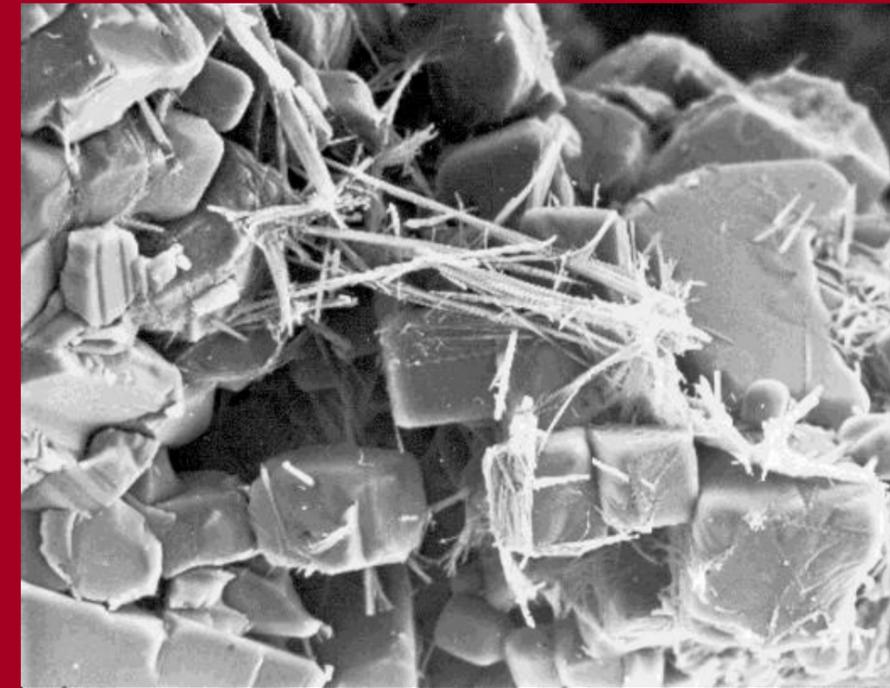




Cristalización de sales en calcarenitas:
aplicación al *Monasterio de San Jerónimo*, Granada

Carolina Cardell
Fernández

Cristalización de sales en calcarenitas:
aplicación al
MONASTERIO DE SAN JERÓNIMO,
GRANADA



Carolina Cardell Fernández

**CRISTALIZACIÓN DE SALES EN CALCARENITAS:
APLICACIÓN AL MONASTERIO DE SAN JERÓNIMO,
GRANADA**

CAROLINA CARDELL FERNÁNDEZ

**CRISTALIZACIÓN DE SALES EN CALCARENITAS:
APLICACIÓN AL MONASTERIO DE SAN JERÓNIMO,
GRANADA**

GRANADA
2003

Este Trabajo de Investigación fue presentado como Tesis Doctoral por Dña. Carolina Cardell Fernández para optar al grado de Doctora en Ciencias Geológicas. Fue dirigida por el Dr. D. José Rodríguez Gordillo y defendida el 27 de Febrero de 1998 en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada ante el Tribunal formado por:

Presidente: Dr. D. Miguel Ortega Huertas, Universidad de Granada

Vocales: Dr. D. Rafael Arana Castillo, Universidad de Murcia

Dr. D. Cesáreo Sainz Jiménez, C.S.I.C.

Dr. D. Anronio García Casco, Universidad de Granada

Secretario: Dr. D. Antonio Orihuela Uzal, C.S.I.C.

Editado con la colaboración de:

- Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada
- Grupo de Investigación de la Junta de Andalucía RNM 179
- Proyecto de Investigación MAT 2002-03227

© CAROLINA CARDELL FERNÁNDEZ

© UNIVERSIDAD DE GRANADA. CRISTALIZACION DE SALES EN CALCARENTAS:
APLICACIÓN AL MONASTERIO DE SAN JERÓNIMO, GRANADA

ISBN: 84-933112-5-1. Depósito Legal: GR-1448/2003

Edita: Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada

Imprime: Plácido Cuadros, S.L. Granada. España

Diseño portada: Carolina Cardell

Printed in Spain

Aquellos que se enamoran de la práctica sin ciencia,
son como un marino que sube al barco sin timón ni
brújula y nunca puede estar seguro hacia dónde va.

Leonardo da Vinci

A Antonio

Agradecimientos

Mi agradecimiento más sincero al Departamento de Mineralogía y Petrología por haberme concedido la oportunidad de realizar este Trabajo de Investigación como uno más de sus miembros. Desde un principio (ya lejano) muchos han sido los compañeros que han confiado en mi labor y me han ayudado humanamente a finalizarla.

A mi director de Tesis, el Dr. D. José Rodríguez Gordillo por su ayuda a lo largo de estos años.

Al Dr. D. Antonio García Casco, que desde el primer momento me ha dado ánimo para continuar y ha hecho posible que concluya esta Tesis sin perder la cabeza. Por las largas horas pasadas frente al ordenador y los cientos de “scaneos”; ya no hay más “retorno de carro”.

Al Dr. D. Antonio Sánchez Navas por su constante amabilidad y asesoramiento relacionados con problemas puntuales de sales y el estudio de las estratigrafías pictóricas.

