredondeadas; las otras son partículas de tamaño de escasas micras; el segundo tipo de partículas, algunas son aciculares y otras son microlaminares de formas irregulares. Este segundo tipo de partículas se localiza por encima de las partículas más gruesas o en los espacios porosos, entre las partículas del primer tipo.

Esta diferencia de microestructura tan marcada se puede interpretar como la separación de dos frentes de carbonatación diferenciados. Si se compara este hecho con los frentes de carbonatación que se definen con el test de la fenolftaleína, la subzona (3a) no se teñiría con el indicador ( $\text{pH} < 8$ ), indicando una zona más carbonatada y la subzona (3b) se teñiría con el indicador adquiriendo una tonalidad rosada ( $\text{pH} > 8$ ) y indicando una zona no carbonatada o en un grado de carbonatación menor (Figura 164 – 0.5G-001-a-3 y 0.5G-001-a-4).



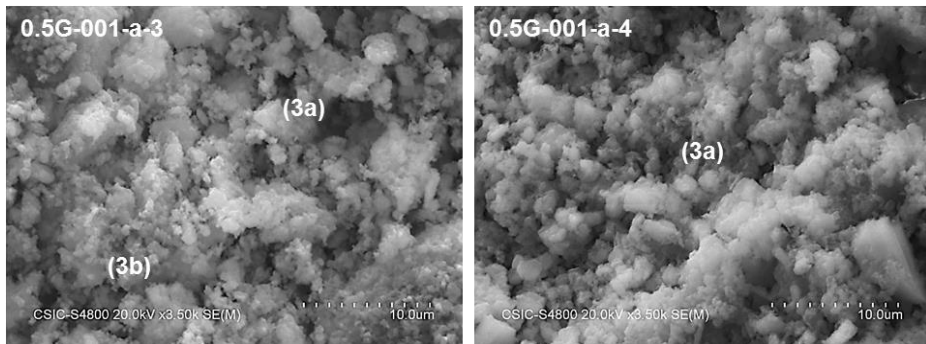


Figura 164. Imágenes de electrones retrodispersados (BSK) de la microestructura del mortero con la adición del 0,5% de goma guar (G): 0.5G-001-a-1 (3500x); 0.5G-001-a-2 (3500x); 0.5G-001-a-3 (3500x); 0.5G-001-a-4 (3500x)

*Mortero con la adición del 0,5% de goma tragacanto (0.5TG) a 365 días de edad*

La caracterización de la microestructura del mortero con la adición del 0,5% de goma tragacanto (TG) nos determina, una microestructura diferenciada muy semejante, en ciertas zonas, al mortero con la adición del 0 5% de goma guar (G). La subzona (1a) continúa siendo la definida como *estrato superficial gel* y, en superficie, presenta una textura continua semejante a la descrita para el mortero testigo (T); la subzona (1b) también se define como *estrato microcristalino*, que en este caso, presenta una textura nodulosa, ya que la goma recubre superficialmente, la textura microcristalina definida por esta subzona en el mortero testigo (T). Por tanto, a nivel de microestructura se aprecia la primera diferencia respecto el comportamiento de las dos gomas: la goma guar (G) rodea los cristales y la goma tragacanto (TG) recubre superficialmente los cristales en forma de una fina capa laminar. A parte, se observa un aumento de la porosidad, con respecto al mortero testigo (T) (Figura 165 – 0.5TG-001-a-1 y 0.5TG-001-a-2).

Por otro lado, la zona (3) presenta una textura microcristalina interlaminar. La goma de tragacanto transforma la microestructura característica del mortero sin aditivos disponiendo las partículas y los cristales en láminas subparalelas, recubiertas por la goma (Figura 165 – 0.5TG-001-a-3).



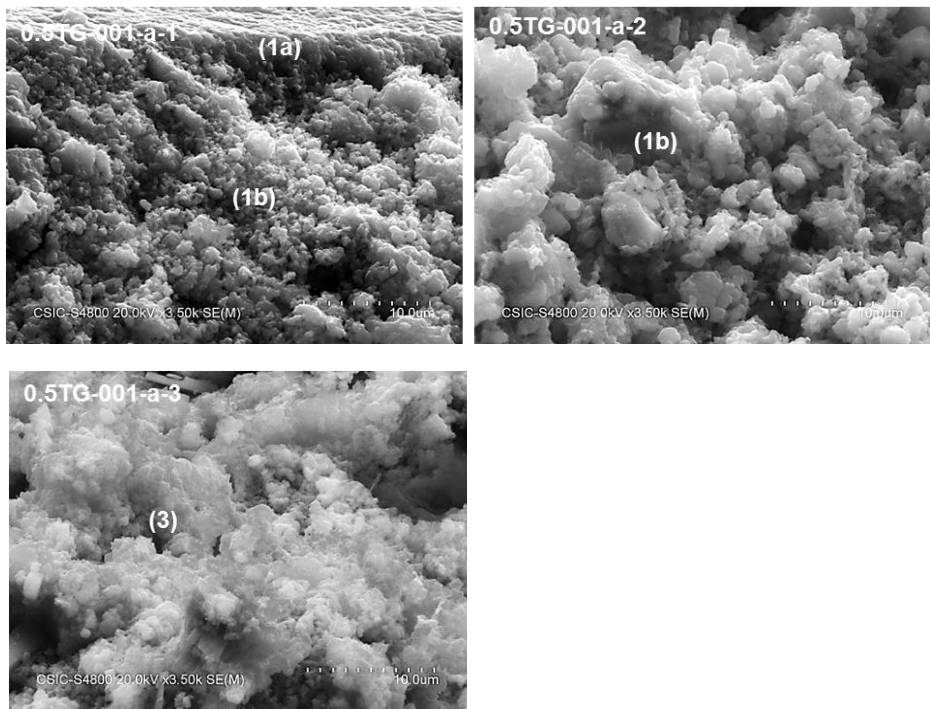


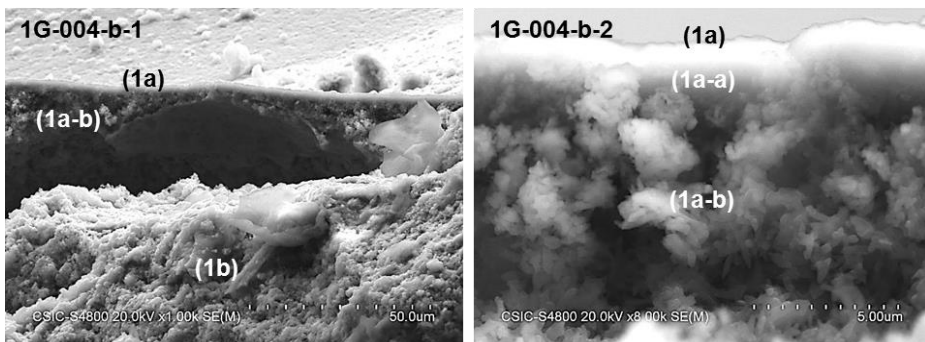
Figura 165. Imágenes de electrones retrodispersados (BSK) de la microestructura del mortero con la adición del 0,5% de goma tragacanto (TG): 0.5TG-001-a-1 (3500x); 0.5TG-001-a-2 (3500x); 0.5TG-001-a-3 (3500x)

#### *Mortero con la adición del 1% de goma guar (1G) a 365 días de edad*

La caracterización de la microestructura del mortero con la adición del 1% de goma guar (G) nos determina, por un lado, que la zona 1, ya definida en los tipos anteriores, se subdivide en cuatro subzonas, nombradas (1a), (1a-a), (1a-b) y (1b). La subzona (1a) continúa siendo la definida como *estrato superficial gel* y presenta una textura continua formada por aglomerados de partículas irregulares de morfología amebiodé; la subzona (1a-a) se define como *exudado de la goma* en la superficie del mortero. Esta sin embargo, queda atrapada por debajo del estrato superficial gel; la subzona (1a-b) se define como *nucleación de las sales cálcicas*, compuesta por partículas prismáticas piramidales de composición desconocida. Su formación es posible que se origine por la precipitación y la nucleación heterogénea de varios tipos de carbonatos, mayoritariamente cálcicos. El proceso se origina cuando se produce una sobresaturación de la disolución que se forma por debajo de las capas superiores. En este momento, se produce el crecimiento de los cristales de

calcita por encima de otras impurezas que están en la dispersión y que actúan como núcleos de crecimiento cristalino. Estas impurezas pueden ser también la propia goma, que al mismo tiempo favorezca la interacción o la reacción química entre ambos compuestos, formándose sales cálcicas; la subzona (1b) que se define en otras muestras como *estrato microcristalino*, que en este caso, presenta una textura muy masiva, nodulosa y microporosa. Este hecho se produce porque la goma envuelve la textura microcristalina que se observa en el mortero testigo (T), por este mismo tipo de subzona. A parte, se aprecia una separación clara entre la subzona (1a-b) y la subzona (1b). Hay que destacar que en la imagen de la figura 166 – 1G-004-b-1 se puede observar un macroporo de aire atrapado, en la interfase de la subzona (1a-b) respecto la subzona (1b) y restos de goma guar en forma de film (Figura 166 – 1G-004-b-1; 1G-004-b-2 y 1G-004-b-3).

Por otro lado, la zona (3) presenta una microestructura diferente a la del mortero con la adición del 0,5% de goma guar (G), constituida por partículas y agregados irregulares estratificados y en escamas, con algunos aglomerados o grupos de goma y cal de distribución irregular. En esta zona (3) se aprecia muy bien como la goma guar envuelve los agregados de micropartículas del mortero (Figura 166 – 1G-004-b-4). Si se observan, en detalle, estos aglomerados o grupos envueltos de la goma guar, se aprecia una segregación gelatinosa formada por partículas que tienen una forma amebioide o globular. Este hecho se puede producir por la sobresaturación de la fase coloidal de la goma dispersa en el mortero, que consecuentemente forma una fase geliforme que se segrega del resto de la microestructura del mortero (Figura 166 – 1G-004-b-5 y 1G-004-b-6).



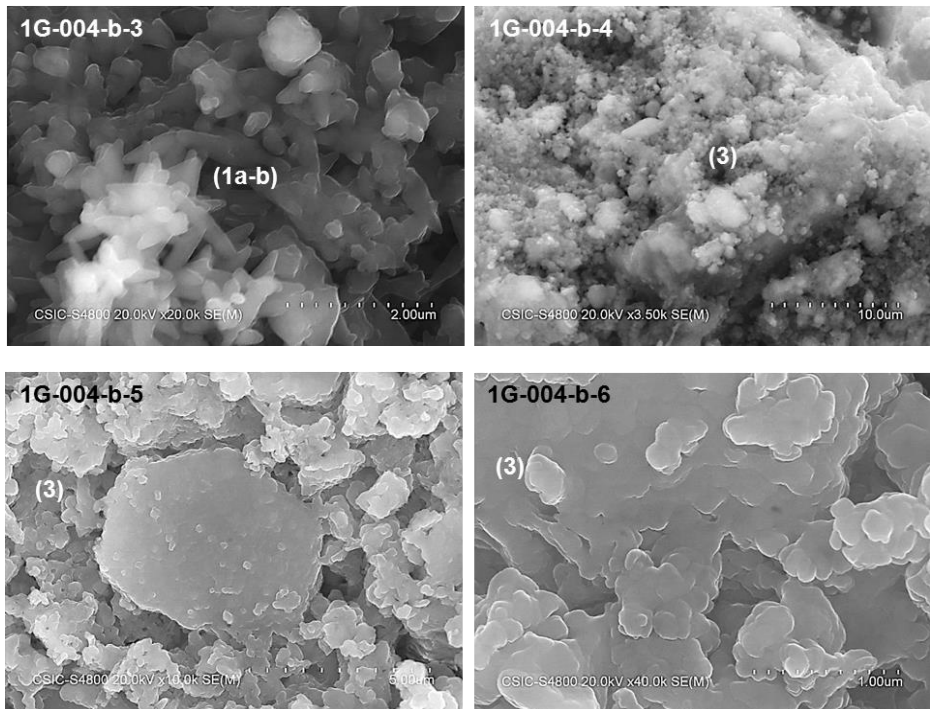


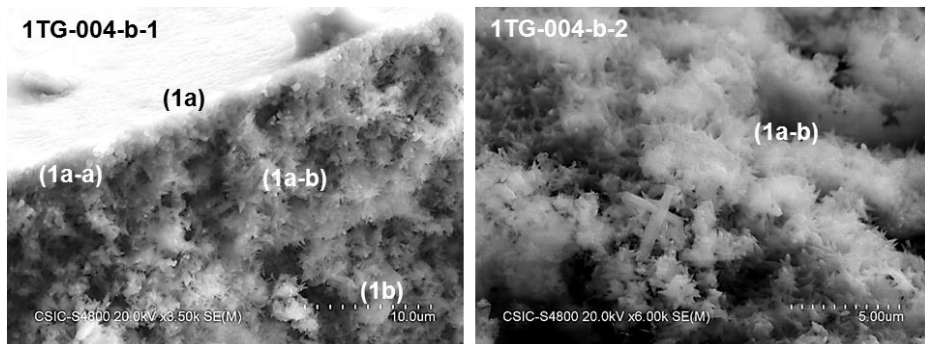
Figura 166. Imágenes de electrones retrodispersados (BSK) de la microestructura del mortero con la adición del 1% de goma guar (G): 1G-004-b-1 (1000x); 1G-004-b-2 (8000x); 1G-004-b-3 (detalle de la 1G-004-b-2 a 20000x); 1G-004-b-4 (3500x); 1G-004-b-5 (10000x); 1G-004-b-6 (detalle de la 1G-004-b-5 a 40000x)

#### *Mortero con la adición del 1% de goma tragacanto (1TG) a 365 días de edad*

La caracterización de la microestructura del mortero con la adición del 1% de goma tragacanto (TG) nos determina, por un lado, que la zona 1 establecida se subdivide en cuatro subzonas, nombradas (1a), (1a-a), (1a-b) y (1b). La subzona (1a) continúa siendo la definida como *estrato superficial gel* y presenta una textura continua formada por aglomerados de partículas irregulares de morfología amebiode; la subzona (1a-a) se define como *exudado de la goma* en la superficie del mortero. Esta sin embargo, queda atrapada por debajo del estrato superficial gel; la subzona (1a-b) se define como *nucleación de las sales cálcicas*, compuesta por partículas de tipo *fluffy* (partículas aciculares) de composición desconocida. Su formación es posible que se origine por la precipitación y la nucleación heterogénea de varios tipos de carbonatos, mayoritariamente cálcicos. El proceso se origina cuando se produce una sobresaturación de la disolución. En este momento, se produce el crecimiento

de los cristales de calcita encima de otras impurezas que están en la dispersión. Estas impurezas pueden ser la propia goma, que al mismo tiempo favorezca la interacción entre ambos compuestos, formándose sales cálcicas. A parte, se observan cristales prismáticos rellenando los poros. Esta subzona mide aproximadamente 12  $\mu\text{m}$ ; la subzona (1b) que se define en otras muestras como *estrato microcristalino*, en este caso, presenta una textura muy masiva y nodulosa, ya que la goma recubre superficialmente, la textura microcristalina definida por esta subzona en el mortero testigo (T) (Figura 167 – 1TG-004-b-1 y 1G-004-b-2).

Por otro lado, la zona (3) presenta una textura microcristalina interlaminar. La goma de tragacanto rompe la microestructura disponiéndola en láminas. Se puede observar que el aumento de la proporción de la goma favorece la generación de la estratificación de la microestructura del mortero (Figura 167 – 1TG-004-b-6). A parte, la observación de la microestructura del mortero, a pocos aumentos, deja ver vacuolas dispersadas por todo el mortero. Este hecho es debido a la incorporación de aire que propicia la adición de esta goma, ya determinado en el mortero en estado fresco. Este aire queda atrapado dentro de la microestructura del mortero propiciando la formación de estas vacuolas (Figura 167 – 1TG-004-b-3 y 1TG-004-b-4). Para terminar, se observan microfisuras de contracción provocadas mientras el mortero se evapora (Figura 167 – 1TG-004-b-5).



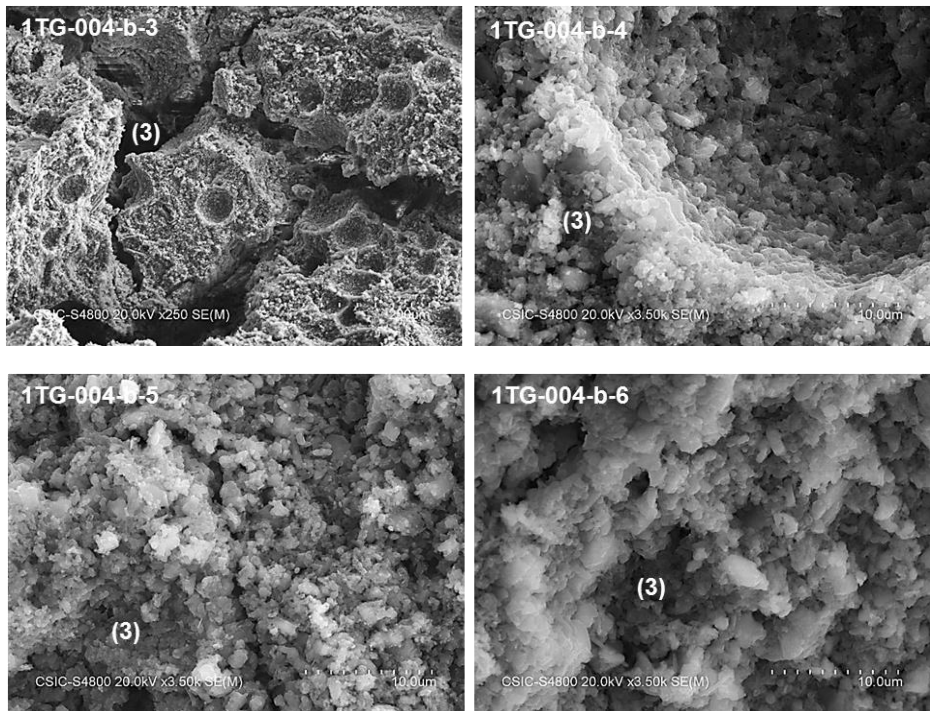


Figura 167. Imágenes de electrones retrodispersados (BSK) de la microestructura del mortero con la adición del 1% de goma tragacanto (TG): 1TG-004-b-1 (3500x); 1TG-004-b-2 (6000x); 1TG-004-b-3 (250x); 1TG-004-b-4 (3500x); 1TG-004-b-5 (3500x); 1TG-004-b-6 (3500x)

*Mortero con la adición del 2% de goma guar (2G) a 365 días de edad*

La caracterización de la microestructura del mortero con la adición del 2% de goma guar (G) nos determina, una microestructura zonada muy semejante al mortero con la adición del 1% de goma (1G) (Figura 168 – 2G-005-b-1 y 2G-005-b-2). Pero hay que destacar que, a medida que aumenta la proporción de la goma, la espesura de la subzona (1a-b) aumenta. Este hecho sustenta la hipótesis planteada hasta el momento, que argumenta que la posible formación de las partículas prismáticas piramidales de la subzona (1a-b) estuviera propiciada por la presencia de la goma (Figura 168 – 2G-005-b-1 y 2G-005-b-2).

Por otro lado, la zona (3) presenta una textura microcristalina y microporosa que, en conjunto, presenta cierta alineación subparalela de las partículas y de los agregados en estratos y en escamas. En esta zona (3) se aprecia también

como la goma guar envuelve los agregados aglomerados de la microestructura del mortero (Figura 168 – 2G-005-b-3). Además, hay que destacar que, a pesar de la presencia de los aditivos y de su distribución irregular en la microestructura del mortero, a continuación, se presenta la imagen de un grano de árido donde se aprecia su forma angulosa y su buena adherencia con la pasta del mortero, que nos indica el buen funcionamiento de la cal en pasta como matriz conglomerante (Figura 168 – 2G-005-b-4).