Me considero perteneciente a dos generaciones de becarios, y a todos ellos quiero expresarles mi agradecimiento por su compañerismo. Muy especialmente me han soportado los últimos meses de escritura Africa, Charo, Inma y Karmah. La sincera amistad que he encontrado en ellas ha sido un descubrimiento estupendo.

A las monjas jerónimas por su colaboración y buena voluntad al permitirme trabajar con comodidad en el Monasterio de San Jerónimo. Por fin se cumplieron las promesas de restauración del Monumento.

A Isabel y Alicia del Centro de Instrumentación Científica (C.I.C.) de la Universidad de Granada, por haber hecho en muchos casos lo imposible con mis muestras.

Al Centro “Gino Bozza” de Milán (Italia) por haber realizado las porosimetrías de las calcarenitas empleadas en el experimento de cristalización de sales.

A Emasagra, S.A. por haber puesto a mi disposición cientos de análisis de aguas.

A Geotécnica del Sur, S.A. por permitirme consultar sus informes de cimentación de suelos en la ciudad de Granada.

Al Grupo de Investigación 4065 de la Junta de Andalucía por la financiación prestada para la realización de esta Tesis Doctoral. Su responsable el Dr. D. Miguel Ortega Huertas siempre ha estado pendiente de mi quehacer, y me ha procurado soluciones humanas y económicas inestimables.

Al Proyecto de Investigación PB93-1145 (DGICYT).

A mi familia, por haberme dado lo mejor que tengo.

RESUMEN

En el presente Trabajo de Investigación se cubren dos objetivos:

- profundizar en el conocimiento del fenómeno de cristalización de sales desde un punto de vista experimental y teórico. Para ello se ha diseñado un experimento en laboratorio consistente en evaluar la acción de distintas soluciones salinas sobre una calcarenita. El origen, la composición y los mecanismos que dan lugar a diversas morfologías de sales, así como el deterioro que éstas ocasionan al cristalizar, han permitido concretar en la realidad de la Iglesia de San Jerónimo (Granada) el estudio teórico y experimental desarrollado;
- caracterizar las principales patologías que afectan al Monasterio e Iglesia de San Jerónimo a través del estudio de sus materiales constructivos y ornamentales, productos de alteración y causas que los generan. Dada su relevancia, se presta especial atención a la presencia masiva de eflorescencias, subeflorescencias y costras salinas.

Previamente a la realización de los ensayos de laboratorio se aborda el estudio del Monasterio, al marcar la naturaleza de las sales que en éste aparecen y las condiciones medioambientales en que cristalizan, las directrices del diseño del experimento de cristalización de sales. Se establecen las causas y factores que determinan y controlan la aparición de sales en los materiales constructivos y ornamentales del monumento (e.g. material pétreo, morteros, estucos, ladrillos, pintura mural y esculturas policromadas). Para ello se ha realizado la caracterización química, mineralógica y textural de los soportes afectados por las sales, de éstas, y del estado de conservación de aquellos.

Por tanto, este Trabajo se articula en dos partes: la primera aborda el estudio del Monasterio, sus materiales y factores que condicionan su estado de deterioro; la segunda parte desarrolla el estudio experimental de la acción de soluciones salinas en una calcarenita (material más utilizado en la construcción del monumento). Finalmente, de la correlación entre los datos obtenidos en laboratorio y los del Monasterio se establecen unas conclusiones generales, en un intento de compaginar las teorías existentes sobre los mecanismos de cristalización de sales y la realidad del monumento.

Se ha elegido el Monasterio de San Jerónimo como base de correlación con los resultados experimentales, por ser el desarrollo masivo de sales en el interior de su Iglesia el tipo de alteración más espectacular y dañino. Las sales están asociadas a la presencia de agua (ascenso capilar e infiltración) y a defectos estructurales del edificio. Los deterioros por ellas ocasionados afectan a los materiales constructivos provocando su descohesión física. La infiltración de soluciones salinas a través de la calcarenita da lugar a eflorescencias y subeflorescencias que afectan a las pinturas murales de la zona baja del ábside y habitaciones laterales, así como a la base de esculturas y otros elementos decorativos ubicados en la parte superior del ábside.

El estudio del Monasterio ha desempeñado un papel fundamental en este Trabajo, dado que puede considerarse un “gran laboratorio a escala real” en el que se han delimitado diferentes causas y/o microambientes conducentes al fenómeno de cristalización de sales. El deterioro ocasionado por las sales depende de su localización, ya sea en material constructivo u ornamental (e.g. calcarenita, morteros, pintura mural...), por lo que se ha procedido al muestreo y determinación exhaustiva de las formas de alteración, tipos, hábitos, forma de agregarse y distribución de las diferentes sales en el Monasterio. Por su parte, se ha elegido como soporte pétreo para el ensayo de laboratorio una calcarenita, al ser éste el material más afectado por la cristalización de sales en la Iglesia de San Jerónimo. En la elección del soporte también se han considerado otras cuestiones:

- ha sido profusamente empleada en la arquitectura monumental de Granada. A ello ha contribuido la proximidad de canteras a la ciudad, y ser una roca blanda de fácil trabajabilidad;

- posee un sistema poroso muy sensible a los procesos de cristalización de sales;
- con objeto de realizar comparaciones adecuadas entre los procesos de cristalización de sales ocurridos en el Monasterio y los realizados en laboratorio, el material experimentado debe ser el mismo, o al menos similar, en cuanto a propiedades químicas, físicas y mecánicas.