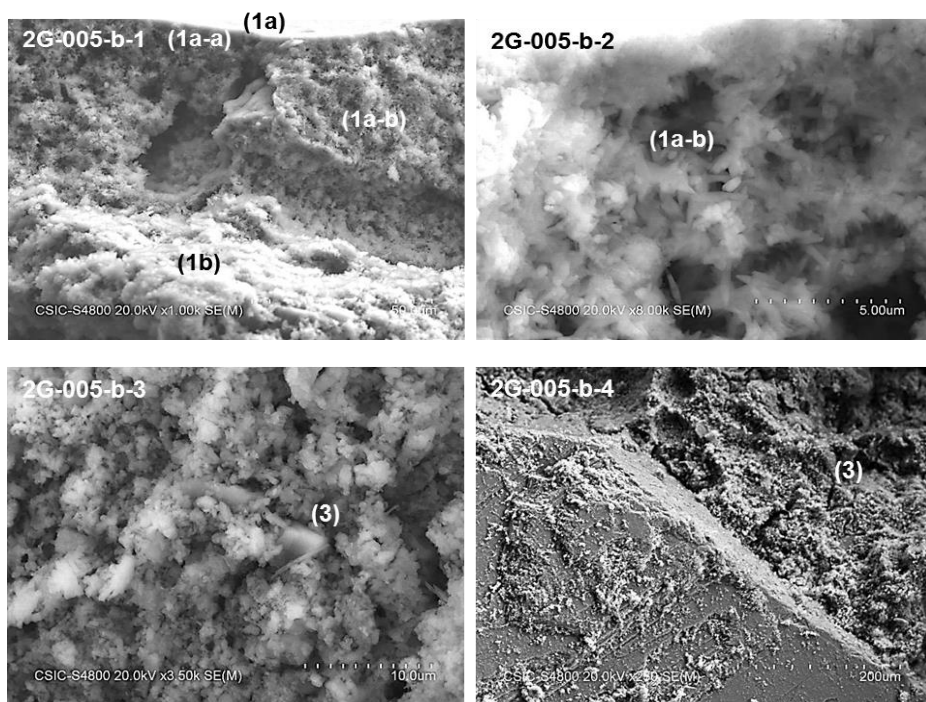


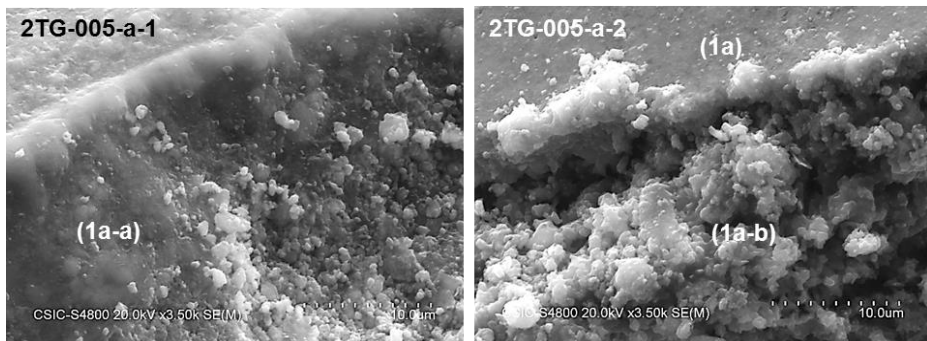
Figura 168. Imágenes de electrones retrodispersados (BSK) de la microestructura del mortero con la adición del 2% de goma guar (G): 2G-005-b-1 (1000x); 2G-005-b-2 (8000x); 2G-005-b-3 (3500x); 2G-005-b-4 (250x)

#### *Mortero con la adición del 2% de goma tragacanto (2TG) a 365 días de edad*

La caracterización de la microestructura del mortero con la adición del 2% de goma tragacanto (TG) nos determina, por un lado, que la zona 1 establecida se subdivide en cuatro subzonas, nombradas (1a), (1a-a), (1a-b) y (1b), aunque en este caso no están tan definidas como en las otras familias de morteros ensayadas. La subzona (1a) continúa siendo la definida como *estrato superficial gel* y presenta una textura continua formada por aglomerados de

partículas irregulares de morfología amebioide; la subzona (1a-a) se define como *exudado de la goma* en la superficie del mortero. Esta pero queda atrapada por debajo del estrato superficial gel. Hay que destacar que se observan zonas donde el exudado de la goma tragacanto excede de las subzonas definidas y se segrega por el mortero, no interacciona tanto con el mortero (Figura 169 – 2TG-005-a-1); la subzona (1a-b) definida como *nucleación de las sales cálcicas*, en este caso, está muy poco definida y no se observa tanta interacción con la goma como en los otros morteros de las familias ensayados. Concretamente, en zonas determinadas del mortero, se observa esta subzona compuesta de escamas que van recubriendo la microestructura por áreas, de composición desconocida (Figura 169 – 2TG-005-a-2). Su formación es posible que se origine por la precipitación y la nucleación heterogénea de varios tipos de carbonatos, mayoritariamente cálcicos; la subzona (1b) que se define en otras muestras como *estrato microcristalino*, en este caso, presenta una textura muy masiva y nodulosa, ya que la goma recubre superficialmente, la textura microcristalina definida para esta subzona en el mortero testigo (T) (Figura 169 – 1TG-004-b-1 y 1G-004-b-2).

Por otro lado, la zona (3) presenta una textura microcristalina más estratificada. Se puede observar que el aumento de la proporción de la goma favorece la generación de la estratificación de la microestructura del mortero. La proporción de la goma es tan grande que prácticamente se observan estratos compuestos únicamente por goma tragacanto (Figura 169 – 1TG-004-b-4).



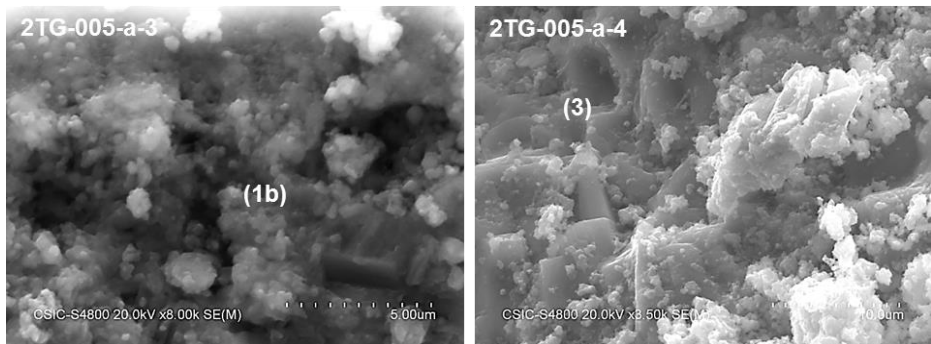


Figura 169. Imágenes de electrones retrodispersados (BSK) de la microestructura del mortero con la adición del 2% de goma tragacanto (TG): 2TG-005-a-1 (3500x); 2TG-005-a-2 (3500x); 2TG-005-a-3 (8000x); 2TG-005-a-4 (3500x)

#### 2.1.3.4. Caracterización de la durabilidad del mortero

##### 2.1.3.4.1. Determinación de la resistencia al hielo-deshielo

Con este ensayo se determina la resistencia que muestran los morteros ensayados a ciclos de congelación al aire y deshielo en agua, tanto del mortero testigo (T) como del mortero con la adición de las gomas (G y TG). Este ensayo se lleva a término con una cantidad variable de probetas prismáticas de cada familia de mortero ensayada, dependiendo de la disponibilidad, asegurando la reproducibilidad, entre dos y tres probetas de cada familia. Las probetas tienen 365 días de edad.

A continuación, se presentan las tablas (Tabla 62 y 63) de los resultados de la determinación de la resistencia al hielo-deshielo de los morteros ensayados.

La tabla 62 hace referencia a los resultados de la medida de la *inspección visual*. Después de examinar todas las caras y los bordes de las probetas, a lo largo de los 15 ciclos que dura el ensayo se determina que las probetas del mortero testigo (T) y las probetas del mortero con la adición del 1,5% de goma tragacanto (TG) muestran un deterioro significativo<sup>182</sup> en el ciclo 7. A partir de este ciclo el deterioro de las probetas evoluciona de manera similar, pero hay que destacar que las proporciones del 0,5% y del 2% de ambas gomas (G y TG) son las probetas que resisten mejor al paso de los ciclos de hielo-deshielo

<sup>182</sup> Cuando la inspección visual llega a la clasificación 3 se determina que el material sufre un deterioro significativo.



y las probetas del mortero testigo (T) se deterioran a mayor velocidad que las probetas adicionadas con las gomas (G y TG).

Tabla 62. Evolución cualitativa a partir de la inspección visual de los morteros durante los ciclos de hielo-deshielo. Acrónimo: i.v: inspección visual

	<b>CICLO 1</b>	<b>CICLO 4</b>	<b>CICLO 7</b>	<b>CICLO 10</b>	<b>CICLO 13</b>	<b>CICLO 15</b>
	i.v	i.v	i.v	i.v	i.v	i.v
<b>T</b>	0-1	2-3	3	4	4	4
<b>0.5G</b>	0	0-1	2	2-3	3	3
<b>1G</b>	0	1-2	2	2-3	3	3
<b>1.5G</b>	0	1-2	2	2-3	3	3
<b>2G</b>	0	0-1	1	2	2-3	3
<b>0.5TG</b>	0	1	2	2	2-3	3
<b>1TG</b>	0-1	1-2	2-3	3	3	3
<b>1.5TG</b>	0-1	2-3	3	3	3-4	4
<b>2TG</b>	0	1-2	2	2-3	3	4

*Clasificación de los grados de deterioro de las probetas:*

0 → probeta intacta.

1 → daños mínimos (redondeos mínimos de los bordes) que no comprometan la integridad de la probeta.

2 → una o diferentes fisuras pequeñas (< 0,1 mm de anchura) o ruptura de pequeños fragmentos (<10 mm<sup>2</sup>, por fragmento).

3 → una o diferentes fisuras, agujeros o ruptura de fragmentos de mayor tamaño que los definidos en la escala 2, o alteración del material en vetas.

4 → probeta rota en dos o con grandes grietas.

5 → probeta rota en trozos o desintegrada.

La tabla 63 hace referencia a los resultados de la medida de los *cambios de peso de las probetas*. La medida de los cambios de peso de las probetas durante los ciclos de hielo-deshielo del ensayo hace posible calcular el porcentaje de variación de peso respecto el peso inicial de las probetas ensayadas. Como se puede observar los resultados nos indican que las probetas que aumentan más rápidamente de peso son las del mortero testigo (T), respecto de las probetas de mortero con la adición de las gomas (G y TG). A parte, estos resultados nos vuelven a mostrar que las probetas adicionadas con una proporción del 0,5% y del 2% son las que se mantienen más inalterables hasta el ciclo 7 y son las que tienen menos aumento de peso al llegar al ciclo 15. Aunque, el porcentaje del aumento de peso de las probetas con un el 2% de goma tragacanto (TG) se dispara un poco a la recta final del ensayo, respecto el porcentaje del 2% de goma guar (G), que es el valor menor de la tabla 63 al finalizar el ensayo. Para terminar, si se compara el aumento de

peso de las probetas con la adición de la goma guar (G) respecto el aumento de peso de las probetas con la adición de goma tragacanto (TG), las que se mantienen durante todo el ensayo con valores de porcentaje menores son las probetas con la adición de la goma guar (G).

Tabla 63. Cambios de peso de los morteros durante los ciclos de hielo-deshielo. Acrónimos:  $\Delta M_{sat(n)}$  (%): incremento o aumento de la masa saturada en cada ciclo en concreto (%); -: no detectado aumento de peso

	<b>CICLO 1</b>	<b>CICLO 4</b>	<b>CICLO 7</b>	<b>CICLO 10</b>	<b>CICLO 13</b>	<b>CICLO 15</b>
	$\Delta M_{sat(n)}$ (%)	$\Delta M_{sat(n)}$ (%)	$\Delta M_{sat(n)}$ (%)	$\Delta M_{sat(n)}$ (%)	$\Delta M_{sat(n)}$ (%)	$\Delta M_{sat(n)}$ (%)
<b>T</b>	-	+7,99	+33,54	+69,51	+87,03	+93,41
<b>0.5G</b>	-	-	+6,43	+21,56	+44,47	+56,91
<b>1G</b>	-	+0,02	+20,08	+37,50	+59,26	+69,37
<b>1.5G</b>	-	+0,53	+13,76	+22,20	+45,98	+56,08
<b>2G</b>	-	-	-	+9,05	+22,35	+37,67
<b>0.5TG</b>	-	-	+7,06	+19,62	+43,37	+54,59
<b>1TG</b>	-	+4,03	+19,94	+39,19	+59,32	+71,62
<b>1.5TG</b>	-	+7,63	+24,54	+53,21	+73,78	+83,18
<b>2TG</b>	+0,05	+1,78	+15,47	+32,96	+49,77	+67,79

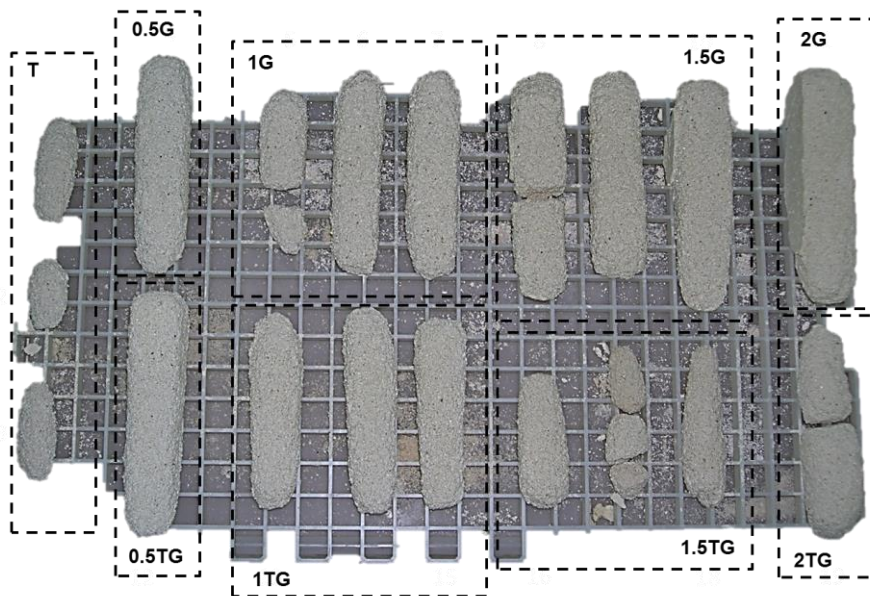


Figura 170. Aspecto final de las probetas de las familias de los morteros ensayados (T, 0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG, 2TG) al finalizar el ciclo 15

A nivel general, el deterioro por la acción mecánica del hielo empieza por la pérdida progresiva de las superficies de las probetas en forma de placas. Este deterioro se puede correlacionar con las subzonas definidas con el estudio de la microestructura del mortero mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM) y asignar que el material que se pierde con las escamas corresponde a la subzona (1a), (1a-a) y (1a-b), es decir, el *estrato superficial gel*, el *exudado de la goma* y la *nucleación de las sales cálcicas*, respectivamente, ya que en algunas muestras de morteros analizadas ya se observa una falta de adherencia de estas subzonas con la subyacente, la subzona (1b). A partir de aquí, el deterioro de las probetas sigue con una pérdida granular progresiva, que se traduce en una descohesión del mortero, que se incrementa a medida que van pasando los ciclos, tal como se muestra en la figura 170.

Otro factor muy importante que puede explicar estos resultados con la adición de las gomas (G y TG) es la creación de una estructura entrelazada del polímero y su unión a las partículas de la cal (consultar la figura 161), ya explicada en el apartado anterior correspondiente a la porosimetría por intrusión de mercurio y confirmada en la observación mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM), dado que esta microestructura reduce la porosidad accesible al agua y aumenta el porcentaje de la macroporosidad, según los resultados de la porosimetría por intrusión de mercurio. Así pues, el conjunto de todos estos factores reduce la porosidad accesible al agua y como consecuencia, el aumento de peso por penetración del agua, en los sucesivos ciclos, es menor. Asimismo como consecuencia, también el efecto mecánico del hielo se reduce, por dos razones, el aumento de tamaño o diámetro del poro<sup>183</sup> (Esbert, R. *et al.*, 1997) y la misma reducción de volumen de la porosidad accesible al agua.

Posiblemente, aún existe otro factor que afecta a la durabilidad de los morteros ensayados: la incorporación de burbujas de aire, que generan las gomas independientemente de la formación de los macroporos que da la microestructura entrelazada del polímero. En efecto, esta diferencia tan marcada respecto de las probetas de los morteros con la adición de las gomas (G y TG) viene dada por la incorporación de aire al mortero que propician estas gomas, determinado con los ensayos del mortero en estado fresco y corroborado con las imágenes de la observación de la microestructura del mortero mediante la microscopía electrónica de barrido. Las burbujas de aire ayudan a que el mortero absorba los cambios de volumen que experimenta el agua al pasar de estado hielo a líquido con más facilidad. Dicho de otra

---

<sup>183</sup> Según Esbert, R. *et al.* (1997): "Las presiones de cristalización son inversamente proporcionales al tamaño del poro y a las fisuras. Así las rocas con grandes poros son generalmente menos sensibles a las heladas, que las que contienen poros pequeños".

manera, las burbujas de aire permiten que el agua se expanda durante el proceso de congelación sin dañar la estructura del mortero (Figura 171).

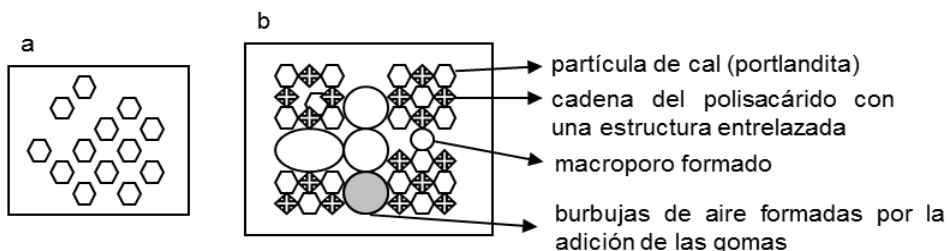


Figura 171. Esquema de la microestructura del mortero, de izquierda a derecha: a. microestructura del mortero sin aditivo; b. microestructura del mortero con la adición de las gomas (G y TG) y con la incorporación de burbujas de aire

#### 2.1.3.4.2. Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos

El ensayo de la determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos tiene como objetivo determinar la uniformidad y la cohesión interna del mortero, la presencia de fisuras o agujeros y posibles cambios de las propiedades que pueda experimentar, en cada ciclo de hielo-deshielo. La velocidad se mantiene o presenta pocas variaciones cuanto más uniforme y cohesionado internamente está la probeta del mortero. Del seguimiento que se realiza durante el ensayo que nos ocupa se desprenden los resultados presentados en la tabla 64 siguiente:

Tabla 64. Velocidades de los impulsos ultrasónicos determinadas en cada ciclo hielo-deshielo de las probetas de las familias de los morteros ensayadas. Acrónimos: V (mm/μs): velocidad del impulso ultrasónico (mm/μs); -: impulso ultrasónico no determinado porque las superficies de medida se han perdido. Entre paréntesis se presenta la desviación estándar de los resultados obtenidos.

	<b>CICLO 0</b>	<b>CICLO 1</b>	<b>CICLO 4</b>	<b>CICLO 7</b>	<b>CICLO 10</b>	<b>CICLO 13</b>	<b>CICLO 15</b>
	V (mm/μs)	V (mm/μs)	V (mm/μs)	V (mm/μs)	V (mm/μs)	V (mm/μs)	V (mm/μs)
<b>T</b>	1,42 (0,02)	1,22 (0,03)	0,94 (0,05)	-	-	-	-
<b>0.5G</b>	1,57 (0,01)	1,50 (0,01)	1,37 (0,01)	1,08 (0,01)	0,90 (0,01)	0,43 (0,01)	-
<b>1G</b>	1,42 (0,02)	1,32 (0,03)	0,91 (0,06)	0,74 (0,08)	0,34 (0,01)	-	-
<b>1.5G</b>	1,43 (0,02)	1,32 (0,03)	1,00 (0,06)	0,82 (0,06)	0,52 (0,03)	-	-

<b>2G</b>	1,53 (0,01)	1,46 (0,01)	1,29 (0,01)	0,93 (0,01)	0,80 (0,01)	-	-
<b>0.5TG</b>	1,53 (0,01)	1,51 (0,01)	1,36 (0,01)	1,06 (0,01)	0,92 (0,01)	0,50 (0,01)	-
<b>1TG</b>	1,32 (0,04)	1,18 (0,01)	0,94 (0,06)	0,79 (0,01)	0,47 (0,06)	-	-
<b>1.5TG</b>	1,23 (0,01)	1,03 (0,02)	0,82 (0,01)	0,65 (0,02)	-	-	-
<b>2TG</b>	1,42 (0,01)	1,22 (0,01)	0,79 (0,01)	0,69 (0,01)	0,35 (0,01)	-	-

Las velocidades de los impulsos ultrasónicos resultantes nos indican que al inicio del ensayo los morteros no presentan claras diferencias entre ellos. Por tanto, en conjunto se puede determinar que son morteros similares. Hasta el ciclo 7, que es donde se observan mejor las diferencias de comportamiento frente a la acción del hielo. En este ciclo, los morteros con la adición del 0,5% y del 2%, sobre todo de goma guar (G) presentan una menor disminución de las velocidades de los impulsos ultrasónicos y por tanto, una mayor cohesión interna. Este hecho, coincide con los resultados de los ensayos anteriores que indican una mayor resistencia a los ciclos de hielo-deshielo de estas probetas.

En conjunto los valores de la velocidad del impulso ultrasónico de los morteros con la adición de la goma tragacanto (TG) son menores que los valores de la goma guar (G). Eso nos indica que la microestructura interna del mortero con la adición de goma tragacanto (TG) disminuye más rápidamente su cohesión interna con los sucesivos ciclos de hielo-deshielo. Estos resultados se correlacionan con la microestructura estratificada observada, mediante la microscopía electrónica de barrido, de los morteros con la adición de goma tragacanto (TG). Este tipo de microestructuras estratificada dificulta el paso del impulso ultrasónico por la estructura del mortero, obteniendo valores menores de velocidad.

A partir de aquí, a medida que van aumentando los ciclos de hielo-deshielo las velocidades van disminuyendo progresivamente. Las probetas del mortero testigo (T) son las primeras al perder totalmente la forma prismática para poder medir con fiabilidad el impulso ultrasónico (al ciclo 7). Para terminar, hay que destacar de nuevo, que las probetas con la adición del 0,5%, tanto de la goma guar (G) como de la goma tragacanto (TG), son las que mantienen la forma prismática más tiempo, hasta el ciclo 13, y permiten observar mejor las diferencias con las otras probetas con proporciones diferentes.