Una vez identificadas en la Iglesia las diferentes especies salinas y su asociación, se ha diseñado el experimento de cristalización de sales. El ensayo ha consistido en la cristalización inducida de sales en una probeta de calcarenita bajo condiciones ambientales semejantes a las reinantes en la Iglesia. Los experimentos se han realizado con cincuenta y dos soluciones salinas de distinta naturaleza y concentración elaboradas con SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ . Las soluciones ensayadas, tanto las simples como las mezcla (combinación de soluciones simples), han sido de la misma naturaleza que las sales detectadas en el Monasterio. Los objetivos cubiertos con este experimento han sido:

- identificación del tipo de transporte de fluido que actúa durante el crecimiento cristalino;
- valoración de la influencia que determinados cationes y aniones, y diversas combinaciones y concentraciones de los mismos tienen en la morfología de las sales cristalizadas y su emplazamiento en la probeta;
- determinación de los efectos de alteración que cada solución (simple o mezcla) tiene sobre el soporte pétreo;
- relación entre el sustrato poroso húmedo y el hábito de los cristales; y,
- establecimiento de la influencia que ejercen la sobresaturación de las soluciones salinas y su evaporación en la forma cristalina precipitada, el lugar de precipitación de la sal en la calcarenita y su efecto cementante o disruptivo.

Las diferencias observadas entre la realidad del Monasterio y los resultados de laboratorio, en cuanto a forma de alteración del sustrato pétreo y morfología de las sales cristalizadas, han confirmado la dificultad de extrapolar un modelo experimental general a la realidad concreta de un determinado monumento. En este Trabajo se ha constatado que las discrepancias se deben a varias limitaciones insoslayables en experimentos de este tipo, entre las que cabe destacar:

- el suministro restringido y no prolongado en el tiempo de la solución salina a la probeta. Se ha comprobado que el efecto alterológico de la cristalización de sales es un fenómeno acumulativo en el tiempo, con un aumento sustancial en el grado de deterioro del sustrato;
- el tamaño de las probetas empleado no es equiparable a la dimensión de los materiales sobre los que, en la realidad del monumento, actúan las soluciones salinas. Ello incide sobremanera en el proceso de evaporación y en consecuencia en la localización de las sales en el sustrato; y
- en el experimento no se ha considerado la influencia de la interacción entre varios soportes porosos (e.g. calcarenita-revocos-pintura mural), tal y como ocurre en el Monasterio.

Por último decir que el tipo de estudios realizados en este Trabajo de Investigación se revelan de vital importancia a la hora de abordar un proceso de conservación-restauración en cualquier monumento en general, y en el Monasterio de San Jerónimo en particular. La identificación y caracterización de las sales que cristalizan en el Monasterio constituyen un importante criterio preliminar en el diagnóstico de las causas y mecanismos de deterioro y, por tanto, son de una inestimable ayuda para proponer una estrategia de intervención.

ABSTRACT

In this study two objectives were pursued:

- To study in depth the salt crystallisation phenomenon from two points of view; theoretical and practical. To this end, a laboratory test was designed in order to evaluate the crystallisation effects of different salt solutions in a calcarenite (a sedimentary rock). Diverse salt morphologies arising due to different origins, composition and mechanisms, as well as the weathering that salts produce, made it possible to specify the experimental and theoretical study and corroborate its relation to reality in the monument.
- To characterise the principal weathering forms of the Monastery and Church of San Jerónimo (Granada, Spain) through the study of its construction and ornamental materials, alteration products and causes of degeneration. Special attention was paid to efflorescences, subefflorescences and crusts due to their abundance in the monument.

A study of the Monastery was carried out to determine the salt composition and micro-environmental conditions on which salt crystallisation depends, and these were used as the bases of the laboratory test. The origin and factors controlling the presence of salts in the monument's construction and ornamental materials (e.g. rocks, mortars, renders, mural painting, polychromed sculptures) were determined. To this end, the chemical, mineralogical and textural characteristics of the salt-bearing supports and the salts themselves were determined. The weathering state of the supports were studied as well.

Therefore, this study is articulated in two parts: the first deals with characterising materials in the Monastery, weathering processes and factors controlling these processes. In the second part, an original salt crystallisation laboratory test is conducted on the main construction material (i.e. calcarenite) used in the Monastery. Finally, a comparative study between laboratory test and Monastery results allows us to establish general conclusions, in an attempt to reconcile theories of salt crystallisation mechanisms with the reality of this monument.

The Monastery of San Jerónimo was selected for this study because salt crystallising in the interior of its church is the principal and most spectacular weathering form. Salts are related to water of different origins (capillarity and infiltration) and structural faults in the building. Salt weathering affects the construction materials provoking physical disintegration. Infiltration of salt solution through the calcarenite induces efflorescences and subefflorescences that weather the mural painting in the lower apse and the side rooms, as well as the base of polychromed sculptures and other ornaments found in the upper apse.

In fact, the study of the Monastery was decisive since it can be considered a "real-scale laboratory" where different micro-environments and causes leading to salt crystallisation have been established. The type and intensity of salt weathering depends on the nature of the supporting material (e.g. calcarenite, mortars, mural painting...); therefore this study included a rigorous sampling entailing determination of weathering forms, habits of salts and their location in the monument. On the other hand, the salt crystallisation was conducted on the calcarenite because it is the material most affected by salt weathering in the church. Further reasons were taken into account in its selection:

- this calcarenite has been used in the architectural heritage of the city of Granada. This was possible due to the proximity of quarries to the city, and the fact that this is a soft stone, easy to work;

- its pore system is very sensitive to salt crystallisation processes; and,
- for a proper comparison of salt crystallisation processes in the monument with those occurring in laboratory conditions, the tested rock should be similar.

Once both the nature of salts and their natural association in the church were established, the salt weathering experiment was designed in the laboratory. The test consists of inducing salt crystallisation in a probe made of calcarenite under environmental conditions (temperature and relative humidity) similar to those measured in the church. Fifty-two salt solutions of different concentrations and nature (e.g. simple *versus* mixture solutions) made of SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ and K^+ were tested. The composition of these solutions is similar to those determined in the church. The objectives achieved with the mentioned experiment have been:

- the types of “fluid transport” operating on the crystal growth mechanisms were identified;
- the influence of cations, anions and diverse combinations and concentrations thereof in the salt morphologies and their location in the calcarenite probe were established;
- the weathering effects induced by each salt solution on the calcarenites were determined;
- the relation between substrate humidity and crystal habits was evaluated; and,
- the influences of both (a) salt solution supersaturation and (b) evaporation rate on the crystallised salt, the site of precipitation on the probe, and the effect of either cementing or disrupting the salts in the calcarenites, were established.

The observed differences between reality in the Monastery and results from the laboratory salt experiment, namely weathering forms in the calcarenite and morphology of the crystallised salts, confirm how difficult it is to translate an experimental model to the reality of a monument. This study shows that discrepancies arise from limitations typical to this kind of experiment; some deserve special attention:

- the salt solution supplied to the calcarenite is discontinuous. It has been observed that the salt weathering accumulates with time, increasing the intensity of alteration to salt-bearing support;
- the size of the probes used in the test is not comparable to the dimension of the materials placed in the monument and affected by salt crystallisation. Dimension of materials influences evaporation and therefore the site of salt crystallisation in the support; and,
- the salt weathering test performed in laboratory did not consider the interaction between different porous media in contact, e.g. calcarenite-renders-mural painting, a common organization in the interior of the church of San Jerónimo.

In conclusion, it should be emphasised that the type of study realised in this work is necessary to further conservation and restoration intervention in cultural heritage in general, and in the Monastery of San Jerónimo in particular. The identification and characterisation of salts crystallising in the Monastery have been shown to be important preliminary criteria in order to diagnose the origin and mechanisms of alteration, and therefore, to propose a strategy of intervention in the monument.

ABREVIATURAS

Las técnicas analíticas más usuales se han nombrado con las siguientes siglas:

LB : Lupa Binocular
XRD: Difracción de rayos-X
MOP: Microscopía óptica de polarización
SEM: Microscopía electrónica de barrido
XRF: Fluorescencia de rayos-X
ICP: Espectrometría de plasma inductivamente acoplado
ICP-MS: Espectrometría de plasma-masas inductivamente acoplado
NA: Activación neutrónica
IC: Cromatografía iónica
MIP: Porosimetría de inyección de mercurio

Se han empleado las siguientes abreviaturas de minerales (según Kretz, 1983):

Qtz: Cuarzo: SiO_2
Gp: Yeso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Cal: Calcita: CaCO_3
Dol: Dolomita: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Cls: Celestina: SrSO_4
Mgs: Magnesita: MgCO_3
Ank: Ankerita: $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$
Anh: Anhidrita: CaSO_4
Hl: Halita: NaCl
Hem: Hematites: Fe_2O_3

Otros símbolos utilizados han sido:

Arc: Arcillas
Fil: Filosilicatos en general, que incluyen los minerales de la arcilla, micas y cloritas.
Fds: Feldespatos en general.
Wo: Wollanstonita CaSiO_3
Di: Diópsido $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$
Hd: Hedembergita $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$
Bass: Basanita CaSO_4
Hex: Hexaedrita $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Eps: Epsomita $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Nat: Natrón $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Ther: Termonatrita $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Nac: Nacolita NaHCO_3
Tr: Trona $\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Kal: Kalicinita $\text{KH} \cdot \text{CO}_3$
Mir: Mirabilita $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Then: Tenardita Na_2SO_4
Aph: Aftitalita $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$
Darapskita: $\text{Na}_3(\text{SO}_4)(\text{NO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$
Syl: Silvita KCl
Ant: Antarticita: $\text{Cl}_2\text{Ca} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Ntc: Nitrocalcita $\text{Ca}(\text{NO}_3) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Ntm: Nitromagnesita $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Nit: Nitratita NaNO_3
Nt: Niter KNO_3

INDICE

<u>1 INTRODUCCION</u>	<u>1</u>
<u>2 TÉCNICAS DE ESTUDIO</u>	<u>7</u>
2.1 ANALISIS MINERALOGICO Y TEXTURAL	7
2.1.1 Lupa binocular	7
2.1.2 Difracción de rayos X	8
2.1.3 Microscopía óptica de polarización	9
2.1.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	10
2.2 COMPOSICION QUIMICA	11
2.2.1 Fluorescencia de rayos X (XRF)	11
2.2.2 Espectrometría de plasma acoplado por inducción (ICP)	11
2.2.3 Espectrometría de plasma-masas inductivamente acoplado (ICP-MS)	11
2.2.4 Activación neutrónica (NA)	12
2.2.5 Cromatografía iónica (IC)	12
2.3 POROSIMETRÍA DE INYECCIÓN DE MERCURIO (MIP)	12
2.4 ANALISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE	14
2.5 TRANSMISIÓN DE ONDAS ULTRASONICAS	15