En general, las razones de este comportamiento frente a la propagación de los impulsos ultrasónicos se debe a los mismos factores que nos hacen comprender la resistencia a la acción del hielo-deshielo (Figura 172): la

microestructura entrelazada (*entanglement*) y/o entrecruzada (*cross-linking*) del polímero y su unión a las partículas de cal ya descrita, que propicia la adición de gomas al mortero. Este hecho, da al mortero una mayor cohesión y uniformidad interna y, además modifica la porosidad favoreciendo la resistencia a la acción del hielo. Esta tendencia se ve reforzada por la formación de burbujas debido a la incorporación de aire al mortero que propician estas gomas.

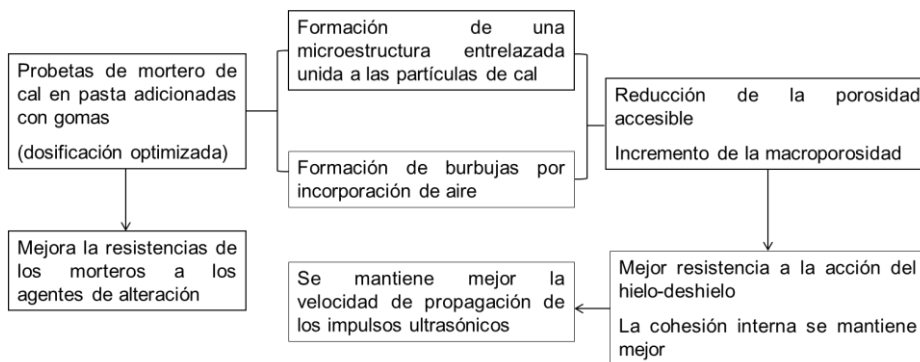


Figura 172. Esquema resumen de la discusión y de los resultados de la determinación de la resistencia al hielo-deshielo y de la determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos








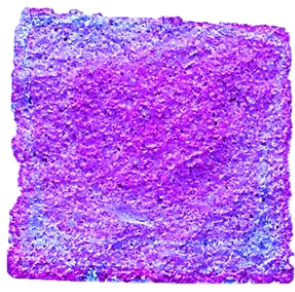

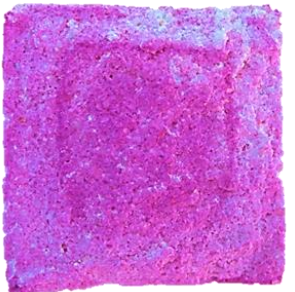


### 2.1.3.5. Evolución y control del proceso de la carbonatación

#### 2.1.3.5.1. Determinación de la resistencia y de la profundidad a la carbonatación

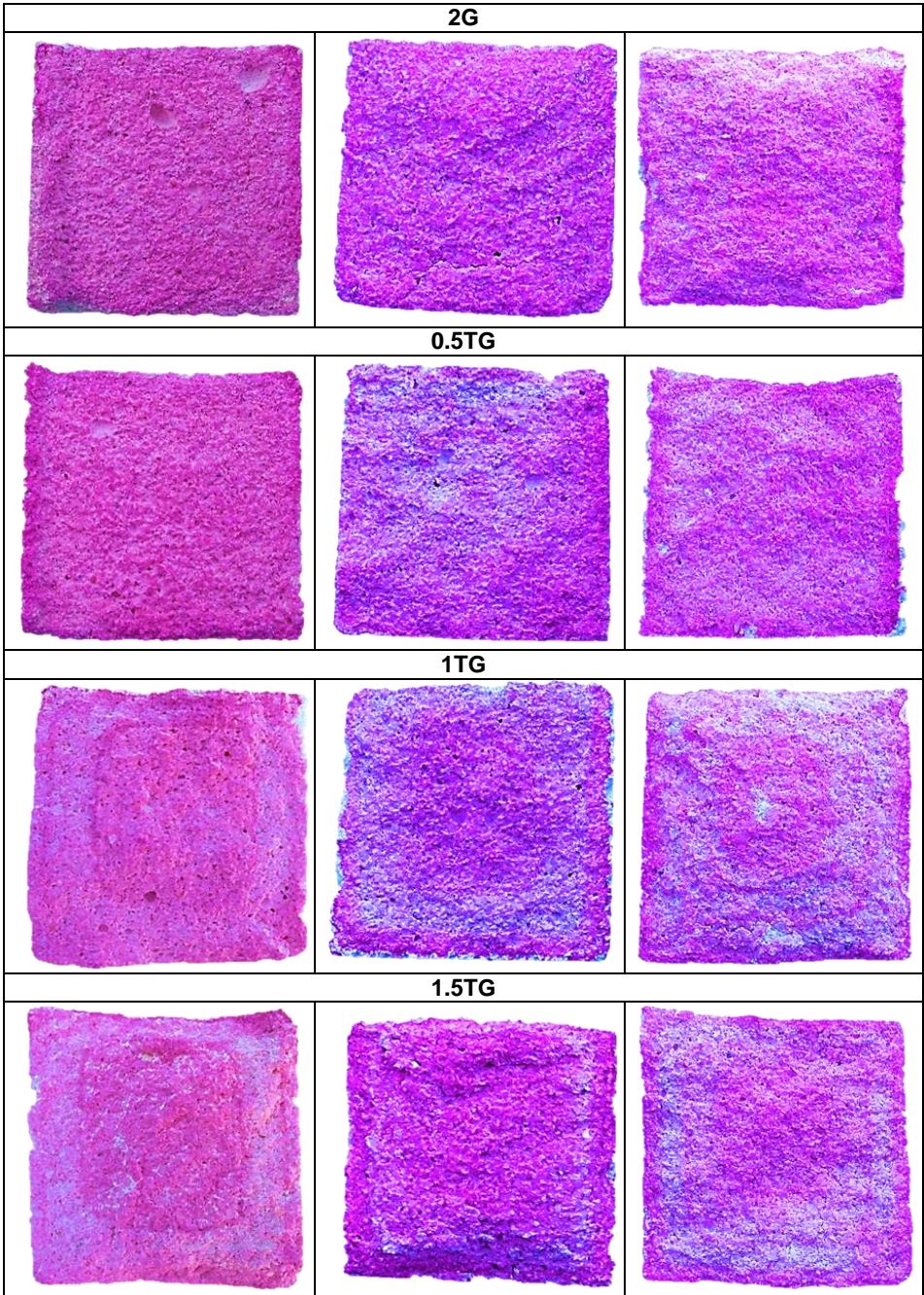
El objetivo del ensayo es determinar, mediante el test de la fenolftaleína, la resistencia que muestran los morteros ensayados a la carbonatación y determinar los frentes de carbonatación de las diferentes familias de morteros ensayados, a diferentes edades (a 180 días, a 270 días y a 365 días).

Los resultados del ensayo se muestran en la tabla 65 siguiente:

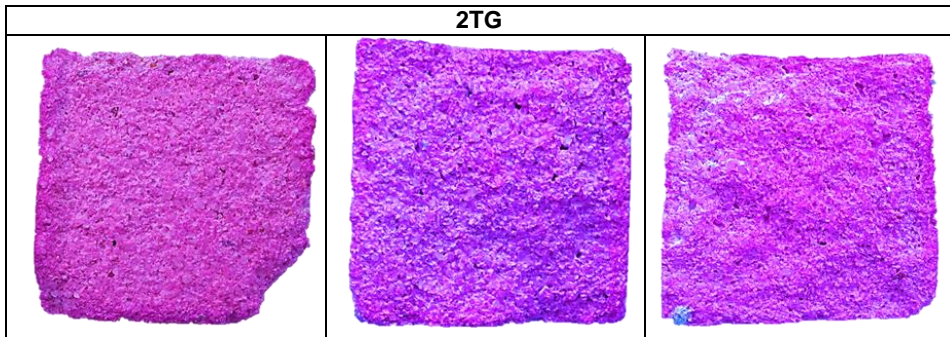
Tabla 65. Resultados de la resistencia y de la profundidad a la carbonatación a través del test de la fenolftaleína de las diferentes familias de los morteros ensayadas (T, 0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG y 2TG) a 180 días, a 270 días y a 365 días de edad

180 días de edad	270 días de edad	365 días de edad
<b>T</b>		
		
<b>0.5G</b>		
		
<b>1G</b>		
		
<b>1.5G</b>		
		









El test de tinción con fenolftaleína es una técnica cualitativa que nos indica el pH. Eso nos permite diferenciar la presencia de portlandita de alta basicidad ( $\text{pH} > 8$ ), la cual se tiñe dando tonalidades violetas, de la calcita que al disminuir el pH ( $\text{pH} < 8$ ) produce un área sin tinción. La presencia de tonalidades intermedias, rosadas, nos indican la mezcla de las dos composiciones. Esta técnica nos permite por tanto observar el grado de carbonatación de los morteros ensayados y su evolución a lo largo del tiempo.

La carbonatación avanza desde el exterior, con la penetración de dióxido de carbono del aire, hacia el interior. Este primer momento de carbonatación, da inicialmente una corona externa y perimetral que se destiñe cuando se carbonata y que irá avanzando progresivamente, de manera más o menos regular, hacia el núcleo interno de la probeta de mortero ensayado. Este proceso de carbonatación estándar se corresponde al MODELO TIPO 1 que define Cazalla, O. (2002) en su tesis doctoral. No obstante, en nuestro caso, se puede observar una fina capa superficial teñida, que se puede asociar a la formación del *estrato superficial gel* (subzona 1a) definido en la observación de los morteros mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM).

Pero la carbonatación es un proceso complejo especialmente en los morteros de cal en pasta, donde se produce la formación de una dispersión coloidal intersticial, que se debe por dos razones: en primer lugar, se debe al tamaño muy pequeño de los cristales de portlandita que componen la cal en pasta; en segundo lugar, se debe a la imbibición<sup>184</sup> de las partículas de cal en una disolución saturada de los iones de la disolución de la portlandita, similar al agua de cal saturada o a la lechada de cal (Cizer, O. *et al.*, 2012). Además, hay que tener en cuenta el tamaño del radio de los poros de este tipo de morteros, de unos  $0,2 \pm 0,1 \mu\text{m}$ , que es muy pequeño, lo cual condiciona la difusión de los reactivos. Así pues, el dióxido de carbono disuelto en agua y los iones

<sup>184</sup> La imbibición se define como el desplazamiento de un fluido por otro fluido inmiscible.

resultantes de la disolución de la portlandita se van difundiendo a través de una dispersión coloidal que rellena el sistema poroso del mortero. De esta manera, en la medida en que evoluciona en el tiempo el mortero, el resultado es la formación de una estructura en anillos o bandas concéntricas de tinción, que recuerdan los nombrados Anillos de Liesegang<sup>185</sup>, nombrados por Cazalla, O. (2002) y que la investigadora define como MODELO TIPO 2 de carbonatación. Es decir, se producen unas bandas paralelas de carbonatación intercaladas entre bandas no carbonatadas, distribuidas en una secuencia periódica. En el mismo sentido, si no se produce ningún cambio en la tinción y se mantiene teñida toda la superficie se puede determinar que se trata del MODELO TIPO 0, modelo definido en caso de que el mortero ensayado presenta una escasa carbonatación. Además, también en nuestro caso se observa una situación intermedia o menos definida, donde no se producen los Anillos de Liesegang. El que se puede observar es la aparición de un punteado en blanco o pequeños puntos desteñidos sobre un fondo de tinción menos intensa o de tonalidad rosada. Esta situación nos indica un momento del proceso de carbonatación donde conviven la calcita y la portlandita dispersas por toda la masa del mortero. Esta situación de carbonatación se define como MODELO TIPO 2 BIS, dado que se ha dado una carbonatación interna pero muy dispersa e incompleta.

A parte, el proceso de carbonatación de los morteros, a lo largo del tiempo, es un proceso continuo que debería evolucionar desde el MODELO TIPO 0 al MODELO TIPO 2, o según el caso, se daría la situación definida como MODELO TIPO 2 BIS. En nuestro caso, se utiliza la evolución de la carbonatación del mortero testigo (T) como patrón para desarrollar la evolución de la carbonatación de los morteros con la adición de las gomas (G y TG). Por tanto, siguiendo este hilo argumental, el hecho de que el mortero testigo (T), a 180 días de edad, ya presenta una marcada carbonatación externa que corresponde al MODELO TIPO 1, nos permite decir que los morteros con la adición del 0,5% y del 2% tanto de goma guar (G) como de goma tragacanto (TG), retrasan la carbonatación. En contraposición, de los morteros con la adición del 1% y del 1,5% de goma guar (G) y los morteros con la adición del 1% de goma tragacanto (TG) que parecen ir, tanto o más rápido carbonatándose, respecto el mortero testigo (T). Para terminar, nombrar los morteros con la adición del 1,5% de goma tragacanto (TG), los cuales

---

<sup>185</sup> Cito textualmente de Cazalla, O. (2002): "Anillos de Liesegang, término que se aplica a estructuras periódicas caracterizadas por una serie de bandas de precipitación generalmente concéntricas (aunque existen otras geometrías como bandas paralelas y espirales) separadas por espacios vacíos de precipitado, formadas por precipitación periódica y rítmica (<http://www.fasthealth.com>). Este fenómeno fue descubierto por el químico alemán Raphael Eduard Liesegang (1869-1947) investigando las reacciones que ocurren en los geles utilizados como soporte de placas fotográficas".

evolucionan de manera muy semejante o un poco más retrasados, respecto el mortero testigo (T) (Tabla 66).

Tabla 66. Modelos de los tipos de tinción que presentan las diferentes familias de los morteros ensayadas (T, 0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG y 2TG), a través del test de la fenolftaleína, a 180 días, a 270 días y a 365 días de edad

	<b>180 días</b>	<b>270 días</b>	<b>365 días</b>
<b>T</b>	MODELO TIPO 1	MODELO TIPO 2	MODELO TIPO 2
<b>0.5G</b>	MODELO TIPO 0	MODELO TIPO 2 BIS	MODELO TIPO 2 BIS
<b>1G</b>	MODELO TIPO 2	MODELO TIPO 2	MODELO TIPO 2
<b>1.5G</b>	MODELO TIPO 2	MODELO TIPO 2	MODELO TIPO 2
<b>2G</b>	MODELO TIPO 0	MODELO TIPO 2 BIS	MODELO TIPO 2 BIS
<b>0.5TG</b>	MODELO TIPO 0	MODELO TIPO 2 BIS	MODELO TIPO 2 BIS
<b>1TG</b>	MODELO TIPO 2	MODELO TIPO 2	MODELO TIPO 2
<b>1.5TG</b>	MODELO TIPO 1	MODELO TIPO 2	MODELO TIPO 2
<b>2TG</b>	MODELO TIPO 0	MODELO TIPO 2 BIS	MODELO TIPO 2 BIS

De toda manera, hay que tener en cuenta que la fenolftaleína no es un reactivo específico del carbonato cálcico, por tanto no es un indicador químico de la formación real de este compuesto químico ( $\text{CaCO}_3$ ) y menos aún, de la formación del mineral de la calcita, es decir, del verdadero proceso de carbonatación. Así pues, hay que especificar que existen diferentes factores que podrían interferir en el test de la fenolftaleína: la interrelación física o química de las gomas con la tinción de la fenolftaleína, la formación de carbonatos cálcicos o de minerales cálcicos hidratados no cristalinos o geliformes y la formación de sales cálcicas, dadas por la reacción de las gomas con la cal, ya observadas mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM). Por este motivo, es necesario realizar otros tipos de ensayos para determinar el proceso de carbonatación, como puede ser la caracterización química mediante la espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR), que se desarrolla en el siguiente apartado.

### 2.1.3.5.2. Caracterización química de la evolución del proceso de la carbonatación a lo largo del tiempo

La caracterización química de la evolución del proceso de la carbonatación, a lo largo del tiempo, de las familias de morteros ensayadas se realiza con la espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR). Para esta finalidad, se estudian dos morteros de cada familia ensayada a 180 días de edad, a 270 días de edad y a 365 días de edad, de los cuales se obtienen dos muestras de cada uno: una de exterior (1) y una de interior (3), previamente pretratadas por el procedimiento de congelación, mediante la combinación de etanol más acetona (Zhang, J. *et al.*, 2011). De esta manera se caracterizan las variaciones del proceso de carbonatación a diferentes profundidades del mortero.

Para tratar los espectros de infrarrojo obtenidos se determinan las alturas de los picos de las frecuencias de vibración que se consideran diagnóstico de la calcita ( $\nu_3$ ,  $\nu_2$  y  $\nu_4$ ), las cuales están asociadas al complejo aniónico correspondiente a los carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (Gunasekaran, S. *et al.*, 2006; Makreski, P. *et al.*, 2003) (Tabla 67).

Tabla 67. Frecuencias de vibración diagnósticas de la calcita presentes en los espectros de las muestras de las familias de los morteros ensayadas. Acrónimos: mf: muy fuerte; f: fuerte; m: mediana; (ag): aguda; (an): ancha

<b>FRECUENCIAS DE VIBRACIÓN DIAGNÓSTICO DE LA CALCITA</b>		
<b>Frecuencias <math>\nu</math> (<math>\text{cm}^{-1}</math>)</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Asignación y comentarios</b>
1395-1412	mf (an)	$\nu_3$ – vibración de tensión asimétrica asociada al grupo $\text{CO}_3^{2-}$
868-871	f (ag)	$\nu_2$ – vibración de flexión asimétrica asociada al grupo $\text{CO}_3^{2-}$ ; vibración de flexión fuera de plano asociada al catión $\text{Ca}^{2+}$
709-712	m (ag)	$\nu_4$ – vibración de flexión simétrica asociada al grupo $\text{CO}_3^{2-}$

Las alturas de los picos medidos están influenciadas por la elección de la línea base. En esta investigación, las líneas base para determinar los picos de las frecuencias de vibración  $\nu_3$ ,  $\nu_2$  y  $\nu_4$  se trazaron entre los mínimos más próximos a cada lado del pico medido, siguiendo el método desarrollado por Chu, V. *et al.* (2008) (Figura 173). Seguidamente, se calcula la relación  $\nu_2/\nu_4$  dividiendo la altura del pico de la frecuencia de vibración  $\nu_2$  por la altura de la frecuencia de vibración  $\nu_4$ . La incertidumbre analítica de la medida de la relación es de  $\pm 0,2$

$\text{cm}^{-1}$ . Esta relación de frecuencias de vibración es un indicativo de la variabilidad cristalina dentro de una misma muestra y es un método que se ha determinado simple y directo para muestras compuestas principalmente de calcita (Regev, L. *et al.*, 2010). En nuestro caso, se determina que este método nos ayuda a caracterizar las variaciones que experimentan los morteros de cal en pasta, a medida que la carbonatación evoluciona en el tiempo. Es decir, a medida que el hidróxido de calcio de la dispersión coloidal de la cal en pasta pasa a carbonato de calcio (calcita).

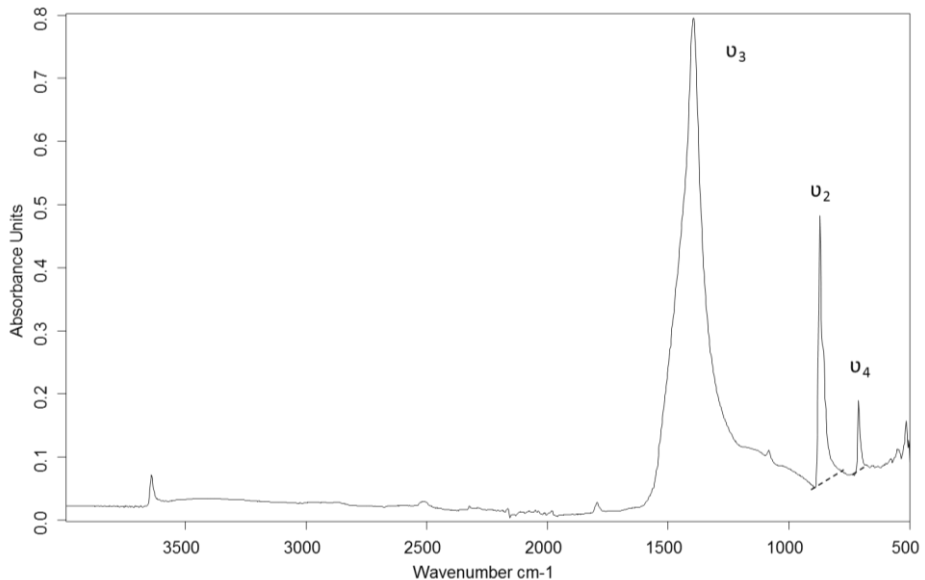


Figura 173. Espectro representativo de los obtenidos de las muestras de mortero analizadas donde se observan los tres principales picos de absorción infrarroja:  $\nu_3$ ,  $\nu_2$  y  $\nu_4$ . Se dibuja la línea base de la frecuencia de vibración  $\nu_2$  y  $\nu_4$  para determinar la altura de los picos

A continuación, en la tabla 68 se presentan los resultados de la relación  $\nu_2/\nu_4$  obtenidas de las muestras de las diferentes familias de morteros ensayadas (T, 0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG y 2TG), tanto de la zona exterior del mortero (1) como de la zona interior del mortero (3), a diferentes edades (a 180 días, a 270 días y a 365 días de edad).