PARTE I: EL MONASTERIO DE SAN JERÓNIMO DE GRANADA

3 ASPECTOS HISTORICO- ARTISTICOS	23
3.1 HISTORIA Y ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN	23
3.2 RESTAURACIONES PRECEDENTES	25
3.3 HOSPITAL DE SAN JUAN DE DIOS	29
3.4 IGLESIA DEL PERPETUO SOCORRO	29
4 ENTORNO MEDIOAMBIENTAL	31
4.1 CLIMATOLOGÍA DE LA CIUDAD DE GRANADA	32
4.2 EMPLAZAMIENTO URBANO	34
4.3 CARACTERÍSTICAS DEL SUBSUELO	38
4.4 MICROCLIMA DE LA IGLESIA DE SAN JERÓNIMO	41
5 MATERIALES PETREOS	45
5.1 CALCARENITAS	46
5.1.1 Análisis químico, mineralógico y textural	46
5.1.2 Propiedades petrofísicas	47
5.1.3 Comportamiento hídrico	48
5.1.4 Propiedades mecánicas	50
5.2 TRAVERTINO	51
5.3 CALIZA GRIS	52
5.4 OTROS MATERIALES	52
6 ESTADO DE CONSERVACION	55
6.1 EXTERIOR DE LA IGLESIA	55
6.1.1 Cuerpo inferior	56
6.1.2 Cuerpo superior	58
6.2 INTERIOR DE LA IGLESIA	61
6.2.1 Cuerpo inferior	61
6.2.2 Cuerpo superior	62
7 MUESTREO	65
7.1 EXTERIOR DE LA IGLESIA DE SAN JERÓNIMO	67
7.2 INTERIOR DE LA IGLESIA DE SAN JERÓNIMO	68
7.2.1 Habitación lateral E del Altar Mayor	68
7.2.2 Habitación lateral W del Altar Mayor	69
7.2.3 Zona E del Altar Mayor	70
7.2.4 Zona W del Altar Mayor	70
7.2.5 Zona E de la parte superior del ábside	71
7.2.6 Zona W de la parte superior del ábside	74

7.3 HOSPITAL DE SAN JUAN DE DIOS	74
7.4 IGLESIA DEL PERPETUO SOCORRO	74
8 RESULTADOS	75
8.1 CALCARENITAS Y TRAVERTINOS	76
8.1.1 Análisis mineralógico y textural	76
8.1.2 Composición química	79
8.1.3 Análisis del sistema poroso	83
8.2 MORTEROS Y LADRILLOS	84
8.2.1 Análisis mineralógico y textural	85
8.2.2 Composición química	96
8.2.3 Análisis del sistema poroso	100
8.3 POLICROMÍA DE ESCULTURAS Y PINTURA MURAL	104
8.3.1 Estudio composicional y estructural	105
8.4 SALES	111
8.4.1 Estudio composicional y textural	111
8.4.2 Determinación de las fases minerales	119
9 DISCUSION Y CONCLUSIONES	123
9.1 CALCARENITAS	123
9.1.1 Composición	123
9.1.2 Sistema poroso	124
9.1.3 Proceso de deterioro	124
9.2 REVESTIMIENTOS	125
9.2.1 Morteros de yeso y cal	126
9.2.2 Morteros de cal y arena	127
9.2.3 Proceso de deterioro	128
9.3 MORTEROS DE UNIÓN	129
9.3.1 Composición	129
9.4 POLICROMÍA Y PINTURA MURAL	129
9.4.1 Policromía de las esculturas en biocalcarenita	129
9.4.2 Pintura mural	132
9.5 SALES	133
 PARTE II: ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CRISTALIZACIÓN DE SALES	
10 DISEÑO EXPERIMENTAL	151
10.1 INTRODUCCION	151
10.2 METODOLOGIA	153
11 RESULTADOS	159
11.1 OBSERVACIONES DE VISU DE LAS PROBETAS DE BIOCALCARENITA	160
11.2 EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LAS SOLUCIONES SALINAS	168

11.3 MODELO DE INTERACCION ROCA-SALES	173
11.3.1 EFECTOS DE COMPACTACIÓN Y DISGREGACIÓN	173
11.3.2 Composición y textura de las sales y calcarenitas	175
11.3.3 Modificación del sistema poroso	186

12 DISCUSION Y CONCLUSIONES 191

12.1 OBSERVACIONES DE VISU DE LAS PROBETAS DE CALCARENITA	192
12.2 EVOLUCIÓN DE LAS SOLUCIONES SALINAS	193
12.3 PROPAGACIÓN DE IMPULSOS ULTRASÓNICOS	198
12.4 COMPOSICION Y TEXTURA DE LAS SALES	199
12.4.1 Naturaleza y hábito de las sales determinado con XRD y LB	199
12.4.2 Textura de las sales determinada mediante MOP y su efecto en las calcarenitas	200
12.4.3 Hábito de las sales determinado mediante SEM	201
12.5 MODIFICACION DEL SISTEMA POROSO	202
12.6 CONCLUSIONES GLOBALES	204

13 CONCLUSIONES FINALES 207

BIBLIOGRAFÍA 209

ANEXOS

ANEXO I: RELACIÓN DE MUESTRAS EXTRAIDAS DE LA IGLESIA DEL MONASTERIO DE SAN JERÓNIMO, HOSPITAL DE SAN JUAN DE DIOS E IGLESIA DEL PERPETUO SOCORRO

ANEXO II: ESPECTROS EDX DE MUESTRAS PICTÓRICAS Y SALES DEL MONASTERIO DE SAN JERÓNIMO Y DEL HOSPITAL DE SAN JUAN DE DIOS

ANEXO III: OBSERVACIONES REALIZADAS EN LAS PROBETAS DE CALCARENITAS SOMETIDAS AL EXPERIMENTO DE CRISTALIZACIÓN DE SALES

ANEXO IV: VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE PULSOS ULTRASÓNICOS EN PROBETAS DE CALCARENITAS

1 INTRODUCCION

España es un país con un gran Patrimonio Histórico-Artístico. Esta excepcional riqueza, que abarca entre otros a sus edificios monumentales y obras de arte realizadas en piedra, merece una especial atención, enfocada principalmente a su conservación y/o restauración, de modo que se garantice su permanencia para el futuro. No obstante, hasta hace poco tiempo ha sido escasa una sensibilidad generalizada u “oficial” al respecto, tanto por las autoridades competentes, como por el resto de la sociedad. Fue a finales del siglo XX cuando surgió una creciente preocupación en relación a este tema por parte de instituciones políticas y religiosas, profesionales, etc. El traspaso de competencias en materia de Patrimonio Histórico del Estado a las Comunidades Autónomas supuso un gran avance, cuyo fruto, en el caso de la Comunidad Autónoma Andaluza fue la Ley Andaluza del Patrimonio Histórico, el Plan de Bienes Culturales o el Plan Andaluz de Catedrales. En consecuencia, en Andalucía (cuyo Patrimonio es de especial relevancia) se han realizado importantes inversiones económicas en la intervención de obras de arte, fomentado la investigación y el intercambio de conocimientos y experiencias entre los profesionales de las distintas ramas del saber, a la vez que se han creado centros de trabajo e instituciones. El fin es contribuir al desarrollo social y perpetuar dicho Patrimonio para las generaciones venideras.

Los proyectos de restauración del Patrimonio Histórico en España, y en Andalucía en particular, han generado la necesidad de realizar una investigación especializada antes de acometer las intervenciones oportunas. Sólo de esta manera se asegura la integridad física del objeto histórico y hace accesible su significado (De Angelis, 1982; Lazzarini et al., 1986). Estos estudios previos a la intervención deben considerar cuantos problemas estén conectados con la vida de la obra de arte. En el caso de los edificios, el interés principal se centra en el origen de la alteración de los materiales

pétreos usados en su construcción y/o decoración, así como otros materiales entre los que se pueden nombrar los cerámicos, lígneos, pictóricos, etc. Ello supone ahondar en las formas y procesos de deterioro de dichos materiales mediante los análisis y ensayos oportunos, que permiten relacionar las características intrínsecas del material con su futura alterabilidad.

En este sentido, las actuaciones de conservación y/o restauración realizadas en importantes edificios históricos de la ciudad de Granada, han supuesto estudiar las características de la piedra utilizada históricamente en su construcción. La mayor parte de los edificios monumentales post-islámicos de esta ciudad están contruidos con biocalcarenita, localmente denominada "piedra franca". Destacan entre ellos el Conjunto Catedralicio, El Monasterio de San Jerónimo, La Real Chancillería, el Hospital Real o el Palacio de Carlos V, cuyas cronologías de construcción abarcan del siglo XVI al XVII (Gómez-Moreno González, 1892; Rosenthal, 1990). Esta biocalcarenita ha sido ampliamente estudiada desde diversos aspectos: se ha caracterizado desde un punto de vista químico, mineralógico y petrográfico, determinado sus características físicas y mecánicas, así como su comportamiento hídrico (Sebastián et al., 1992). Además, ha servido como soporte para el estudio de diversos tratamientos con diferentes tipos de consolidantes y protectivos (Durán Suárez, 1996). Se han establecido incluso las características colorimétricas de la biocalcarenita en cantera, haciendo alusión al efecto que sobre el color de la piedra pueden ejercer los productos utilizado en la restauración (Durán Suárez, op. cit.). No obstante, los ensayos y estudios en relación al efecto que las soluciones salinas ejercen en dicha calcarenita son insuficientes, a pesar de que son constantes las referencias a la acción de diversas sales sobre el estado de deterioro de este material pétreo en diversos monumentos granadinos (Navarrete Aguilera, 1989; Rodríguez Gordillo et al., 1990). El caso del Monasterio de San Jerónimo es paradigmático en este sentido (Cardell et al., 1992)

En la actualidad se reconoce que el fenómeno de la cristalización de sales es uno de los agentes de alteración más frecuente y perjudicial que afecta a innumerables materiales empleados en el Patrimonio Histórico-Monumental: desde rocas y piedras naturales, morteros, revocos y ladrillos, a esculturas policromadas, pinturas murales y muchos otros materiales usados tradicionalmente en la construcción o como elementos decorativos. En el caso particular del Patrimonio Histórico Andaluz son numerosos los edificios monumentales afectados por las aguas de infiltración capilar cargadas de soluciones salinas (Fig. 1.1). No obstante, los procesos y efectos de la cristalización de sales en materiales porosos no ha merecido la atención o interés que se merece por parte de la comunidad científica. Consecuencia de ello es que siguen siendo importantes los interrogantes sobre los mecanismos, evaluación y previsión de la alteración por cristalización de sales.