Tabla 68. Resultados de las relaciones medias  $\nu_2/\nu_4$  obtenidas de las muestras de las diferentes familias de los morteros ensayadas (T, 0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG y 2TG). Acrónimos: (1). zona exterior del mortero; (3). zona interior del mortero

	180 días de edad		270 días de edad		365 días de edad	
	$v_2/v_4$ (1)	$v_2/v_4$ (3)	$v_2/v_4$ (1)	$v_2/v_4$ (3)	$v_2/v_4$ (1)	$v_2/v_4$ (3)
<b>T</b>	3,4	3,6	4,1	4,1	4,1	4,1
<b>0.5G</b>	3,2	4,2	3,6	3,8	4,7	4,4
<b>1G</b>	4,2	3,9	4,2	4,2	4,2	4,2
<b>1.5G</b>	4,3	3,7	4,0	4,0	4,2	4,3
<b>2G</b>	4,0	4,2	3,8	3,4	4,8	4,6
<b>0.5TG</b>	3,6	4,0	3,9	3,8	4,6	4,5
<b>1TG</b>	4,2	3,5	4,3	4,2	4,3	4,2
<b>1.5TG</b>	4,5	3,8	4,3	4,5	4,4	4,4
<b>2TG</b>	4,0	4,3	4,5	4,2	4,8	4,6

Los resultados de la tabla 68, antes que nada, a términos generales, nos indican que existe una diferenciación entre el proceso de carbonatación de la parte exterior (1) del mortero con respecto a la parte interior del mortero (3). Estos resultados nos confirman los otros resultados obtenidos a partir de la caracterización de la microestructura del mortero mediante el SEM y del test de la fenolftaleína, los cuales determinan la presencia de diferentes frentes de carbonatación en algunas muestras de mortero. Por tanto, estos resultados son difíciles de interpretar si se asume la posibilidad de que en algún momento el análisis que se ha llevado a cabo ha estado de más de un frente de carbonatación al mismo tiempo o que en la muestra esté presente el *estrato superficial gel*. Así pues, la variabilidad que tiene lugar del cálculo de la relación  $v_2/v_4$  es semicuantitativa. Lo que sí que se desprende de los resultados obtenidos, por un lado, es que las relaciones aumentan a medida que evoluciona la carbonatación con el tiempo y, por otro lado, que el aditivo afecta el comportamiento del mortero de cal en pasta frente a la carbonatación de la siguiente manera:

- En la primera fase de la carbonatación, a 180 días de edad, en los morteros con la adición del 0,5% de goma (G y TG) las relaciones obtenidas en el exterior del mortero (1) son inferiores a las partes interiores (3) y muy bajas respecto de las otras proporciones, y semejantes o por debajo respecto de las obtenidas para el mortero testigo (T). Estos resultados se corresponden al bajo grado de carbonatación que nos indica el test de fenolftaleína y que corresponde al MODELO TIPO 0. En cambio, las relaciones obtenidas en los morteros con la adición del 1%, del 1,5% y del 2%, tanto de goma guar (G) como de goma tragacanto (TG) con respecto al mortero testigo (T), son más elevadas. Estos resultados se corresponden a un grado más alto de

carbonatación, tal como indica el test de la fenolftaleína y que corresponde al MODELO TIPO 1 o 2. Por otro parte, las relaciones obtenidas para los morteros con la adición del 2%, tanto de goma guar (G) como de goma tragacanto (TG), son un poco menores que los obtenidos para las proporciones de goma del 1% y del 1,5%, siendo las relaciones obtenidas inferiores en las partes exteriores (1) con respecto a las relaciones obtenidas en las partes interiores (3). Estos resultados pueden indicar un proceso un poco más lento de carbonatación.

- En la segunda fase de la carbonatación, a 270 días de edad, los valores de las relaciones obtenidas de los morteros con la adición del 0,5%, tanto de goma guar (G) como de goma tragacanto (TG) y de los morteros con la adición del 2% de goma guar (G), tanto de la parte exterior (1) como del interior (3), son menores respecto el mortero testigo (T) y con respecto a los otros porcentajes de adición de goma (G y TG) (1% y 1,5%) y respecto el porcentaje de adición de goma tragacanto del 2%. Estos resultados nos indican por tanto que el grado de carbonatación sigue siendo bajo. En efecto, estos resultados se corresponden según el test de la fenolftaleína al MODELO TIPO 2 BIS, es decir, en estos morteros, a 270 días de edad, se da una carbonatación interna pero muy dispersa e incompleta.

- En la tercera fase de la carbonatación, a 365 días de edad, las relaciones obtenidas nos indican en primer lugar, que el mortero testigo (T) mantiene los mismos valores y que por tanto, la carbonatación no avanza o se retrasa. En cambio, llama la atención que los valores de las relaciones obtenidas en el resto de los morteros con la adición de las gomas (G y TG) aumentan, incluyendo los morteros que evolucionaban más despacio en los primeros momentos de la carbonatación. Hay que mencionar que en el test de la fenolftaleína los resultados son diferentes unos de otros. Pero aun así, los morteros con la adición del 0,5%, tanto de goma guar (G) como de goma tragacanto (TG) siguen el MODELO TIPO 2 BIS, es decir, una carbonatación interna pero muy dispersa e incompleta.

Estos resultados, están relacionados con la capacidad que tienen estas gomas de retener agua dentro de la estructura del mortero, que según los resultados obtenidos es más relevante en los morteros con la adición del 0,5% y del 2% de la goma. Así pues, estos valores de las relaciones  $v_2/v_4$  nos indican, semicuantitativamente, una menor proporción de calcita en la estructura del mortero. Parece por tanto que las gomas con la adición del 0,5% de goma (G y TG) retrasan la carbonatación en las primeras fases de la carbonatación, hasta los 270 días de edad, debido a su propiedad de retener agua, pero que llega un momento en que la carbonatación evoluciona con normalidad.

Por otra parte, si se contemplan otros indicadores y se enfrentan las alturas de los picos de las frecuencias de vibración  $\nu_2$  de las muestras de las diferentes familias de morteros ensayados, a diferentes edades (a 180 días, a 270 días y a 365 días de edad) respecto las alturas de los picos de las frecuencias de vibración  $\nu_4$  obtenidas mediante el FT-IR, se pueden agrupar las muestras de mortero por las diferentes edades de carbonatación mencionadas (Figura 174). Se puede observar que la dispersión de los grupos de las muestras es más elevada en los morteros a 180 días de edad, pero aun así, el grupo queda bastando bien definido. Por tanto, se puede afirmar que este método desarrollado por Chu, V. *et al.* (2008) es aplicable para valorar y estudiar el proceso de carbonatación a lo largo del tiempo.

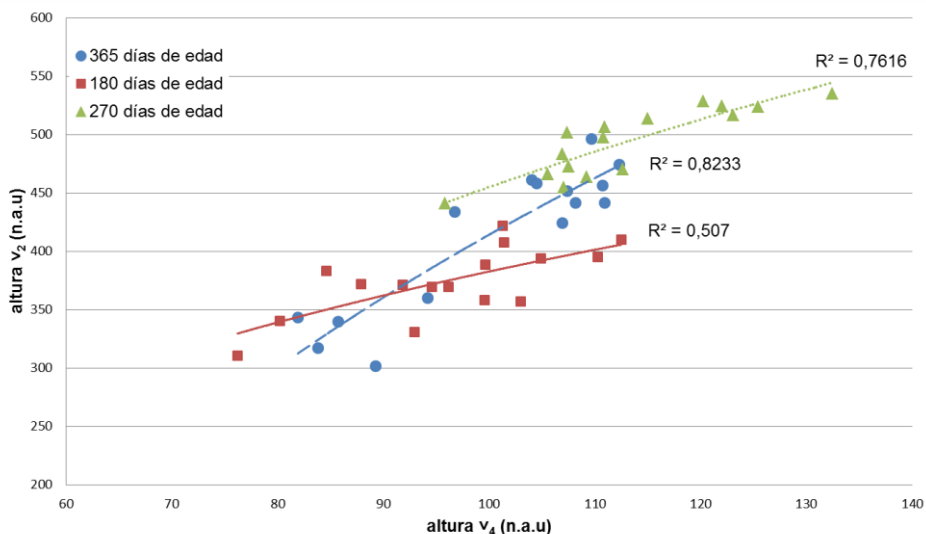
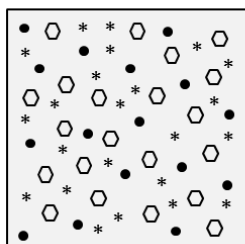


Figura 174. Gráfico de las alturas de los picos de las frecuencias de vibración  $\nu_2$  de las muestras de las diferentes familias de los morteros ensayadas, a diferentes edades (a 180 días, a 270 días y a 365 días) respecto las alturas de pico de las frecuencias de vibración  $\nu_4$  obtenidas a través del FT-IR. Acrónimos: (n.a.u): unidades de absorbancia normalizadas a 1000

Para terminar, con la caracterización química de la evolución del proceso de la carbonatación, a lo largo del tiempo, mediante el test de la fenolftaleína y de la espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR), se presenta a continuación un dibujo para explicar el modelo de la evolución del proceso de la carbonatación de los morteros de cal en pasta y la formación de los Anillos de Liesegang (Figura 175).



### 1. Fase inicial



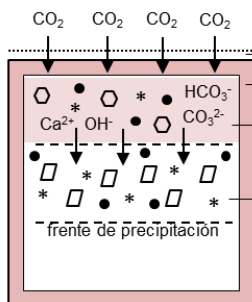
agua intersticial. Disolución saturada de iones de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$  (disolución de portlandita) y algunos de  $\text{Mg}^{2+}$  (dependiendo de la pureza de la cal en pasta)

○ partículas de portlandita (cristales planos submicrométricos (plate-like particles) de la cal en pasta)

● árido

\* partículas coloidales intersticiales de la pasta de cal

### 2. Evolución del sistema



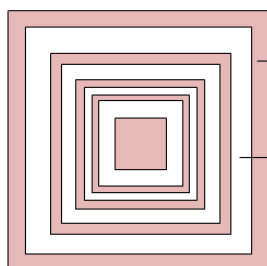
→ agua superficial

→ *estrato superficial gel* de carbonatos (se tñe con la fenolftaleína)

→ difusión de los reactivos a través de la dispersión coloidal intersticial

→ banda de precipitación de carbonato cálcico  $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3$

### 3. Anillos de Liesegang



→ anillo teñido (no carbonatado) → MODELO TIPO 2

→ anillo no teñido (carbonatado)

Figura 175. Dibujo del modelo de la evolución del proceso de la carbonatación y de la formación de los Anillos de Liesegang, de arriba abajo: 1. Fase inicial: mortero de cal en pasta; 2. Evolución del sistema: "crecimiento competitivo de partículas" o de postnucleación (Feeney, R. *et al.*, 1983, extraído de Cazalla, O., 2002). Las partículas más grandes crecen a expensas de los cristales más pequeños y de las fases iniciales metaestables (envejecimiento de Ostwald); 3. Anillos de Liesegang: disposición en bandas o anillos consecutivos según una periodicidad o "ley espacial" (coeficiente espacial  $p$ ) o de Jablczynski (Cazalla, O., 2002). La aparición de los anillos es función de la raíz del tiempo  $\sqrt{t}$ , demostrando que el fenómeno de la carbonatación presenta un carácter difusivo. La anchura de las bandas decrece hacia el interior, siguiendo la denominada "ley de la anchura" (Cazalla, O., 2002). Autor del dibujo: Prada, J.L., Guasch-Ferré, N.

## 2.1.4. DISCUSIÓN FINAL DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El comportamiento físico de un mortero depende de una serie de factores. Fundamentalmente, en primer lugar depende del tipo de conglomerante utilizado, en esta investigación la cal en pasta y en segundo lugar del tipo de árido escogido, es decir, de su composición, de su granulometría y de su forma y para terminar, de la dosificación del mortero. El resultado obtenido, después del amasado de los componentes, con adición o no de aditivos, es una masa que presenta una textura, más o menos, uniforme y porosa. Sin embargo, hay que tener en cuenta, que esta estructura inicial se transforma física y químicamente por la carbonatación que va evolucionando en el tiempo. Este hecho, tiene lugar por la reacción de la cal con el dióxido de carbono de la atmósfera que comporta un endurecimiento y una cohesión que dan al conjunto unas nuevas propiedades, tanto físicas como mecánicas, como de comportamiento frente al agua y de durabilidad.

Dicho eso, en las diferentes familias de morteros ensayadas, la variación fundamental entre ellos ha sido la proporción de las gomas adicionadas (0.5G, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 1.5TG y 2TG). El resto de los parámetros intrínsecos, como el tipo de cal, el árido y la dosificación del mortero, se han mantenido constantes. Solamente ha hecho falta esta variable porque la evolución en el tiempo y las propiedades adquiridas por las diferentes familias de morteros ensayadas hayan estado muy diferentes, tal como determinan los resultados expuestos en esta parte 2 de esta investigación, condicionados por dos factores principalmente: en primer lugar, por la interacción de las gomas (G y TG) con las partículas de cal y su distribución en la textura del mortero, así como la incorporación de aire con la consecuente formación de burbujas, que se ha podido observar mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM) y mediante la porosimetría de intrusión de mercurio; en segundo lugar, por el proceso de carbonatación. Aunque, en menor medida, pero también importante, hay que tener en cuenta que en paralelo, según la proporción de goma adicionada en el mortero, se produce una interacción y/o reacción química entre las gomas y la cal, produciéndose la formación de sales cálcicas de las gomas.

Por lo que respecta, al estudio de la evolución en el tiempo de estos morteros, a diferentes edades (a 180 días, a 270 días y a 365 días de edad), nos permite determinar los siguientes resultados:

- La formación de bandas o anillos de reacción-cristalización de carbonato cálcico, básicamente compuestas de calcita, alternados con capas de portlandita o portlandita con una cierta proporción de calcita. Es decir, bandas

carbonatadas que no se tiñen con el test de la fenolftaleína alternadas con bandas no carbonatadas que sí que se tiñen, debido a la presencia residual de portlandita.

- Estas bandas presentan una distribución espacio-tiempo que se corresponde al fenómeno físico-químico de cristalización nombrado Anillos de *Liesegang* (Cizer, O. *et al.*, 2012), donde la estructura que se desarrolla corresponde básicamente al MODELO TIPO 2 (Cazalla, O., 2002). Este proceso de carbonatación en las cales en pasta se ve favorecido por la presencia en ellas de partículas de portlandita de tamaño más pequeño, en forma de cristales planares submicrométricos (*plate-like particles*) que no se encuentran en las cales en polvo. Por tanto, estas cales en pasta, presentan una mayor superficie específica y, en consecuencia una mayor reactividad química frente al dióxido de carbono. Así pues, para explicar el proceso de carbonatación de los morteros de cal en pasta ensayados, se debe tener en cuenta que en estas cales en pasta los cristales de portlandita están embebidos en una dispersión coloidal de agua de cal saturada y que el tamaño de la partícula es muy pequeña (Cizer, O. *et al.*, 2012; Rosell, R., 2013).

- Además, la adición de las gomas (G y TG) modifica el proceso de carbonatación debido a su capacidad de retener agua en la estructura del mortero, que retrasa el proceso. Los morteros con la adición del 0,5% y del 2% de goma guar (G) y los morteros con la adición del 0,5% y del 2% de goma tragacanto (TG), son los que generan un mayor retraso en la carbonatación, ya que inicialmente, a 180 días de edad, no se produce ningún cambio en la tinción inicial, mediante el test de la fenolftaleína, manteniéndose la tonalidad violeta por toda la superficie del mortero ensayada. Desde el punto de vista del estudio de la carbonatación elaborado en esta investigación, estos resultados se corresponden al MODELO TIPO 0, por su escasa carbonatación. Además, al cabo de 365 días de edad, solo se observa una carbonatación dispersa sin llegar a formarse la estructura de los Anillos de *Liesegang*.

- La caracterización química del proceso de carbonatación mediante la espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR), nos determina que efectivamente la formación de calcita y otras fases amorfas de carbonato cálcico van aumentando a medida que la carbonatación evoluciona en el tiempo. Además, se puede determinar que, en las fases iniciales de la carbonatación, las gomas (G y TG) en general y en especial, las proporciones del 0,5% de goma guar (G), del 0,5% de goma tragacanto (TG) y en menor

medida, del 2% de goma guar (G) y del 2% de goma tragacanto (TG)<sup>186</sup>, son las menos carbonatadas. En cambio, alrededor de los 365 días de edad, el grado de carbonatación de los morteros se incrementa llegando a igualar o a superar el nivel de carbonatación del mortero testigo (T).

Hay que destacar, que este estudio analítico nos indica el grado de cristalinidad de la calcita, atribuible al grado de carbonatación del mortero, el cual no coincide con el grado de carbonatación detectado con el test de la fenolftaleína. Este hecho puede indicar una posible interferencia de las gomas con la fenolftaleína o que el test de la fenolftaleína no detecta la formación de otros carbonatos no cristalinos, en forma de geles y fases hidratadas pseudocristalinas, que también forman parte del proceso de carbonatación general del mortero, que sí que detecta el método analítico utilizado para la caracterización química de la evolución de la carbonatación mediante el FT-IR, desarrollado por Chu, V. *et al.* (2008).

- Por un lado, el comportamiento mecánico también se puede correlacionar con el bajo grado de carbonatación determinado y con el hecho de que estas gomas incorporan aire en la estructura del mortero (Seabra, P. *et al.*, 2009), ya que los resultados de la determinación de la resistencia a la compresión y a la flexión, a 180 días de edad, son muy bajos. Sin embargo, sí que hay que mencionar que aún siendo bajos, existe una cierta mejora de la resistencia a la compresión de los morteros con la adición del 0,5%, del 1% y del 1,5% de goma guar (G) respecto de los valores obtenidos del mortero testigo (T). Por lo que respecta, a la resistencia a la flexión los resultados son más dispersos, destacando la mejora a la flexión de los morteros con la adición del 0,5% y del 2%, tanto de goma guar (G) como de goma tragacanto (TG). Estos resultados se pueden explicar por la disposición estratificada o interlaminar que adoptan las gomas en el interior de la estructura del mortero, según se ha observado mediante el SEM.

- Por otro lado, la durabilidad de estos morteros con la adición de las gomas (G y TG) mejora sustancialmente. Este resultado se debe a las modificaciones que se producen en la microestructura del mortero y a las modificaciones de la configuración porosa del mortero, incrementando el rango de macroporo y incorporando burbujas de aire en la estructura del mortero. Estas modificaciones originadas por las gomas (G y TG) generan una mayor resistencia a la acción del agua y a los ciclos de hielo-deshielo, resultados confirmados por la determinación de la propagación de impulsos ultrasónicos.

---

<sup>186</sup> que son las proporciones que se pueden considerar como idóneas a partir de la determinación de las siguientes propiedades reológicas ensayadas en esta investigación: determinación del contenido de aire y determinación de la capacidad de retención de agua del mortero.

- Así pues, por lo que respecta a las propiedades del mortero en estado endurecido se puede determinar a partir de los resultados obtenidos en esta investigación que las gomas testadas, la goma guar (G) y la goma tragacanto (TG), como posibles aditivos de los morteros de cal en pasta, se pueden clasificar como retardadores del tiempo de carbonatación. Y, a partir de las propiedades reológicas, estas gomas se pueden clasificar como modificadores del contenido en aire (aireadores), como retenedores de agua y como modificadores de la trabajabilidad del mortero.

- En el mortero endurecido los resultados obtenidos nos indican que la adición de las gomas (G y TG) en los morteros de cal en pasta modifican sus propiedades hídricas. Por un lado, se aprecia una disminución de la succión capilar y de la velocidad de secado en general. Por otro lado, también se observa una disminución de la porosidad accesible al agua ( $V_o$ ) y consecuentemente una variación de la densidad aparente. Este comportamiento físico frente al agua se produce fundamentalmente por la combinación de los siguientes factores: en primer lugar, por la modificación de la red porosa producida por el incremento de los macroporos de aire. Este cambio se debe a la transformación de la textura dentro del mortero, es decir, a la creación de una estructura entrelazada (*entanglement*) y/o entrecruzada (*cross-linking*) del polímero del polisacárido y su unión a las partículas de la cal, principalmente con los cristales de portlandita; en segundo lugar, por la formación de burbujas debido al carácter aireante de las gomas; finalmente, por la retención de agua por parte de la estructura química de las gomas, la cual se determina en la caracterización de las propiedades reológicas del mortero (en estado fresco). A parte, hay que mencionar que las gomas no modifican de manera sustancial la permeabilidad al vapor de agua del mortero. Este hecho, garantiza una buena transpiración, que a pesar de la lentitud del secado y de la carbonatación del mortero, permiten que el mortero pueda resistir en condiciones de un elevado grado de humedad ambiental.

## 2.1.4. FINAL DISCUSSION OF THE RESULTS AND CONCLUSIONS

The physical behavior of a mortar depends on a number of factors. Fundamentally, in the first place it depends on the type of binder used, in this investigation slaked lime putty, and secondly the type of aggregate chosen, that is to say, its composition, its particle size, shape and finally, the amount of mortar. The result obtained after kneading the components, with the addition of additives or not, is a mass which has a texture more or less uniform and porous. But keep in mind that this initial structure is transformed physically and chemically by carbonation that evolves over time. This takes place by the reaction of lime with carbon dioxide in the atmosphere which leads to hardening and cohesion that give it new properties, both a physical and mechanical behavior to water and durability.