En el presente trabajo son dos los objetivos propuestos, tal y como indica su título:

- profundizar en el conocimiento del fenómeno de cristalización de sales desde un punto de vista experimental y teórico. Para ello se han desarrollado una serie de experimentos realizados en el laboratorio, consistentes en evaluar la acción de distintas soluciones salinas sobre la citada calcarenita. El origen, la composición, y los mecanismos de formación que originan las diversas morfologías de las sales, así como los efectos de deterioro que ocasionan, permitirán comparar la realidad del Monasterio de San Jerónimo con el estudio teórico y experimental desarrollado,
- caracterizar las principales patologías que afectan a la Iglesia a través del estudio de sus materiales, productos de alteración, y causas que las generan. Entre dichos productos, y dada su relevancia, se presta especial atención a la presencia masiva de costras y eflorescencias salinas.

Es claro que previamente a la realización del experimento, se precisa abordar el estudio del monumento, pues la naturaleza de las sales cristalizadas en éste y las condiciones medioambientales en que crecen, marcan las directrices a seguir en el diseño de los ensayos de cristalización de sales. A su vez, para establecer las causas y factores que determinan y controlan la aparición de las sales en los materiales constructivos y ornamentales del Monasterio, necesariamente debe procederse a una

detallada caracterización química, mineralógica y textural de los soportes afectados por las sales, de las propias formaciones salinas, y del estado de conservación de aquellos.

En consonancia con lo expuesto, este trabajo de investigación se articula en dos grandes apartados. Una primera parte, en la que se aborda el estudio del monumento, sus materiales y factores que condicionan su estado de deterioro, y una segunda parte, en la que se desarrolla el estudio experimental de la acción de diversas soluciones salinas en la biocalcarenita. Finalmente, la correlación de los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio y de los estudios realizados en el Monasterio permitirán establecer unas consideraciones y conclusiones generales en un intento de compaginar las teorías que sobre los mecanismos de cristalización existen y la realidad del monumento.



Figura 1.1. Ejemplos de infiltración capilar y deterioro por la acción de sales solubles en diversos edificios de interés histórico-artístico. Sobre estas líneas, fachada del palacio de Jabalquinto (Baeza, Jaén).

Se ha elegido el Monasterio-Iglesia de San Jerónimo como punto de correlación con los resultados experimentales de laboratorio, porque como se ha mencionado, los estudios preliminares realizados sobre su estado de conservación han constatado la abundante presencia de sales (Cardell y Rodríguez Gordillo, 1992). En efecto, el tipo de alteración más espectacular y perjudicial es el desarrollo sistemático de formaciones salinas en el interior de la Iglesia, asociadas a la presencia de agua (en distinto estado u origen) y a defectos constructivos del edificio. Los deterioros ocasionados por la cristalización de sales en el interior del edificio afectan a los elementos de fábrica empleados en su construcción, ocasionando descohesión física en los mismos, y por consiguiente disgregaciones y pulverizaciones. Además, la infiltración de soluciones salinas a través de la calcarenita originan la formación de subeflorescencias que afectan a las pinturas murales de la parte baja de la Iglesia y del retablo del ábside, así como a las partes bajas de las esculturas y otros elementos decorativos que conforman el muro de este último.

El estudio del monumento constituye un aspecto fundamental de la investigación en este trabajo, dado que el mismo puede considerarse un "gran laboratorio a escala real" en el que se delimitan diferentes microambientes y/o causas que confluyen en el fenómeno de cristalización de sales. El deterioro ocasionado por el desarrollo de sales depende del material constructivo o decorativo donde se ubican (calcarenita, morteros, pintura mural, etc.).



Figura 1.1 (continuación) Sobre estas líneas (de izquierda a derecha y de arriba a abajo) ejemplos en la ciudad de Granada. Fachada lateral (junto al río Darro) de la Iglesia de Santa Ana, Portada de Siloé de la Catedral de Granada, Fachada de la Madraza (antigua Universidad Nazarí) y finalmente, interior de la Iglesia de San Jerónimo.