That said, the different families of mortars tested vary between them as to the ratio of rubber added. (0.5g, 1G, 1.5G, 2G, 0.5TG, 1TG, 2TG and 1.5TG). The rest of the intrinsic parameters such as the type of lime, aggregate and mortar dosage, have remained constant. Only this variable is needed so that the evolution in time and the properties acquired by the tested families of mortars have differed greatly, as determined by the results presented in chapter 2 of this research, primarily conditioned by two factors: first, by the interaction of the rubbers (G and TG) with lime particles and their distribution in the texture of the mortar, as well as the incorporation of air with the subsequent formation of bubbles, which has been observed by means of scanning electron microscopy (SEM) and by means of mercury porosimetry intrusion; second, the process of carbonation. Even though to a lesser extent, but also important to consider in parallel, according to the proportion of rubber generally added to the mortar, there is an interaction and/or chemical reaction between the rubber and lime stating the formation of calcium salts from the rubbers.

With respect to the study of the evolution of these mortars over different lengths of time (180 days, 270 days and 365 days), we can determine the following results:

- The formation of a layer of surface gel with essentially a carbonated composition, which presents amorphous phases or pseudo crystalline and hydrated calcium carbonates.
- The formation of bands or rings of reaction crystallization of calcium carbonate, basically composed of calcite, interspersed with layers of portlandite or portlandite with a certain proportion of calcite. That is to say carbonated bands not stained with the phenolphthalein test alternated with layers not carbonated that do get stained due to the presence of residual portlandite.

- These bands present a space-time distribution that correspond to the physiochemical crystalization phenomenon called Rings of *Liesengang* (Cizer, O. *et al.*, 2012), where the structure that is developed basically corresponds to MODEL TYPE 2 (Cazalla O., 2002). This process of carbonation in the slaked lime putty is favored by the presence in those of portlandite particles of a smaller size, in the form of flat submicron crystals (plate-like particles) not found in lime powder. Therefore, this lime in pastes, have a higher specific surface area and therefore a higher chemical reactivity against carbon dioxide. So, to explain the process of carbonation of lime mortar pastes tested, it should be noted that these lime paste portlandite crystals are embedded in a colloidal water solution of saturated lime & the size of the particles are very small. (Cizer, O. *et al.*, 2012; Rosell, J.R., 2013).

- Furthermore, the addition of (G and TG) rubber modifies the process of carbonation due to its ability to retain water in the mortar structure, which delays the process. Mortars with the addition of 0.5% and 2% guar gum (G) and mortars with the addition of 0.5% and 2% tragacanth gum (TG) are those that generate the greatest delay in carbonation, because initially, at 180 days there is no change to the initial staining through the phenolphthalein test, keeping the purple hue across the surface of the mortar tested. From the point of view of studying carbonation made in this investigation, these results correspond to MODEL TYPE 0 for its low carbonation. Additionally, after 365 days it can just be observed a dispersed carbonation without forming the structure of the Rings of *Liesengang*.

- The chemical characterization of the carbonation process using infrared spectroscopy by Fourier transform (FT-IR), determines that effectively the formation of calcite and other phases of amorphous calcium carbonate increase as the carbonation evolves in time. In addition, you can determine that in the initial stages of carbonation, rubber (G and TG) in general and in particular the proportions of 0.5% guar gum (G) 0.5% rubber tragacanth (TG) and to a lesser extent, from 2% guar gum (G) and 2% tragacanth gum (TG) are less carbonated. However, around 365 days the degree of carbonation of mortars increased reaching equal or surpassing the level of carbonation mortar testimony (T).

It should be noted that this analytical study indicates the degree of crystalline calcite attributable to the degree of carbonation in the mortar, which does not match the degree of carbonation detected with the phenolphthalein test. This may indicate a possible interference of rubber with phenolphthalein or the phenolphthalein test does not detect the formation of other crystalline carbonates, not in the form of gels and hydrated pseudo crystalline phases,

which are also part of the general process of carbonation of the mortar, it does detect the analytical method used for the chemical characterization of the evolution of carbonation through FT-IR, developed by Chu, V. *et al.* (2008).

- On one hand, the mechanical behavior can also be correlated with the low levels of carbonation and given the fact that these rubbers incorporate air into the structure of the mortar (Seabra, M.P. *et al.*, 2009), because the results of the determination of the resistance to compression and bending, to 180 days old are very low. However, it is noteworthy that despite being low, there is some improvement in the compressive strength of mortars with the addition of 0.5%, 1% and 1.5% of guar gum (G) with respect to the values obtained from the mortar testimony (T). With respect to the flexible strength, the results are more dispersed, highlighting the improvement in flexibility of mortars with the addition of 0.5% and 2%, both guar gum (G) and gum tragacanth (TG). These results can be explained by the disposal or interlaminar adopting stratified gums inside the structure of the mortar, as observed through SEM.

- Furthermore, the durability of these mortars with the addition of rubber (G and TG) improves substantially. This result is due to the changes that occur at the microstructure of the mortar and the porosity changes in the mortar, increasing the range of macroporous and incorporating air bubbles in the mortar structure. These changes caused by the rubber (G and TG) generates greater resistance to the action of water's freeze-thaw cycles, the results confirmed by the determination of the propagation of ultrasonic pulses.

- Thus, with regard to the properties of the mortar in the cured state can be determined from the results obtained in this investigation that the rubbers tested, guar gum (G) and gum tragacanth (TG) as potential additives of mortar from lime paste, can be classified as carbonation retarders. And from the rheological properties, these rubbers can be classified as modifiers of the air content (airators), as retainers of water and as modifiers of the workability of the mortar.

- In the hardened mortar the results indicate that the addition of rubber (G and TG) in the mortars slaked lime putty modify their water properties. On one hand there is a decrease in the capillary suction and drying speed in general, and on the other hand, a decrease of porosity to water access ( $V_o$ ) and consequently a variation of density. This physical behavior to water occurs primarily by the combination of the following factors: firstly, for the modification in the porous network caused by the increase of macroporous air. This change is due to the change in the texture of the mortar, ie the creation of the polysaccharide polymer structure, interlaced (entanglement) and/or cross-linked (cross-linking)



and its lime binding particles, primarily portlandite crystals; secondly, the formation of bubbles due to the aerator character of the rubbers; finally, for the water retention by the chemical structure of the rubber, which is determined in the characterization of the rheological properties of the mortar (fresh state). In addition, it is noteworthy that the rubbers do not change substantially the water vapor permeability of the mortar. This ensures a good sweat, despite the slow drying and carbonation of mortar, allowing the mortar to withstand conditions of high humidity.

#### **iv. CONCLUSIONES FINALES**

- En esta investigación, el mortero a elaborar era un mortero para revestimiento de aplicación en el campo de la restauración, planteado a partir de los resultados arqueométricos obtenidos de la caracterización de los morteros de cal tradicionales, en este caso, los morteros de las capas de preparación de los estucos de los sitios arqueológicos de la cultura maya (parte 1 de esta investigación). En este sentido se puede concluir que, las propiedades reológicas determinadas del mortero con la adición de las gomas (G y TG) aseguran unas prestaciones de aplicación adecuadas: facilidad de aplicación gracias a la docilidad que nos propicia la forma esférica de las burbujas de aire que se incorporan en la estructura del mortero y los altos períodos de trabajabilidad que nos permiten dar más buenos acabados. A parte, estas gomas adicionadas presentan una alta capacidad de retención de agua que se mantendrá en el mortero durante un período largo de tiempo. Esta propiedad es de especial importancia cuando se realiza un revestimiento con diferentes condiciones de temperatura y humedad (Sphychala, E., 2015), ya que se evita la evaporación rápida del mortero y la consecuente generación de fisuras por retracción. Y, también mantienen de manera idónea la permeabilidad al vapor, propiedad ya mencionada en anterioridad y también importante a tener en cuenta en morteros de revestimiento. Por tanto, la goma guar (G) y la goma tragacanto (TG) son dos aditivos orgánicos naturales de origen vegetal susceptibles a ser utilizados en los morteros de cal en pasta aplicados a la restauración de los estucos de la pintura mural maya. Su durabilidad a los ciclos de hielo-deshielo también las hacen idóneas para ser utilizadas como aditivos en morteros de cal en pasta en regiones donde se dan choques térmicos entre el día y la noche.

Pero hay que añadir, que para que estas gomas pasen a ser aditivos idóneos se deben optimizar las proporciones utilizadas, ya que en nuestro caso se ha determinado que la proporción más efectiva en todos los ensayos realizados es el 0,5% de goma, tanto de la goma guar (G) como de la goma tragacanto (TG), y que a partir de esta proporción, las otras proporciones más elevadas disminuyen las prestaciones. Por tanto, las investigaciones futuras deben ir encaminadas a determinar y caracterizar las prestaciones del mortero, tanto en estado fresco como en estado endurecido, con la adición de las gomas (G y TG), entre la proporción 0,1% y la 0,5%, para valorar si la proporción 0,5% es el máximo de aditivo recomendado a ser adicionado en los morteros de cal en pasta.

- Estas gomas naturales de origen vegetal pueden ser una alternativa a los diferentes tipos de aditivos que hoy en día están disponibles comercialmente,

que incluyen mayoritariamente derivados de la celulosa: etilcelulosa (EC), hidroxietilcelulosa (HEC), hidroxipropilcelulosa (HPC), carboximetilcelulosa (CMC), metilcelulosa (MC) y mezclas de éter de celulosa: hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) y metilhidroxietilcelulosa (HEMC). Las proporciones de estos aditivos normalmente no superan el 0,7% (Sphychala, E., 2015). Pero, sin perder de vista que cada caso de aplicación, en el campo de la restauración, pide una diagnosis personalizada de la situación y unos estudios previos para valorar cuál de todos los aditivos existentes es el más adecuado y más compatible con el materiales originales.

- Así pues, los resultados experimentales de la parte 2 de esta investigación nos permiten a nivel de diagnosis, entender mejor los procedimientos técnicos de la manufactura y de la ejecución de los estucos de la pintura mural maya, ya que experimentalmente se demuestra que la adición de gomas naturales de origen vegetal en los morteros de cal, para enlucidos, por un lado, favorece la ejecución de esta técnica artística, en ambientes de altas temperaturas y humedades como el que se da en las Tierras Bajas Mayas del Norte, en general y en el norte en particular. Por otro lado, propician la extraordinaria durabilidad de los estucos en el tiempo, cosa que nos ha permitido gozar de uno de los legados artísticos más importantes de la historia.

#### iv. FINAL CONCLUSIONS

- In this research the mortar for elaborating was one for a coating application in the field of restoration, from the archaeometric results obtained from the characterization of traditional lime mortars, in this case, the mortars layers preparation of stucco archaeological Mayan settlement culture (chapter 1 of this study). In this sense it can be concluded that certain rheological properties of the mortar with the addition of rubbers (G and TG) ensure appropriate application benefits: ease of application thanks to the docility that causes the spherical shape of the air bubbles that are incorporated into the structure of the mortar and high workability that allow us to provide better finishes. In addition, these added rubbers present a high capacity to retain water that will remain in the mortar over a long period of time. This property is particularly important when performing a coating with different conditions of temperature and humidity (Sphychala, E., 2015), by preventing rapid evaporation of the mortar and the consequent generation of shrinkage crack. And also they keep in an ideal way to maintain vapor permeability, already mentioned previously and important to note in mortar coating. Thus, guar gum (G) and gum tragacanth (TG) are two natural organic plant additives susceptible to being used in the mortar of slaked lime putty applied to the restoration of the Mayan stucco murals. The durability of freeze-thaw cycles also make them ideal for use as additives in lime mortar paste in regions where there are thermal shocks between day and night.

But we must add, that for these rubbers to become suitable additives their proportions have to be optimized, as in our case it has been determined that the ratio more effective in all tests conducted is 0,5 % rubber, both of guar gum (G) and gum tragacanth (TG), and from this proportion, other higher proportions diminish performance. Therefore, future research should be aimed at identifying and characterizing the performance of mortar, both in fresh and hardened state, with the addition of rubbers (G and TG) ratio between 0,1% the 0.5%, to assess whether the proportion is 0,5% maximum recommended additive to be added in the mortar of slaked lime putty.

- These natural vegetable gums can be an alternative to the various types of additives that are commercially available today, including most cellulose derivatives: etilcel cellulose (EC), hidroxietilcel cellulose (HEC) , hidroxipropilcel cellulose (HPC), carboximetilcel cellulose (CMC), methylcellulose cellulose (MC) and mixtures of cellulose ether, hidroxipropilmetilcel cellulose (HPMC) and metilhidroxietilcel cellulose (HEMC). The proportions of these additives usually do not exceed 0,7% (Sphychala, E., 2015). But without forgetting that in each case of application, in the field of restoration, it requires a diagnosis of the situation and previous studies for

assessing which of all existing additives is the most appropriate and compatible with the original materials.

- Thus, the experimental results of chapter 2 of this study allow us, at a diagnosis level, to better understand the technical processes of manufacturing and execution of Mayan stucco mural painting, as is demonstrated experimentally that the natural rubber addition in lime mortars for finishes, on one hand it favours the execution of this artistic technique in environments such as high temperatures and humidity that occurs in the North Maya Lowlands in general and in the north in particular. On the other hand because of the extraordinary durability of stucco over time, which allowed us to enjoy one of the most important artistic legacies of history.

## v. BIBLIOGRAFÍA

AGUAYO, J.E. *et al.* (1980). "Estudio sedimentológico en el área Tulum-Cancun-Isla Mujeres" en *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo XLI, Nos. 1 y 2, p. 15-32.

ALAUSTEY, J.A. (1993). *Caracterización mineralógica y alterológica de los morteros de revestimiento de edificios de Barcelona*. Dir. Servando Chinchon. Tesis Doctoral inédita. Barcelona: Universitat de Barcelona.

ALONSO, J. (2009). "Técnicas de estudio de rocas carbonatadas" en *Apéndices. Prácticas de Petrología Sedimentaria*. Departamento de Geología (Petrología y Geoquímica). Oviedo: Universidad de Oviedo.

ALONSO OLVERA, A. (2013). "Agregados de morteros y conglomerados de cal", en Barba Pingarrón, L., Villaseñor, I. *La cal. Historia, propiedades y uso*. México: Instituto de Investigaciones Antropológicas de México, UNAM, p. 73-91.

ALTHOFF, P.L. (1977). "Structural refinements of dolomite and a magnesian calcite and implications for dolomite formation in the marine environment" en *American Mineralogist*, volume 62, p. 772-783.

ALUJAS, A. *et al.* (2010). "Evaluación del empleo de una roca arcillosa calcinada a diferentes temperaturas como material puzolánico para el reemplazo de altos volúmenes de CPO" en *Revista Cubana de Química*, vol. XXII, nº 2, p.63.

ÁLVAREZ, J.R. (1954). "Exploración Geológica Preliminar del Río Hondo, Quintana Roo" en *Boletín de la Asociación Mexicana de Geología y Petrología*. vol 6.

ÁLVAREZ, C. (1984). *Diccionario etnolingüístico del idioma maya yucateco colonial. Aprovechamiento de los Recursos Naturales*. México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México. Vol. 2.

ÁLVAREZ GALINDO, J.I., MARTÍN PÉREZ, A. y GARCÍA CASADO, P.J. (1995). "Historia de los morteros" en *Boletín Informativo. Artículos, Revista PH*, vol. 13, p. 52-59.

ALVAREZ GALINDO, J.I. *et al.* (1999). "Methodology and validation of a hot hydrochloric acid attack for the characterization of ancient mortars" en *Cement and Concrete Research*, vol. 29, p. 1061–1065.

ÁLVAREZ GALINDO, J.I. y ONTIVEROS ORTEGA, E. (2006). "Morteros" en: *Programa de normalización de estudios previos aplicado a bienes inmuebles. PH cuadernos Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*. Sevilla: Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía, p. 92-146.

ALZATE RAMÍREZ, J.A. (1831). *Gacetas de Literatura de México*. Tomo tercero. Puebla.

AMIGÓ, J.M. y OCHANDO, L.E. (2001). *Geología i química del cosmos i de la Terra* en Educació. Materials, Valencia: Universitat de València, v. 51.

ANDREWS, A.P. (1981). "Historical Archeology in Yucatan: A Preliminary Framework" en *Historical Archaeology*, vol. 15, Issue 1, p.1-18.

ANDREWS, G.F. (1986). *Los estilos arquitectónicos del Puuc. Una nueva apreciación*. México: INAH

ARELLANO, J. *et al.* (2003). "Nomenclatura, forma de vida, uso, manejo y distribución de las especies vegetales de la Península de Yucatán" en *Etnoflora Yucateense*. México: Universidad Autónoma de Yucatán: Facultad de Medicina, Veterinaria y Zootecnia. Fascículo 20.

ARNOLD, D.E. (1967a). *Maya Blue: a new perspective*, MA thesis on Anthropology, Urbana, Illinois: University of Illinois.

ARNOLD, D.E. (1967b) "Sak lu'um in Maya culture: and its possible relationship to Maya Blue" en *Research Reports*. Urbana, Illinois: University of Illinois. Department of Anthropology. No. 2.

ARNOLD, D.E. (1971). "Ethnomineralogy of Ticul, Yucatan potters: ethics and emics" en *American Antiquity*, vol. 36, p. 20–40.

ARNOLD, D.E. y BOHOR, B.F. (1975). "Attapulgitite and Maya Blue: an ancient mine comes to light" en *Archaeology*, vol. 28, p.22–29.

ARNOLD, D.E. y BOHOR, B.F. (1976). "An ancient attapulgitite mine in Yucatan" en *Katunob*, vol. 8, p.25–34.

ARNOLD, D.E. (1991). "Ethnoarchaeology and investigations of ceramic production and exchange: can we go beyond cautionary tales?" en Bishop, B. L.

y Lange, F. W (Eds.). *The legacy of Anna O. Shepard*. Boulder, CO: University Press of Colorado, p. 321–345.

ARNOLD, D.E. (2000). “Does the standardization of ceramic pastes really mean specialization?” en *Journal of Archaeological Method and Theory*, vol 7, p. 333–375.

ARNOLD, D.E. (2005). “Maya Blue and palygorskite: a second possible pre-Colombian source” en *Ancient Mesoamerica*, vol. 16, p.51–62.

ARNOLD, D.E. *et al.* (2007). “Sourcing the palygorskite used in Maya Blue: a pilot study comparing the results of INAA and LA–ICP–MS” en *Latin American Antiquity*, vol. 18, p. 44–58.

ARNOLD, D.E. *et al.* (2008). “The first direct evidence for the production of Maya Blue: rediscovery of a technology” en *Antiquity*, vol. 82, p. 152–64.

ASHURST, J. y ASHURST, N. (1989). “Practical Building Conservation” en *Mortars, plasters and renders*, vol. 3. Gower, Aldershol.

ASPINALL G. O. (1985). *The polysaccharides*. Academic Press

AUGSBURGER, M.S. *et al.* (1998). “FTIR and Mössbauer investigation of a substituted palygorskite: silicate with a channel structure” en *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 59, No 2, p. 175-180.

BAHLBURG, H. WEISS, R. y WÜNNEMANN, K. (2010). “Low energy deposition in the Chicxulub crater during the impact to post-impact transition” en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 295, Issues 1–2, p. 170–176.

BAILEY, S.W. *et al.* (1971). “Report of Nomenclature Committee, 1969–1979” en *Clays and Clay Minerals*, vol. 19, p.123–133.

BARBA, L. *et al.* (2009). “Provenance of the limestone used in Teotihuacan (Mexico): a methodological approach” en *Archaeometry*, vol. 51, issue 4, p. 525-545.

BARBA PINGARRÓN, L. (2013) “El uso de la cal en el mundo mesoamericano” en Barba Pingarrón, L. y Villaseñor, I. (eds). *La cal. Historia, propiedades y uso*. México: Instituto de Investigaciones Antropológicas de México, UNAM, p. 19-45.



BARBERO BARRERA, M.M. (2011). *Mejora del comportamiento térmico de los morteros de cal aditivados y su empleo en la rehabilitación de inmuebles*. Tesis Doctoral. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura, UPM.

BARRERA VÁSQUEZ, A. (1980). *Diccionario Maya Cordemex, Maya-Español, Español-Maya*. Mérida: Ediciones Cordemex.

BAUTISTA, F. *et al.* (2010a). “Los suelos” en Villalobos-Zapata, G. J. y Mendoza Vega J. (Coord.) *La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)*. México: Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur. p.730.

BAUTISTA, F. y ZINCH, A. (2010b). “Construction of an Yucatec Maya soil classification and comparison with the WRB framework” en *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, vol. 6, p.7.

BAUTISTA, F. *et al.* (2011a). “Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico” en *Gemorphology*, vol. 135. p. 308-321.

BAUTISTA, F. y PALACIO-APONTE, G. (2011b). “Península de Yucatán. Capítulo 24 de la Parte III. Regionalización edáfica del territorio de México” en Krasilnikov, P. Jiménez, F.J. Reyna, T. García, N.E. (Eds.) *Geografía de suelos de México*, p. 355-406.

BEDOLLA ARROYO, J.A. *et al.* (2009). “Aditivos orgánicos en morteros de cal apagada en la edificación histórica” en *Ciencia Nicolaita*, No. 51, p.153-166.

BEDOLLA ARROYO, J.A. (2010). *Caracterización física mecánica de los morteros de cal apagada. Propuesta de morteros según su uso y función ante los agentes comunes de deterioro*. Tesis doctoral. México: Universidad Autónoma de Aguascalientes, Universidad de Colima, Universidad de Guanajuato, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

BENAVIDES JAIDAR, Y. (2006). *Los extractos vegetales usados como aditivos en morteros de cal con fines de conservación*. Tesis de licenciatura en Conservación de bienes muebles, México: INAH-ENCRM.

BERSANI, D. *et al.* (2004). “Pigments and binders in the wall paintings of Santa Maria della Steccata in Parma (Italy): the ultimate technique of Parmigianino” en *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 35, p. 694–703.

BESOAIN, E. (1985). "Mineralogía de arcillas de suelos" en *Serie de libros y materiales educativos*, San José, Costa Rica: IICA. No. 60.

BLETON, J. (1996). "Characterization of neutral sugars and uronic acids after methanolysis and trimethylsilylation for recognition of plant Gums" en *Journal of Chromatography A*, vol. 720, p. 27-49.

BONADUCE, I. *et al.* (2007). "Gas chromatographic–mass spectrometric characterisation of plant gums in samples from painted works of art" en *Journal of Chromatography A*, vol. 1175, p. 275–282.

BONET, F. y BUTTERLIN, J. (1959). "Reconocimiento geológico de la península de Yucatán" en *Enciclopedia yucatanense*. Mérida, Yucatán: Editorial Del Gobierno del estado de Yucatán. Tomo X.

BOYNTON, R.S. (1980). *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*. second (ed.). London, Chichester: Wiley.

BRITO, V. (2009). *Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte*. Grau académico de Mestre em Engenharia Civil. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

BUTTERLIN, J. BONET, F. (1960). "Microfauna del Eoceno Inferior de la Península de Yucatán" en *Paleontología Mexicana*. México: Instituto de Geología de la UNAM, No. 7, p. 1-18.

BUTTERLIN, J. y BONET, F. (1963). "Mapas geológicos de la península de Yucatán" en *Revista de ingeniería hidráulica*, Enero/marzo.

CABADAS BÁEZ, H. *et al.* (2010) "Pedosediments of karstic sinkholes in the eolianites of NE Yucatán: A record of Late Quaternary soil development, geomorphic processes and landscape stability" en *Geomorphology*, vol. 122, issues 3–4, p. 323–337.

CALVO, M. (2004). "La Ciencia y la Tecnología de los Alimentos. Algunas notas sobre su desarrollo histórico" en *Alimentaria*, 41, 359, p. 19-34.

CARRASCOSA MOLINER, B. y LORENZO MORA, F. (2011). "Estudios previos en morteros tradicionales de cal para la evaluación de su comportamiento hídrico y la idoneidad de ser empleados en clima tropical" en *Arché (IRP-UPV)*, 6, p. 55-62.

- CARRILLO, A.M. *et al.* (2014). "Caracterización estructural y textural de una halloysita colombiana" en *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 13, No. 2, p.563-571.
- CASTRO MORA, J. (2002). *Monografía Geológico-Minera del Estado de Campeche*. México: Consejo de Recursos Minerales, Secretaría de Economía.
- CATHERWOOD, F. (1844). *These views of Ancient Monuments in Central America, Chiapas and Yucatan*. New York, USA: Donald A. Heald Rare Books (ABAA).
- CAZALLA VÁZQUEZ, O. (2002). *Morteros de cal. Aplicación en el patrimonio histórico*. Tesis doctoral. España: Universidad de Granada.
- CECHOVÁ, E. (2009). *The effect of linseed oil on the properties of lime-based restoration mortars*. Tesis doctoral. Italia: Università di Bologna
- CECIL, L.G. (2010). "Central Petén blue pigment: A maya blue source outside of Yucatán, México" en *Journal of Archaeological Science*, vol. 37, issue 5, p. 1006–1019.
- CEDILLO ÁLVAREZ, L. (1991). *La conservación en zonas arqueológicas. Tres décadas de trabajo*. Tesis de licenciatura en conservación y restauración de bienes culturales muebles, México: ENCRM-INAH.
- CENNINI, C. (1988). *Tratado de la pintura (El libro del arte)*. Madrid: Ediciones Akal. 1ª edición.
- CHIANTORE, O. RIEDO, C. y SCALARONE, D. (2009). "Gas chromatography–mass spectrometric analysis of products from on-line pyrolysis/silylation of plant gums used as binding media" en *International Journal of Mass Spectrometry*, vol. 284, p. 35-41.
- CHIARI, G. GIUSTETTO, R. y RICCHIARDI, G. (2003). "Crystal structure refinements of palygorskite and Maya blue from molecular modelling and powder synchrotron diffraction" en *European Journal of Mineralogy*, vol. 15, issue 1, p. 21–33.
- CHIAVARI, G. FABBRI, D. PRATI, S. (2001). "Analysis of carbohydrates in the presence of hexamethyldisilazane" en *Analytica Chimica Acta*, vol. 449, p. 271-280.

CHOQUETTE, P.W. y PRAY, L.C. (1970): "Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates" en *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, Vol. 54, p.207-250.

CHU, V. *et al.* (2008). "Differentiating between anthropogenic calcite in plaster, ash and natural calcite using infrared spectroscopy: implications in archaeology" en *Journal of Archaeological Science*, 35, p. 905-911.

CIZER, O. *et al.* (2012). "Real-time investigation of reaction rate and mineral phase modifications of lime carbonation" en *Construction and Building Materials*, 35, p. 741–751.

COBOS PALMA, R. (2000). "Chichén Itza: Settlement and Hegemony during the Terminal Classic Period" en Demarest, A.A., Rice, P.M., Rice, D.S. *The Terminal Classic in the Maya Lowlands: Collapse, Transition and Transformation*. University Press of Colorado, Boulder, p. 517-544.

COTTRELL, I.W. y BAIRD J.K. (1998). "Gomas" en *Enciclopedia de tecnología Química Kirk-Othmer, Limusa*. New York: Kirk-Othmer Concise Encyclopedia of Chemical Technology.

CRUZ FLORES, S. (2013). "El mucílago de nopal como aditivo de las pastas de cal empleadas en conservación" en Barba Pingarrón, L. y Villaseñor Alonso, I. *La cal, historia, propiedades y usos*. México: Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, p. 183-203.

CULTRONE, G. *et al.* (2001). "Carbonate and silica phase reactions during cerámica firing" en *European Journal of Mineralogy*, vol.13, p.621-634.

DAYIDSON, R. (1980). *Handbook of water-soluble Gums and Resins*. Mc. Graw-Hill Book, Co.

DE YTA, A. (1977). *Estudios térmicos del azul maya*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en la especialidad de Ciencia de Materiales, México: Escuela Superior de Física y Matemáticas, IPN.

DE PABLO, L. (1964). "Las arcillas. I. Clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales" en *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, tomo XXVII, nº 2, p. 49-92, fig.1, tablas 1-9.

DIAZ GONÇALVES, T., BRITO, V. y PEL, L. (2012). "Water Vapor Emission From Rigid Mesoporous Materials during the Constant Drying Rate Period" en *Drying Technology: An International Journal*, 30, 5, p. 462-474.

DOMÉNECH-CARBÓ, M.T. y VÁZQUEZ DE AGREDOS PASCUAL, M.L. (2006). "Pigmentos, aglutinantes y estucos. Composición químico-analítica" en Muñoz Cosme, G. Vidal Lorenzo, C. (Eds.). *La Blanca Arquitectura y Clasicismo*. València, Spain: Universitat Politècnica de València, p. 130–147.

DOMÉNECH, A., DOMÉNECH-CARBÓ, M.T, y VÁZQUEZ DE ÁGREDOS PASCUAL, M.L. (2009). "Correlation between spectral, sem/edx and electrochemical properties of maya blue: a chemometric study" en *Archaeometry*, vol. 51, issue 6, p. 1015–1034.

DOMÉNECH-CARBÓ, M.T. *et al.* (2014). "Identification of indigoid compounds present in archaeological Maya blue by pyrolysis-silylation-gas chromatography–mass spectrometry" en *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 105, p. 355–362.

DOMÉNECH-CARBÓ, M.T. y OSETE-CORTINA, L. (2015). "Informe analítico: Análisis de compuestos orgánicos en morteros del sitio arqueológico de Dzibanché" en Straulino, L. (2014). *Hacer mezclas de cal en Dzibanché durante el Clásico Temprano: la temporalidad y la función arquitectónica como determinantes*. Tesis Doctoral. México: UNAM.

DUBOIS LÓPEZ, E.M. (1978). *La ornamentación mural de la Cripta Real de Palenque y su proyecto de conservación*. México D.F.: Escuela de Conservación, Restauración y Museografía "Manuel del Castillo Negrete".

DUCH GARY, J. (1988). *La conformación territorial del Estado de Yucatán: los componentes del medio físico*. Centro Regional de la Península de Yucatán: Universidad Autónoma Chapingo.

DUNHAM, R.J. (1962). "Classification of Carbonate Rocks" en *Mem. Association of Petroleum Geologists*, vol. 1, p. 108-121.

EMBRY, A.F. y KLOVAN, J.E. (1971). "2A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, Northwest Territories" en *Bulletin of Canadian. Petroleum Geology*, vol. 19, p. 730-781.

ESBERT, R. *et al.* (1997). *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos. Manuals de Diagnosi*, 5. Barcelona: Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona.

ESPINOSA, L. CERON, M. y SULUB, Y.A. (1996). "Limestone rocks of the Yucatan Peninsula. Description of the lithology and physical properties based on the results of exploration, investigation and laboratory tests" en *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, vol. 35, issue 4, p. 410-411.

ESTRADA-MEDINA, H. *et al.* (2008) "Análisis de compresión en rocas calizas de Yucatán" en *Memorias del XIV Congreso Internacional Anual de la Somim*, México: Somim, 602-608.

ESPINOSA, R. A. (1897). "Ligeros apuntes para la Geografía y Estadística del Estado de Aguascalientes" en *Edición de El Republicano*. Aguascalientes.

FALCÓN, T. (1999). "Materiales y técnicas en la pintura mural prehispánica" en De la Fuente, B. (coor.). *Pintura Mural Prehispánica*, Barcelona: Lunwerg Editores. p. 33- 39.

FEENEY, R. *et al.* (1983). "Periodic precipitation and coarsening waves. Applications of a competitive particle growth model" en *Journal Chem. Phys.*, 78, p. 1293-1311.

FERNÁNDEZ, S.A. (2008). *Propuesta metodológica para la conservación de la vivienda tradicional de adobe en México*. Tesis doctoral. México: Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía "Manuel del Castillo Negrete", Instituto Nacional de Antropología e Historia.

FLORES DÍAZ, A. (1974). "Los suelos de la República Mexicana" en *El escenario geográfico. Recursos Naturales*. México, D.F: SEP/INAH. p. 60.

FLORES, J.S. y ESPEJEL CARVAJAL, I. (1994). "Tipos de vegetación de la Península de Yucatán. Etnoflora Yucatanense" en *Sostenibilidad Maya*. Mérida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán. Fascículo 3.

FLORES, J.S. y VERMONT, R. (1996). "The secretions and exudates of plants used in Mayan traditional medicine" en *Journal of Herbs, Spicer and Medicinal plants*, vol. 4, issue 1, p. 53-59.

FLORES, J.S. (2002). "Diferentes usos de las leguminosas en la Península de Yucatán" en *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, vol. 3, issue 1, p. 59-63.

FOIS, E. GAMBA, A. y TILOCCA, A. (2003). "On the Unusual Stability of Maya Blue Paint: Molecular Dynamics Simulations" en *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 57, p. 263-272.

FOLAN, W.J. (1978). "Cobá, Quintana Roo, Mexico: an analysis of a prehispanic and contemporary source of sascab" en *American Antiquity*, vol. 43, p. 79-85.

FOLK, R.L. (1959). "Practical petrographic classification of limestones" en *Bulletin of American Association of Petroleum Geology*, vol. 43, p.1-18.

FOLK, R.L. (1962). "Spectral subdivision of limestone types. Classification of Carbonate Rocks" en *American Association of Petroleum Geologist Memoir*, vol. 1, p. 62-84.

FRUCTUOSO-HERNÁNDEZ, G. "Aplicación del "licor" de nopal como aditivo para la cal" en Guerrero Baca, L. F. *Conservación de bienes culturales: acciones y reflexiones*. México: Instituto Nacional de Antropología e Historia, p. 233-239.

FUENTES PORTO, A. y OTERO CORRAL, A. (2010) "La técnica pictórica de los mayas al servicio de la restauración de estucos y pintura mural en México. calakmul: un ejemplo de restauración ecológica" en *XII REUNIÓN TÉCNICA. Vers una conservació-restauració sostenible: reptes i projectes*. Barcelona: Museu Nacional d'Art de Catalunya. p. 1-9.

FUNAMI, T. *et al.* (2005). "Food hydrocolloids control the gelatinization and retrogradation behavior of starch. 2a. Functions of guar gums with different molecular weights on the gelatinization behavior of corn starch" en *Food Hydrocolloids*, 19, p.15–24.

FURLAN, V. (1990). "Causes. Mechanisms and measurement of damage in cultural heritage materials. The state of the art- Mortars, bricks and renderings" en *Advanced workshop Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones*. Pavai, Italia.

GALÁN, E. LEGUEY, S. y CARRETERO, M.I. (2002). "The mortars of the Torre del Oro (Seville, Spain)" en Galán, E. Zezza, F. (Eds.). *Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities*. Lisse: Swets and Zeitlinger, p. 165-172.

GÁRATE ROJAS, I. (1994). *Artes de la cal*. Madrid: Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes y Archivos. Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Instituto Español de Arquitectura. Universidad de Alcalá de Henares. 2ª edición.

GARCÍA GARCÍA, C.P. (1997). *Algunos análisis físico-químicos para la identificación de los minerales componentes de una arcilla*. Medellín: Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia.

GARCÍA S., CLAUDIA A. y BERENICE VALENCIA P. (1997). *El deterioro de piedra en la zona arqueológica de Chicanná, Campeche, y una propuesta para su conservación*. Tesis. México: Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía, Instituto Nacional de Antropología e Historia.

GARCÍA SOLÍS, C. y JÁIDAR BENAVIDES, Y. (2013). "El uso de aditivos orgánicos en mezclas de morteros de cal en el área maya" en Barba Pingarrón, L. i Villaseñor Alonso, I. *La cal, historia, propiedades y usos*. México: Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, p. 113-139.

GARCÍA-SOLÍS, C.A., QUINTANA P. y BAUTISTA-ZÚÑIGA F. (2006). "La identificación de materiales arcillosos y pétreos utilizados en la manufactura del friso modelado en estuco de la SubLIC1 de Calakmul a través de análisis de difracción de rayos X" en Mendoza, M. Arenas, J. Ruvalcaba J. y Rodríguez V. (eds.). *La ciencia de materiales y su impacto en la arqueología*, México, D.F.: Academia Mexicana de Ciencia de Materiales. p. 237-251.

GARCÍA-GIL, G. GRANEL-CASTRO, E. (2010). "Geología" en Durán, R. Méndez, M. (Eds.). *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*. Mérida: CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. p. 4-6.

GENDROP, P. (1983). *Los estilos Río Bec, Chenes y Puuc*. México: UNAM.

GENDROP, P. y HEYDEN, D. (1989). *Arquitectura precolombina*. Madrid: Aguilar.



GEORGE, M y ABRAHAM, T.E. (2007). "pH sensitive alginate-guar gum hydrogel for the controlled delivery of protein drugs" en *Int. J. Pharm.*, 335, p.123–129.

GETTENS, R.J. (1962). "An unsolved problem in ancient pigments" en *American Antiquity*, vol. 27, p. 565–566.

GETTENS, R.J. y STOUT, G.L. (1966). *Painting Materials. A short Encyclopedia*. New York: Dover Pub.

GLICKSMAN M. (1980). *Food hydrocolloids*. CRC Press.

GLICKSMANN, M. (1969). *Gum Technology in the Food Industry*. New York: Academic Press, Inc.

GOMES, M.I., DIAZ GONÇALVES, T. y FARIA, P. (2012). "Análise experimental de argamasses de terra com cais e fibras naturais" en *4 Congresso Portugues de Argamssas e Etics*. Coimbra.

GÓMEZ-GRAS, D. (1999). "Petrologia sedimentària de roques detrítiques" en *Manual de practiques de laboratori. Materials 70*. Bellatina: Servei de Publicacions, Universitat Autònoma de Barcelona.

GONDWE, B.R.N. *et al.* (2010). "Hydrogeology of the south-eastern Yucatan Peninsula: New insights from water level measurements, geochemistry, geophysics and remote sensing" en *Journal of Hydrology*, vol. 389, issues 1–2, p. 1–17.

GONZALVEZ, T. (2007). *Salt crystallization in plastered or rendered walls*. Tesi doctoral. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa.

GOODALL, R.A, *et al.* (2007). "Raman microprobe analysis of stucco samples from the buildings of Maya Classic Copan" en *Journal of Archaeological Science*, vol. 34, p. 666-673.

GRAF, D.L. (1961). "Crystallographic tables for the rhombohedral carbonates" en *The American Mineralogist*, vol. 46.

GUASCH FERRE, N. *et al.* (2013). "Caracterización de materiales constitutivos en la pintura mural maya de la Península de Yucatán, México" en *I Workshop Internacional de estudios arqueométricos en el arte prehispánico*, 3-5 octubre, Valencia.

GUISTETTO R, CHIARI G. (2004). "Crystal structure refinement of palygorskite from neutron powder diffraction" en *European Journal of Mineralogy*, vol. 16, p. 521-532.

GUNASEKARAN, S. ANABAGALAN, G. y PANDI, S. (2006). "Raman and infrared spectra of carbonates of calcite structure" en *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 37, p. 892-899.

GUNN, J. *et al.* (2002). "Bajo sediments and the hydraulic system of Calakmul, Campeche, Mexico" en *Ancient Mesoamerica*, vol. 13, p. 297-315.

HANSEN, E. HANSEN, R.D. y DERRICK, M.R. (1995). "Los Análisis de los Estucos y Pinturas Arquitectónicas de Nakbé: Resultados Preliminares de los Estudios de los Métodos y Materiales de Producción" en *VIII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*, 1994. Guatemala: Museo Nacional de Arqueología y Etnología.

HANSEN, E.F. RODRÍGUEZ-NAVARRO, C. y HANSEN, R.D. (1997). "Incipient Maya Burnt Lime Technology: Characterization and Chronological Variations in Preclassic Plaster, Stucco and Mortar at Nakbé, Guatemala" en Vandiver, V. P. B. Druzik, J.R. Merkel J.F. Stewart J. (eds.) *Materials issues in art and archaeology*. Pittsburgh: Materials Research Society. p. 207–216.

HANSEN, E. y RODRÍGUEZ, C. (2002). "Los comienzos de la tecnología de la cal en el mundo maya: innovación y continuidad desde el Preclásico Medio al Clásico Tardío en Nakbé, Petén, Guatemala" en: Laporte, J.P. Escobedo, H. *XV Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*, Guatemala: Museo de Arqueología y Etnología de Guatemala. p.203-206.

HANSEN, E.F. *et al.* (2003). *Lime Mortars and Plasters Bibliography: Sorted by General Category*. Los Ángeles: Getty Conservation-Institute.

HANSEN, E.F. y CASTELLANOS, C. (2005). "Consideraciones para la definición de estrategias para la conservación de relieves y frisos en estuco en la región Maya" en Laporte, J.P. Arroyo B. y Mejía (eds). *XVIII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2004*. Guatemala: Museo Nacional de Arqueología y Etnología. p.576-584.

HERNÁNDEZ, L. GONZÁLEZ, C.E. y GONZÁLEZ, F. (1991). "Plantas útiles de Tamaulipas" en *Anales del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Botánica*, vol. 62, nº 1, p. 1-38.

HERNÁNDEZ XOLOCOTZI, E.E. BELLO BALTAZAR, E. y LEVY TACHER, S. (1995). "La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola tradicional" en *Aprovechamiento Forestal Tradicional de los Hubches en Yucatán*. México: Colegio de Postgraduados.

HERRERA, H. (2008). "Técnicas que aún causan asombro. Estudian el diseño y materiales mayas para la construcción. Los morteros mayas" en *Ciencia y tecnología*. Mérida.

HICOX, G.D. y HOPKINS, A.A. (1994). *El recetario industrial. Enciclopedia de fórmulas, secretos, recetas, prácticas de taller, manipulacions, métodos de laboratorio, conocimientos útiles. Trabajos lucrativos para pequeñas y grandes industrias*. Barcelona: Gustavo Gili.

HOLMES, W. (1895). *Archaeological studies among the Ancient Cities of Mexico: Monuments of Yucatan*, Vol. 1, part. 1, Anthropological Series. Chicago: Field Columbian Museum.

HUBBARD, B. *et al.* (2003). "Structural Study of Maya Blue: Textural, Thermal and Solid-state Multinuclear Magnetic Resonance Characterization of the Palygorskite-Indigo and Sepiolite-Indigo Adducts" en *Clays and Clay Minerals*, vol. 51, p.318-326.

HUTSON, S.R. *et al.* (2009) "Phosphate fractionation and spatial patterning in ancient ruins: A case study from Yucatan" en *CATENA. Developments in International Geoarchaeology*, vol. 78, issue 3, p. 260-269.

HYMAN, D. (1970). *Pre-Colombian Cements*. Tesis de maestría, Baltimore, John Hopkins.

ISPHORDING, W.C. y WILSON, E. (1973). "Weathering and physical subdivisions of Northern Yucatan" en *Proceedings of the Association of American Geographers*, 5. Washington: Association of American Geographers. p. 117-121.

ISPHORDING, W.C. (1984). "The clays from Yucatán, México; a contrast in genesis in Palygorskite-sepiolite occurrences, genesis, and uses" en *Developments in Sedimentology*, vol. 37, p. 75-86.

IUSS Working Group WRB (2006). *World Reference Base for Soil Resources*. No. 103. Rome: World Soil Resources Reports. FAO.

IUSS Working Group WRB (2007). *World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007*. No. 103. Rome: World Soil Resources Reports. FAO.

IZAGUIRRE, A.A., LANAS, J. y ALVAREZ, J.I. (2009). "Effect of water-repellent admixtures on the behaviour of aerial lime-based mortars" en *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, p. 1095-1104.

IZAGUIRRE, A.A., LANAS, J. y ALVAREZ, J.I. (2010a). "Ageing of lime mortars with admixtures: durability and strength assessment" en *Cem. And Concr. Res.*, vol. 40, p. 1081-1095.

IZAGUIRRE, A.A., LANAS, J. y ALVAREZ, J.I. (2010b). "Behaviour of a starch as a viscosity modifier for aerial lime-based mortars" en *Carbohydr. Polym.*, vol. 80, p. 222-228.

IZAGUIRRE, A.A. (2010c). *Comportamiento de los morteros de cal aérea con aditivos*. Tesis doctoral. España: Universidad de Navarra.

IZAGUIRRE, A.A., LANAS, J. y ALVAREZ, J.I. (2011a). "Effect of a biodegradable natural polymer on the properties of hardened lime-based mortars" en *Materiales de Construcción*, vol. 61, 302, p. 257-274.

IZAGUIRRE, A.A., LANAS, J. y ALVAREZ, J.I. (2011b). "Characterization of aerial lime-based mortars modified by the addition of two different water-retaining agents" en *Cem. And Concr. Res.*, vol. 33, p. 309-318.

JÁIDAR, Y. (2006). *Los extractos vegetales usados como aditivos en los morteros de cal con fines de conservación*. Tesis doctoral. México: Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía, Instituto Nacional de Antropología e Historia.

JÁIDAR, Y. *et al.* (2008). "Informe de los trabajos de conservación y restauración de los elementos decorativos y recubrimientos arquitectónicos del Sitio Arqueológico de Río Bec, Campeche, 3a temporada de conservación, dentro del proyecto arqueológico de Río Bec". México: Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural, Instituto Nacional de Antropología e Historia.

JANOT, F. (2008). *Momies. Rituels d'immortalité dans l'Égypte ancienne*. París: Editions White Star, p. 178-215.

JOUSSEIN, E. *et al.* (2005). "Halloysite clay minerals – a review" en *Clay Minerals*, vol. 40, p. 383-426.

KHARBADE, B.V. y JOSHI, G.P. (1995). "Thin-layer chromatography and hydrolysis methods for the identification of plant gums in art objects" en *Studies in Conservation*, vol. 40, p. 93-102.

KHAYAT, K.H. (1998). "Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials – an overview" en *Cem. Concr. Compos.*, 20, p.171-88.

KITA, Y. (2013). "The functions of vegetable mucilage in lime and earth mortars - A Review" en *3rd Historic Mortars Conference 11-14 September 2013*, Glasgow, Scotland: University of the West of Scotland.

KNAPP, D.R. (1979). *Handbook of Analytical Derivatization Reactions*. New York: J. Wiley and sons. p. 551.

KNÖFEL, D. (1985). "Química del cemento. Calidad del Cemento" en *Prontuario del Cemento, Labahn/Kolhaas*. Editores técnicos asociados, S.A. 5ª edición española, Barcelona: Editorial Reverté, p. 145-229.

LANDA, FRAY DIEGO DE, (1985). *Relación de cosas de Yucatán*, Miguel Rivera (Ed.). Madrid: Historia 16, Crónicas de América 7.

LAPUENTE ARAGÓ, R. (2008). "Conglomerantes. Tema 13". en *Temas de química (II)*. Presentaciones adaptadas al texto del libro para alumnos de ITOP elCCP. Departamento de Ingeniería de la Construcción. Universidad de Alicante.

LESSER, J.M. y WEIDIE, A.E. (1988). "Region 25, Yucatan Peninsula. The Geology of North America" en *Hydrogeology*, vol. 0-2. New Orleans: The Geological Society of America.

LEFTICARIU, M. *et al.* (2006). "Post-Chicxulub depositional and diagenetic history of the northwestern Yucatan Peninsula, Mexico" en *Sedimentary Geology*, vol. 183, p. 51–69.

LEVY TACHER, S. y HERNÁNDEZ XOLOCOTZI E. (1995). "Aprovechamiento forestal tradicional de los Hubches en Yucatán" en *La Milpa en Yucatán: Un Sistema de Producción Agrícola Tradicional*. México: Colegio de Postgraduados. p. 247-270.

LINDHOLM, R.C. y FINKELMAN, R.B. (1972). "Calcite staining; semiquantitative determination of ferrous rich" en *Journal of Sedimentary Research*, vol. 42, issue 1, p. 339-342.

- LITTMAN, E.R. (1957). "Ancient Mesoamerican mortars, plasters and stuccos. Comalcalco part I" en *American Antiquity*, vol. 23, issue 2, p.135-139.
- LITTMAN, E.R. (1958a). "Ancient Mesoamerican mortars, plasters and stuccos: the composition and origin of sascab" en *American Antiquity*, vol. 24, issue 2, p. 172-176.
- LITTMAN, E.R. (1958b). "Ancient Mesoamerican mortars, plasters and stuccos. Comalcalco part II" en *American Antiquity*, vol. 23, p. 2135–2140.
- LITTMAN, E.R. (1959a). "Ancient Mesoamerican mortars, plasters and stuccos. Las Flores, Tampico" en *American Antiquity*, vol. 25, issue 1, p. 117-119.
- LITTMAN, E.R. (1959b). "Ancient Mesoamerican mortars, plasters and stuccos. Palenque, Chiapas" en *American Antiquity*, vol. 25, issue 2, p. 264-266.
- LITTMAN, E.R. (1960a). "Ancient Mesoamerican mortars, plasters and stuccos. The Puuc area" en *American Antiquity*, vol. 25, 3, p. 407-412.
- LITTMAN, E.R. (1960b). "Ancient Mesoamerican mortars, plasters and stuccos. The use of bark extracts in lime plasters" en *American Antiquity*, vol. 25, issue 4, p. 593-597.
- LITTMAN, E.R. (1962). "Ancient Mesoamerican mortars, plasters, and stuccos: floor constructions at Uaxactun" en *American Antiquity*, vol. 28, issue 1, p. 100-103.
- LITTMAN, E.R. (1966). "The classification and analysis of ancient calcareous materials" en *American Antiquity*, vol. 31, issue 6, p. 875-878.
- LITTMAN, E. R. (1980). "Maya Blue: a new perspective" en *American Antiquity*, vol. 45, p. 87–100.
- LITTMAN, E. R. (1982). "Maya Blue further perspectives and the possible use of indigo as the colorant" en *American Antiquity*, vol. 47, p. 404–408.
- LLUVERAS-TENORIO, A. *et al.* (2012). "The Development of a New Analytical Model for the Identification of Saccharides Binders in Paint Samples" en *Plos One*, vol. 7, p. 1-17.

LOPEZ-RAMOS, E. (1975). "Geological summary of the Yucatán Peninsula" en Nairn A.E.M. Stehli F.G. (eds) *The ocean basins and margins, The Gulf of Mexico and the Caribbean*. New York: Plenum. Vol 3.

LOPEZ-RAMOS, E. (1979). *Geología de México*. México, D.F.: t.3. Edición escolar. p. 445.

LORENZO MORA, F. (2009). *Los grafitos mayas de La Blanca, Petén, Guatemala. Estudio, registro y reproducción*. Tesis master. Valencia: Universida Politécnica de Valencia

MADEJOVÁ, J. *et al.* (2002). "Identification of components in smectite/Kaolinite mixtures" en *Clay Minerals*, vol. 37, p. 377-388.

MAGALONI, D. (1995). "El espacio pictórico teotihuacano. Tradición y técnica" en Fuente B. y Staines L. (eds.). *La pintura mural prehispánica en México. I. Teotihuacan*, México: Instituto de Investigaciones Estéticas, Universidad Nacional Autónoma de México. p. 187-226.

MAGALONI, D. *et al.* (1995). "Studies on the Maya mortars technique" en *Materials Research Society Symposium Proceedings*. Pittsburg, Pennsylvania: Materials Research Society. p. 483-489.

MAGALONI, D. (1996). *Materiales y Técnicas de la pintura mural maya*. Tesis de Maestría. Facultad de Filosofía y Letras. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

MAGALONI, D. (1997). "La cal y los mayas: un ejemplo de la necesidad de contextualizar la investigación sobre el México prehispánico" en Staines L. (ed.) *La pintura mural prehispánica en México. Boletín informativo* Año III No. 6-7. México: UNAM-IIE. p. 5-8.

MAGALONI KERPEL, D. (1998). "El arte en el hacer: técnica pictórica y color en las pinturas de Bonampak" en Fuente B. y Staines L. (eds.). *La pintura mural prehispánica en México. II. Bonampak*, México: Instituto de Investigaciones Estéticas, Universidad Nacional Autónoma de México, p. 49-80.

MAGALONI KERPEL, D. (1998). "El arte en el hacer: técnicas de pintura mural" en Uriarte Castañeda, M.T. *et al.* (Eds.) *Fragmentos del pasado: Murales Prehispánicos*. México D.F.: Instituto de Investigaciones Estéticas, Universidad Nacional Autónoma de México-Artes de México. p. 88-109.

MAGALONI, D. (2000). "El arte en el hacer: técnica pictórica y color en las pinturas de Bonampak" en de la Fuente B. (coord.). *La pintura Mural Prehispánica en México. Área maya. Bonampak*. Tomo II. México: UNAM-IIE. p. 49-78.

MAGALONI, D. (2001). "Materiales y técnicas de la pintura mural maya" en Staines L. (coord.). *La pintura Mural Prehispánica en México II. Área maya*. Tomo III. México: UNAM-IIE. p. 155-198.

MAGALONI, D. (2004). "Materiales, técnicas y procedimientos en la pintura mural de Mesoamérica. Metodología de estudio" en de la Fuente B. (coor.) *Muros que hablan. Ensayos sobre la pintura mural prehispánica en México*. México: El Colegio Nacional. p. 141-158.

MAKRESKI, P. y JOVANOVSKI, G. (2003). "Minerals from Macedonia. IX. Distinction between some rhombohedral carbonates by FTIR spectroscopy" en *Bulletin of the Chemists and Technologists of Macedonia*, vol. 22, No. 1, p. 25–32.

MARINACH, C. PAPILLON, M.C. y PEPE, C. (2004). "Identification of binding media in works of art by gas chromatography–mass spectrometry" en *Journal of Cultural Heritage*, vol. 5, p. 231–240.

MARITAN, L. *et al.* (2006). "Influence of firing conditions on ceramic products: Experimental study on clay rich organic matter" en *Applied Clay Sciences*, vol. 31, p. 1-15.

MARTÍNEZ, F. (2009). *El mucílago de nopal como alternativa para la consolidación de adobe. Estudio de un caso: el templo de la Antigua Misión de Nuestra Señora del Pilar Santiago de Cocóspera, Sonora*. Tesis doctoral. México: Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía "Manuel del Castillo Negrete", Instituto Nacional de Antropología e Historia.

MARTINET, G. (1991). "Les mortiers d'époque pharaonique à Karnak" en *Bull.liaison Labo. P. et Ch.*, 172, p. 157.

MARTÍNEZ, W. *et al.* (2008). "Comportamiento Mecánico de Morteros de Cal Apagada Artesanalmente, Adicionados con Mucílago de Cactácea y Ceniza Volcánica, para su uso en Restauración y Conservación de Monumentos Coloniales" en *Revista de la Construcción*, vol. 7, 2, p. 93-101.



MATEOS GONZÁLEZ, F.I. (1997). *Toniná: La pintura mural y los relieves. Técnica de manufactura*. México, D.F.: Instituto Nacional de Antropología e Historia.

MATTEINI, M. y MOLES, A. (1991). *La Química del Restauro. I materiali dell'arte pittorica*, Florencia: Nardini.

MAZZOCCHI, L. (1946). *Cementos y Cales*. Barcelona: Ed. Gustavo Gili.

MAZZULLO, S.J. TEAL, C.S. y GRAHAM, E. (1994). "Mineralogic and crystallographic evidence of lime processing, Santa Cruz Maya site (Classic to Postclassic), Ambergris Caye, Belize" en *Journal of Archaeological Science*, vol. 21, issue 6, p. 785-795.

MEEHAN HERMANSON, P. *et al.* (2010). "Informe preliminar de los trabajos de campo 2009 del proyecto de conservación integral de la zona arqueológica de Ek' Balam, Yucatán". México: Archivo Técnico, Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural, Instituto Nacional de Antropología e Historia.

MEJANELLE, P. *et al.* (2002). "Gas Chromatography-Mass Spectrometry of Monosaccharides after Methanolysis and Trimethylsilylation. Potential for the Characterization of Substances of Vegetal Origin: Application to the Study of Museum Objects, Carbohydrate Analysis by Modern Chromatography and Electrophoresis" en *Journal of Chromatography Library*, vol 66, p. 845-901.

MERWIN, H. E. (1931). "Chemical Analysis of Pigments" en Morris H. Morris, A. Charlot, J. *The Temple of Warriors at Chichen Itza, Yucatan*. Washington D.C.: Carnegie Institution of Washington, Publication 406. p. 395.

MEUNIER, A. (2005). *Clays*. New York: Ed. Springer Berlin Heidelberg.

MILLS, J.S. y WHITE, R. (1987). *The Organic Chemistry of Museum Objects*. London: Butterworths.

MONTOYA IRIGOYEN, C, *et al.* (2004). "Mineralogical, chemical and thermal characterizations of mortars of the church of Santa María de Irache Monastery (Navarra, Spain)" en *Materials and Structures*, vol. 37, nº 270, p. 433-439.

MOORE, D.M. y REYNOLDS, R.C. (1989). *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford: Oxford University Press.

MORRIS, A.A. (1931). "Murals from the Temple of the Warriors and Adjacent Structures" en Morris H.E, Morris A.A. y Charlot J. (Eds.). *The Temple of the Warriors of Chichen Itza*, Yucatan, Washington D.C: Carnegie Institution of Washington. Publication 406, p. 347-384.

MUÑOZ, G. (2006). *Introducción a la Arquitectura Maya*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia. 1ª edición. Valencia: Edita General de Ediciones de Arquitectura.

MUÑOZ G. y C. VIDAL (Eds.) (2005). *La Blanca. Arqueología y Desarrollo*. Valencia: Ediciones de la Universidad Politécnica de Valencia.

MUÑOZ G. y C. VIDAL (Eds.) (2006). *La Blanca. Arquitectura y Clasicismo*. Valencia: Ediciones de la Universidad Politécnica de Valencia.

NEWTON, R.G. y SHARP, J.H. (1987). "An investigation of the chemical constituents of some renaissance plasters" en *Studies in Conservation*. 32, p. 163-175.

NODARI, L. *et al.* (2007). "Hematite nucleation and growth in the firing of carbonate-rich clay for pottery production" en *Journal of European Ceramic Society*, vol. 27, p.4665-4673.

ORMSBY, B.A. *et al.* (2005). "British watercolour cakes from the eighteenth to the early twentieth century" en *Studies in Conservation*, vol. 50, p.45-66.

PABLO-GALÁN, L. (1996). "Palygorskite in Eocene-Oligocene Lagoonal Environment, Yucatán, Mexico" en *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 13, n. 1, p. 94-103.

PACHECO, J.I. y ALONZO, L.A. (2003). "Caracterización del material calizo de la formación Carrillo Puerto en Yucatán" en *Ingeniería*, vol. 7, issue 1, p. 7-19.

PALMONARI, C. y TERRAGLIA, A. (1985). "Manufacture of heavy-clay products with the addition of residual sludges from other ceramic industries" en *Mineralogy and Petrography Acta*, vol. 29-A, p. 547-562.

PANCELLA, R. BART, y R. FURLAN, V. (1989). "Application de la chromatographie en phase gazeuse à l'identification des matières organiques dans les couches picturales" en Schweizer, F. Villiger, V. *Méthodes de conservation des biens culturels* Bern: Haupt. p. 39-44.

PAPACHRISTODOULOU, C. *et al.* (2006). "A study of ancient pottery by means of X-ray fluorescence spectroscopy, multivariate statistic and mineralogical analysis" en *Analytica Chimica Acta*, vol. 573-574, p. 347-353.

PERA, J. y AMBROISE, J. (2004). "New applications of calcium sulfoaluminate cement" en *Cem. Concr. Res.*, 34, p. 671-676.

PENNINGTON, T.D. y SARAQHÁN, J. (2005). *Árboles tropicales en México. Manual para identificación de las principales especies*. México: Ediciones Científicas Universitarias de la Universidad Nacional Autónoma de México.

PÉREZ, A. (2009). "Formulación de un mortero de inyección con mucílago de nopal para la restauración de pintura mural" en *Actas del XVI Coloquio del seminario de estudio y conservación del patrimonio. Defensa y conservación de la Pintura Mural*. México: Instituto de Investigaciones Estéticas (UNAM). p. 36.

PERONI, S. *et al.* (1981). "Lime based mortars for the repair of ancient masonry and possible substitutes" en *Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings*. Roma: ICCROM, p. 63-99.

PETTERSON, R.C. (1984). "The Chemical Composition of Wood (chapter 2) en Rowell, R.M. (ed.). *The Chemistry of Solid Wood. Advances in Chemistry Series 207*. Washington: American Chemical Society.

PETTIJOHN, F.J. (1957). *Sedimentary rocks*. New York: Harper's geosciences series. Harper & Brothers. 2nd ed.

PITTHARD, V. FINCH, P. (2001). "GC-MS Analysis of Monosaccharide Mixtures as their Diethylthioacetal Derivatives: Application to Plant Gums Used in Art Works" en *Chromatographia*, vol. 53, p. 317-321.

PITTHARD, V. *et al.* (2006a). "Study of Complex Organic Binding Media Systems on Artworks Applying GC-MS Analysis: Selected Examples from the Kunsthistorisches Museum" en *Vienna Macromolecular Symposium 238*. Vienna: Vienna University of Technology. p. 37-45.

PITTHARD, V. GRIESSER, M. STANEK, S. (2006b), "Methodology and application of GC-MS to study altered organic binding media from objects of the Kunsthistorisches Museum, Vienna" en *Annali di Chimica*, vol. 96, p.561-573.

POCOSTALES, L. y PRADA, J.L. (2010). *Dossier del Curs teòric i pràctic sobre morters i estucats tradicionals de calç*. Direcció General del Patrimoni Cultural. Generalitat de Catalunya, Barcelona.

POINOT, T., GOVIN, A. y GROSSEAU, P. (2013). "Impact of hydroxypropylguars on the early age hydration of Portland cement" en *Cem. Concr. Res.*, 44, p. 69-76.

POINOT, T., GOVIN, A. y GROSSEAU, P. (2014a). "Importance of coil-overlapping for the effectiveness of hydroxypropylguars as water retention agent in cement-based mortars" en *Cem. Concr. Res.*, 56, p. 61-68.

POINOT, T., GOVIN, A. y GROSSEAU, P. (2014b). "Influence of hydroxypropylguars on rheological behavior of cement-based mortars" en *Cem. Concr. Res.*, 58, p. 161-168.

POLETTE-NIEWOLD, L.A., *et al.* (2007). "Organic/inorganic complex pigments: Ancient colors Maya Blue" en *Journal of Inorganic Biochemistry*, vol. 101, p. 1958–1973.

POLLOCK, H. (1980). "The Puuc. An Architectural Survey of the Hill Conuntry of Yucatan and Northern Campeche, Mexico" en *Memoirs of the Peabody Museum of Archaeology and Ethnology*, vol. 19. Cambridge: Harvard University.

QUIÑONES, G.H. (1975). "Intrazonal Soil Of Northern Yucatán Península" en *Field trip-4. Tropical Soils*. México, D.F: Instituto de Geología, UNAM.

RAMÍREZ-ARELLANES, S. *et al.* (2012). "Concrete durability properties and microstructural analysis of cement pastes with nopal cactus mucilage as a natural additive" en *Materiales de Construcción*, vol. 62, 307, p. 327-341.

REENTS-BUDET, D. (1994). *Painting the Maya Universe: Royal Ceramics of the Classic Period*. Durham: Duke University Press.

REGEV, L. *et al.* (2010). "Distinguishing between calcites formed by different mechanisms using infrared spectrometry: archaeological applications" en *Journal of Archaeological Science*, 37, p. 3022-3029.

RINGLE WILLIAM, M. *et al* (2003). "The decline of the East. Classic to Postclassic Transition at Ek'Balam, Yucatan" en Demarest, A.A., Rice, P.M.,

Rice, D.S. *The Terminal Classic in the Maya Lowlands: Collapse, Transition and Transformation*. University Press of Colorado, Boulder, p. 485-516.

RIXOM, R. y MAILVAGANAM, N. (1999). *Chemical admixtures for concrete*. London: E&FN Spon, p. 214–215.

RODRIGUEZ-MORA, O. (2003). “Morteros. Guía general” en *Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero (AFAM)*. Madrid.

ROSELL AMIGÓ, J.R. (2013). *Aportaciones al conocimiento del comportamiento deformacional de pastas de cal. Tamaño y formas de las partículas y su viscosidad*. Tesis doctoral. Barcelona: Departament de Construccions Arquitectòniques I. Universitat Politècnica de Catalunya.

ROUNDHILL, L.S. *et al.* (1989). *Maya Blue: A Fresh Look at an Old Controversy. Seventh Palenque Round Table, 1989 Vol. IX*. Robertson M.G. and Fields, V.M. (Eds.). San Francisco: PreColumbian Research Institute. p. 253-256.

RUIZ, M.E. (1985). Observaciones sobre canteras en Petén, Guatemala. Antigua, Guatemala: Centro de Investigaciones Regionales de Mesoamérica (CIRMA), Cuaderno 10, p. 421-449.

RUIZ MARTÍN, M.C. (2007). *El uso del pixoy como fijativo de capas pictóricas al seco en pintura mural prehispánica: el caso de la Estructura 1 de Ek'Balam, Yucatán*. Tesis doctoral. México: Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía, Instituto Nacional de Antropología e Historia.

RUIZ MARTÍN, M.C. (2009). *El pixoy como material de conservación de pintura mural y relieves policromos en el área maya*. Yucatán: Centro INAH.

RUIZ MARTIN, M.C. (2010). “El pixoy como material de conservación de pintura mural y relieves policromos en el área maya” en *Estudios de cultura maya* [online], vol.35, p. 63-90.

RUSSEL, S.A. (1927). *Stone preservation committee report (Appendix I)*. London: H.M. Stationary Office.

SÁNCHEZ DEL RIO, M. *et al.* (2004). “Microanalysis Study of Archaeological Mural Samples Containing Maya Blue Pigment” en *Spectrochimica Acta Part B*, vol. 59, p.1619-1625.

SÁNCHEZ DEL RÍO, M. SUÁREZ, M. GARCÍA-ROMERO, E. (2009). "The occurrence of palygorskite in the Yucatán peninsula: ethno-historic and archaeological contexts" en *Archaeometry*, vol. 51, issue 2, p. 214–230.

SÁNCHEZ DEL RÍO, M. *et al.* (2011). "The Maya Blue Pigment. In: Developments in palygorskite-sepiolite research. A new outlook on these nanomaterials" en *Developments in Clay Science*, vol. 3, p. 453-476.

SÁNCHEZ DEL RÍO, M. *et al.* (2011). "The Maya Blue Pigment" en Galán, E. y Singer, A. (Eds.). *Developments in Palygorskite-Sepiolite Research*. Oxford, England: Elsevier.

SAPPER, K. (1896). *Sobre la Geografía Física y la Geología de la Península de Yucatán*. Bo. N°. 3. México, D.F.: Instituto Geológico de México.

SCALARONE, D. CHIANTORE, O. y RIEDO, C. (2008). "Gas chromatographic/mass spectrometric analysis of on-line pyrolysis–silylation products of monosaccharides" en *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 83, p.157–164.

SCHREINER, T. (2001). "Fabricación de cal en Mesoamérica: Implicaciones para los Mayas del Preclásico en Nakbe, Petén" en Laporte, J.P. Suasnívar A.C. y Arroyo (eds.) *XIV Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2000*, Guatemala: Museo Nacional de Arqueología y Etnología. (versión digital). p.356-368.

SCHREINER, T. (2002). *Traditional Maya Lime Production: Environmental and Cultural Implications of a Native American Technology*. Tesis Doctoral, Berkeley: University of California.

SCHREINER, T.P. (2003) "Aspectos rituales de la producción de cal en Mesoamérica: Evidencias y perspectivas de las Tierras Bajas Mayas" en (Laporte, J.P. Arroyo, B. Escobedo H. y Mejía H. (eds.) *XVI Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2002*. Guatemala: Museo Nacional de Arqueología y Etnología. p. 480-487.

SCHULTE, P. *et al.* (2010). "The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary" en *Science*, vol. 327, issue 5970, p. 1214–1218.

- SEABRA, M.P. *et al.* (2009). "Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars" en *Construction and Building Materials*, 23, p. 1147-1153.
- SEDOV, S. *et al.* (2007). "Soil genesis in relation to landscape evolution and ancient sustainable land use in the northeastern Yucatan Peninsula, Mexico" en *Atti della Società Toscana de Scienze Naturali di Pisa*, vol 112, p. 115–126.
- SEDOV, S. *et al.* (2008). "Micromorphology of a soil catena in Yucatán: pedogenesis and geomorphological processes in a tropical karst landscape" en Kapur, S. Mermut, A. y Stoops, G. (Eds.), *New Trends in Soil Micromorphology*. Berlin: Springer. p. 19–37.
- SETZER, M.J. (1990) "Interaction of Water with Hardened Cement Paste" en *Ceramic Transactions, Advances in Cementitious Materials*, vol. 16, p. 415-439.
- SGM (2005). *Carta Geológica-Minera. Ciudad del Carmen E15-6. Campeche y Tabasco. Escala 1:250.000*. México: Servicio Geológico Mexicano (SGM).
- SGM (2007a). *Carta Geológica de México. Texto Explicativo. Escala 1:2'000.000. 6ª edición*. México: Servicio Geológico Mexicano (SGM).
- SGM (2007b). *Carta Geológico-Minera. Estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Escala 1:500.000*. México: Servicio Geológico Mexicano (SGM).
- SHARER, R.J. (1998). *La civilización maya*. México D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- SHEPARD, A.O. (1962). "Maya Blue: Alternative Hypotheses" en *American Antiquity*, vol. 27, p. 565-566.
- SICKELS, L.B. (1981). "Organic additives in mortars" en *Edinburgh Architecture Research (EAR)*, vol. 8, p. 7-20.
- SICKELS, L.B. (1982). "Organics vs. Synthetics: their use as Additives in Mortars" en *Mortars, Cements and Grouts used in the Conservation of Historic Buildings, Symposium*. Rome: ICCROM, p. 38-45.
- SIDDALL, R. (2000). "The use of volcanoclastic material in Roman hydraulic concretes: a brief review" en McGuire, B. Griffiths D. y Setwart, I. *The Archaeology of Geological Catastrophes* (Special Publications, 171). London: Geological Society. p. 339-344.

SJOSTROM, E. (1993). *Wood Chemistry. Fundamentals and Applications*. Second edition. San Diego: Academic press. p. 292.

SPYCHALA, E. (2015). "The effect of lime and cellulose ether on selected properties of plastering mortar" en *Procedia Engineering*, 108, p. 324-331.

SOLLEIRO-REBOLLEDO, E. *et al.* (2011). "Genesis of hydromorphic Calcisols in wetlands of the northeast Yucatan Peninsula, Mexico" en *Geomorphology*, vol. 135, p. 322–331.

SPLÉ, A. VILA, A. (1990). "La micromorfología de suelos aplicada a la arqueología. Dos casos a modo de ejemplo: el cingle vermell (Osona) y Mediona i (Alt penedes)" en *Xàbiga*, vol. 6, p. 31-42.

STRAULINO, L. (2015). *Hacer mezclas de cal en Dzibanché durante el Clásico Temprano: la temporalidad y la función arquitectónica como determinantes*. Tesis doctoral (Dr. Sergey Sedov). México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

SUÁREZ, M. y GARCÍA-ROMERO, E. (2006). "FTIR spectroscopic study of palygorskite: Influence of the composition of the octahedral sheet" en *Applied Clay Science*, vol. 31, p. 54-163.

TERCIER, J. (1932). *Geological Investigation in Peninsula of Yucatan*. Informe inédito.

THOMPSON, E.H. (1932). *People of the Serpent, Life and Adventure Among the Mayas*. N. Cork: The Riverside Press Cambridge.

TORRES, L.M. (1988). "Maya Blue: How the mayas could have made the Pigment", en *Materials issues in Art and Archaeology, Materials Research Society Proceedings*, núm. 123, p. 123-128.

TORRES-ACOSTA, A.A. y CANO-BARRITA, P.F. de J. (2007): "Las bondades del nopal" en *Construcción y Tecnología*, 233, p. 44-49.

TORRES, P. (1998). "La goma de nopal: una aportación a la conservación del adobe" en *Antropología*, 51, p. 35-41.

TORRES P. *et al.* (2010). "Proyecto de investigación aplicada: Usos del mucílago y de la goma de nopal en la conservación de acabados arquitectónicos. Informe general 2010". México: Coordinación Nacional de



Conservación del Patrimonio Cultural, Instituto Nacional de Antropología e Historia.

TOZZER, A.M. (1966). *Landa's Relación de las Cosas de Yucatán. Papers of the Peabody Museum of Archaeology and Ethnology*, Vol. 18. Harvard University XVIII. New York: Kraus.

TRINDADE, M.J. *et al.* (2009). "Mineralogical transformation of calcareous rich clays with firing: A comparative study between calcite and dolomite rich clays from Algarve, Portugal" en *Applied Clay Science*, vol. 42, p. 345-355.

TUCKER, M.E. (1985). "Shallow marine carbonate facies and facies models" en Brenchley P.J. & Williams B.P.J. (eds). *Sedimentology, recent development and applied aspects*. London: Geological Society of London, Special Publication 18, 139–161.

TUCKER, M.E. PAUL WRIGHT, V. y DICKSON, J.A.D. (1990). *Carbonate sedimentology*. Oxford: Blackwell Science Ltd.

Universidad Complutense (Madrid); Dpto. de Geología. Área de Cristalografía y Mineralogía. García Romero, E. y Suárez Barrios, M. *Las Arcillas: Propiedades y Usos*. <http://www.usal.es/~delcien/doc/GA.PDF> [Consulta: febrer 2015]

URRUTIA-FUCUGAUCHI, J. *et al.* (2011). "The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico" en *Geofísica Internacional*, vol. 50, núm. 1, p. 99-127.

VALLANCE, S.L. *et al.* (1998). "The development and initial application of a gas chromatographic method for the characterization of gum media" en *Journal of the American Institut for Conservation*, vol. 37, p. 294-311.

VAN BALEN, K. *et al.* (1999). "Procedure for a mortar type identification: a proposal" en *International RILEM workshop on historic mortars: characteristics and tests proceedings of the historic mortars*. Bagnaux: rilem. p. 61-70.

VAN DER MAREL, H.W. y BEUTELSPACHER, H. (1976). *Atlas of Infrared Spectroscopy of Clay Minerals and their Admixtures*. Amsterdam – Oxford – New York: Elsevier Scientific Publishing Company.

VAN OLPHEN, H. (1967). "Maya Blue: a clay mineral-organic pigment?" en *Science*, vol. 154, p. 465–467.

VARAS, M.J. ALVAREZ DE BUERGO, M. y FORT, R. (2005). "Natural cement as the precursor of Portland cement: Methodology for its identification" en *Cement and Concrete Research*, vol. 35, p. 2055-2065.

VARGAS DE LA PEÑA, L. *et al.* (2001). *Informe sobre los trabajos de campo realizados en el sitio de Ek'Balam entre el 25 de marzo y el 26 de abril del año 2001 (inédito)*. Mérida: Archivo de Arqueología del Centro INAH-Yucatán.

VARGAS DE LA PEÑA, L. y CASTILLO BORGES, V. (2001a). "La pintura mural prehispánica en Ek'Balam" en Staines, L. *La Pintura mural Prehispánica en México II, Área maya*. México: UNAM, p.402-418.

VARGAS DE LA PEÑA, L. *et al.* (2002). *Informe sobre los trabajos de campo realizados en el sitio de Ek'Balam durante la temporada del año 2002 (inédito)*. Mérida: Archivo de Arqueología del Centro INAH-Yucatán.

VATÁN, A. (1967). *Manuel de sedimentologie*. Paris: Technip.

VÁZQUEZ DE ÁGREDOS, M<sup>a</sup>.L. (2002). "Consideraciones sociales y técnicas sobre los especialistas en la preparación del estuco en el área maya: la repercusión de sus conocimientos en su conservación y en la de la pintura mural" en Piqueras Sánchez, N. (coord.) *Espacios Sagrados en la Arquitectura Maya en la obra de Teoberto Maler*, Valencia: Universitat de València. p.120-135.

VÁZQUEZ DE ÁGREDOS, M<sup>a</sup>.L. (2006). *Recursos materiales y técnicas pictóricas en los murales de las tierras bajas mayas*. Tesis Doctoral inédita (Dir. Cristina Vidal). Valencia: Universidad de Valencia,

VÁZQUEZ DE ÁGREDOS, M<sup>a</sup>.L. (2007). *Caracterización químico-analítica de azul maya en la pintura mural de la Tierras Bajas Mayas*. Tesis Doctoral inédita (Dir. M<sup>a</sup> Teresa Doménech Carbó, Dr. Antonio Doménech Carbó y Dra. Pilar roig Picazo). Valencia: Universidad Politécnica de València.

VÁZQUEZ DE ÁGREDOS, M<sup>a</sup>.L. (2010). *La pintura mural maya. Materiales y técnicas*, México: Universidad Nacional Autónoma de México.

VICAT, L.J. (1818). *Recherches expérimentales sur Les Chaux de Construction, les Bétons et les Mortiers ordinaires*. Ancien Élevé de l'École Polytechnique, Ingénieur de Corps Royal des Ponts et Chaussées de France, Paris: l'École Polytechnique, Ingénieur de Corps Royal des Ponts et Chaussées de France.

VIDAL, C. y G. MUÑOZ (Eds.) (2007). *La Blanca y su entorno. Cuadernos de arquitectura y arqueología maya*. Valencia: Ediciones de la Universidad Politécnica de Valencia.

VILLASEÑOR, I. y PRICE C.A. (2008). "Technology and decay of magnesian lime plasters: the sculptures of the funerary crypt of Palenque, Mexico" en *Journal of Archaeological Science*, vol. 35, p. 1030-1039.

VILLASEÑOR, I. y AIMERS, J.J. (2009). "Una de Cal por las que Van de Arena: Un Estudio Diacrónico de los Estucos de Calakmul y Palenque" en *Estudios de Cultura Maya*. Vol. XXXIII. Mexico City: Centro de Estudios Mayas. Instituto de Investigaciones Filológicas, UNAM.

VILLASEÑOR, I. y GRAHAM E. (2010). "The use of volcanic materials for the manufacture of pozzolanic plasters in the Maya lowlands: a preliminary report" en *Journal of Archaeological Science*, vol. 37, p. 1339–1347.

VILLASEÑOR, I. (2010). *Building materials of the ancient Maya. A study of archaeological plasters*. Saarbrücken: Lambert.

VILLASEÑOR ALONSO, I. y BARBA PINGARRÓN L.A. (2011). "El estudio de materiales constructivos en la arqueología mesoamericana" en *Anales de Antropología*, vol. 45, p. 79-98.

VILLASEÑOR ALONSO, I. y BARBA PINGARRÓN, L. (2012). "Los orígenes tecnológicos de la cal" en *Cuicuilco*. México: Escuela Nacional de Antropología e Historia Distrito Federal, vol. 19, núm. 55, p. 11-41.

VILLEGAS, M. *et al.* (1995). "Relative dating of the stucco relieves at Palenque, Chiapas based on variation of material preparation" en *Materials Research Society Symposium Proceedings*, vol. 352, p. 469-481.

VIOLET LE DUC, E. (1838). *Le voyage d'Italie 1836-1837. Adresseées à sa famille*. Paris: L. Laget.

VITRUVIO, M.L. (1982). *Los diez libros de arquitectura, traducción directa del latín y notas por Agustín Blázquez, profesor de la Universidad de Barcelona*. Barcelona: Col. Obras Maestras. Editorial Iberia, S.A.

V.V.A.A. (1998). *Guía práctica de la Cal y el Estuco*. León: Editorial de los Oficios de León.

V.V.A.A. (2007). *La Blanca y su entorno. Cuadernos de arquitectura y arqueología maya*. Vidal Lorenzo, C. y Muñoz Cosme, G. (Eds.). Valencia: Universitat Politècnica de València.

V.V.A.A. (2013). *La cal. Historia, propiedades y uso*. Barba Pingarrón L. y Villaseñor, I. (eds). México: Instituto de Investigaciones Antropológicas de México, UNAM.

WARD, W.C. (1985). "Quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula" en Weidie, A.E., Ward, W.C., Back, W. (Eds.), *Geology and Hydrogeology of the Yucatan and Quaternary Geology of Northeastern Yucatan Peninsula*. New Orleans, LA: New Orleans Geological Society. p. 23– 95.

WHISTLER R. (1973). *Industrial Gums*. Academic Press.

WIKLANDER, L. (1955). "Cation and anion Exchange phenomena. 4" en *Chemistry of the soil*. New York: Reinhold Publ. Corp. p. 373.

YACAMÁN, J. *et al.* (1996). "Maya Blue Paint: An Ancient Nanostructured Material" en *Science*, vol. 273, p. 223-225.

ZHANG, J. y SCHERER, G.W. (2011). "Comparison of methods for arresting hydration of cement" en *Cem. Concr. Res.*, 41, p. 1024-1036.

ZULUAGA, M.C. ORTEGA, L.A. y ALONSO OLAZABAL, A. (2010). "Influencia de la composición de las arcillas en la estimación de las temperaturas de cocción cerámicas arqueológicas en base a la mineralogía" en *Macla Revista de la sociedad española de mineralogía*, vol 16, p.30-31.

*Normativas consultadas:*

UNE-EN 459-1:2011. *Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.*

UNE-EN 1015-1:1999; UNE-EN 1015-1:1999/A1:2007. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 1: Determinación de la distribución granulométrica (por tamizado).*

UNE-EN 1015-2:1999; UNE-EN 1015-2:1999/A1:2007. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo.*

UNE-EN 480-13:2010+A1:2011. *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 13: Mortero de referencia para albañilería para ensayos de aditivos para morteros.*

UNE-EN 934-3:2010+A1:2012. *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 3: Aditivos para morteros para albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado.*

UNE-EN 196-1:2005. *Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.*

*Commission 25-PEM Protection et Érosion des Monuments. Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. Recommandations provisoires RILEM (Essais et recherches, matériaux et constructions, vol. 13, n 75, 1980).*

UNE-EN 1015-19:1999; UNE-EN 1015-19:1999/A1:2005. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido.*

UNE-EN 1015-11:2000; UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.*

UNE-EN 1015-3:2000; UNE-EN 1015-3:2000/A1:2005. *Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).*

UNE-EN 1015-6:1999; UNE-EN 1015-6:1999/A1:2007. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.*

UNE-EN 1015-7:1999. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco.*

prEN 1015-8:1999. *Methods of test for masonry. Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar.*

UNE-EN 1015-9:2000; UNE-EN 1015-9:2000/A1:2007. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco.*

II. *Tests defining the properties connected with the presence and the movement of water. Test No. II. 6. Water absorption coefficient (capillarity), (RILEM, 1980).*

II. *Tests defining the properties connected with the presence and the movement of water. Test No. II. 5. Evaporation curve, (RILEM, 1980).*

NORMAL-29/88. *Misura dell'Indice di Asciugamento (Drying Index), (NORMAL, 1988).*

II. *Tests defining the properties connected with the presence and the movement of water. Test No. II. 1. Saturation coefficient, S, (RILEM, 1980).*

I. *Tests defining the structure. Test No. I.1. Porosity accesible to water (RILEM, 1980).*

I. *Tests defining the structure. Test No. I.2. Bulk densities and real densities, (RILEM, 1980).*

EN ISO 12572:2001. *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties, (CEN, 2001)*

UNE-EN 13295:2005. *Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia a la carbonatación.*

UNE-EN 14630:2007. *Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la profundidad de carbonatación en un hormigón endurecido por el método de la fenolftaleína.*

I. *Tests defining the structure. Test No. I.5. Pore-size distribution (mercury porosimeter).*

UNE-EN 12371:2011. *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad.*

UNE-EN 12504-4:2006. *Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.*

UNE 103300:1993. *Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.*

ISO 15901-1:2005: *“Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption - Part 1: Mercury porosimetry”*; ISO 15901-2:2006: *“Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption - Part 2: “Analysis of mesopores and macropores by gas adsorption”*”.

*Páginas web consultadas:*

Backyard Nature.

<<http://www.backyardnature.net>> [Consulta: mayo 2015]

Flora la Península de Yucatán.

<<http://www.cicy.mx/sitios/flora/>> [Consulta: febrero 2015]

*Foundation for the Advancement of Mesoamerican Studies.*

<<http://www.famsi.org>> [Consulta: octubre 2009]

*GeoInfoMex, El Banco de Datos del SGM (Servicio Geológico Mexicano).*

<<http://mapasims.sgm.gob.mx/GeoInfoMexDb/>> [Consulta: mayo 2015]

Handbook Mineralogy.

<[www.handbookmineralogy.org](http://www.handbookmineralogy.org)> [Consulta: enero 2015]

La Gran Época. Periodismo con valores.

<<http://www.lagranepoca.com>> [Consulta: julio 2015]

Latin American Studies.

<<http://www.latinamericanstudies.org>> [Consulta: octubre 2009]

Marine Biology.

<<http://www.iteachbio.com/Marine-Biology/marine.html>> [Consulta: junio 2014]

Universidad de Castilla – La Mancha.

<<http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/arcillas.htm>> [Consulta: diciembre 2012]