Ello requiere una observación, documentación y determinación exhaustiva de las formas de alteración, los diferentes tipos, hábitos y agregados de sales cristalinas y su distribución en el edificio. Dado que la biocalcarenita es el material constructivo y ornamental más afectado por la cristalización de sales en la Iglesia-Monasterio de San Jerónimo, ha sido el soporte pétreo seleccionado para el experimento. Pero además, en la elección del soporte hay una serie de ventajas adicionales:

- la biocalcarenita ha sido profusamente empleada en la arquitectura monumental de Granada. A ello ha contribuido la existencia y proximidad a la ciudad de las canteras ("Santa Pudia" en Escúzar), y que es una roca blanda fácil de trabajar. Ha sido utilizada como material de cantería en sentido estricto, es decir en "fábricas" de sillería, y en todo de tipo de labrados decorativos emplazados en el interior o exterior de los edificios, e incluso en esculturas, durante el renacimiento y barroco (Gómez-Moreno Calera, 1989),
- se trata de un material pétreo de origen natural con un sistema poroso especialmente sensible a los procesos de cristalización de sales,
- no existen problemas de abastecimiento de material, pues las antiguas canteras de extracción empezaron a explotarse en 1990, lo que garantiza material suficiente para los experimentos, y,
- para realizar una comparación adecuada entre los procesos de cristalización de sales ocurridos en el monumento, y los llevados a cabo en el laboratorio, el material experimentado debe ser el mismo, o al menos similar, en cuanto a propiedades químicas, físicas y mecánicas.

El experimento de laboratorio se ha diseñado una vez identificadas las diferentes asociaciones de especies salinas desarrolladas en la Iglesia de San Jerónimo. Dicho experimento ha consistido en la cristalización de sales en probetas de calcarenita bajo condiciones ambientales semejantes a las medidas en el monumento. Para los diversos ensayos se han empleado distintas soluciones salinas simples y mezclas a base de los iones SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ . Las soluciones ensayadas, tanto las simples como las mezclas, son de la misma naturaleza que las sales detectadas en el monumento. Son varios los objetivos propuestos con estos ensayos:

- conocer el tipo/s de transporte de fluido que actúa en los procesos de crecimiento cristalino,
- valorar la influencia de determinados cationes y aniones, y de las diversas combinaciones y concentraciones de los mismos para con el emplazamiento y morfología de las sales,
- determinar los efectos de cada solución (simple o mezcla) sobre el soporte pétreo,
- estudiar la relación existente entre el sustrato poroso húmedo y el hábito de los cristales, y,
- precisar cómo influyen la acción conjunta de la sobresaturación y la evaporación en la forma cristalina precipitada, en el emplazamiento de la sal en la calcarenita, y su posible efecto cementante o disruptivo.

Finalmente, y no obstante el interés casi puramente teórico de lo expuesto, parece oportuno destacar la importancia que estudios como los de este trabajo tienen sobre un proceso de conservación-restauración. La identificación y caracterización de la naturaleza de las salinas que aparecen en una edificación constituye un importante criterio preliminar en el diagnóstico de las causas o mecanismos de deterioro, y por tanto, son de una inestimable ayuda para proponer una estrategia de intervención.

2 TÉCNICAS DE ESTUDIO

La práctica totalidad de las técnicas de estudio empleadas han sido comunes tanto para el estudio del Monasterio, como para el estudio experimental de cristalización de sales en las probetas de calcarenita. Por ello se ha optado por especificar dichas técnicas de la forma más breve posible, previamente al desarrollo del estudio del monumento (Parte I) y del estudio experimental (Parte II). Mención especial merece el apartado correspondiente al muestreo. La diversidad de materiales, zonas de estudio, y problemática de las mismas obliga a una descripción pormenorizada de esta etapa, así como a un conocimiento de las distintas estancias muestreadas en el Monasterio. Es por ello que se ha optado por desarrollar esta labor ciertamente "técnica" después de la descripción histórico artística del monumento, entorno medioambiental y estado de conservación. En concordancia, los aspectos de muestreo y manipulación de muestras referentes al estudio experimental se incluyen en el capítulo correspondiente (Cap. 10).

2.1 ANALISIS MINERALOGICO Y TEXTURAL

2.1.1 Lupa binocular

Se trata de una técnica preliminar muy simple, que posibilita realizar un examen con pocos aumentos de la superficie de los materiales, y de gran eficacia en el caso de los materiales pétreos, morteros y muestras de policromía. Permite conocer globalmente su estructura interna, técnica de ejecución y estado de conservación, a la vez que se utiliza como instrumento de selección de las muestras que se analizarán con más detalle. Con lupa binocular se ha realizado el primer

reconocimiento morfológico de las sales, permitiendo la separación de los cristales con un hábito diferente, que posteriormente serán estudiados con otras técnicas de mayor precisión. Se ha empleado una lupa binocular Olympus modelo SZH10 dotada de cámara fotográfica (Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada).

2.1.2 Difracción de rayos X

Esta técnica analítica, de amplia difusión en el estudio del Patrimonio Histórico, ha permitido conocer la composición mineralógica del material pétreo, morteros, ladrillos y depósitos salinos. El análisis mineralógico de las muestras se ha realizado mediante el método del polvo cristalino. Antes de proceder a la molienda ha sido necesario considerar una serie de aspectos según la naturaleza de los diferentes materiales muestreados. Así, para evitar problemas de deshidratación en las sales, éstas se almacenaron en recipientes herméticamente cerrados inmediatamente después de su extracción. Por contra, dado que algunos morteros del interior de la Iglesia de San Jerónimo estaban húmedos, se tuvieron que dejar secar a temperatura ambiente. Estos planteaban un problema adicional, y es que, dado el tamaño que los áridos alcanzaban en algunos casos, antes de la molienda se eliminó la fracción de árido mayor de 3mm de diámetro, con objeto de garantizar la homogeneidad y representatividad de los datos. Estos granos minerales se han estudiado con otras técnicas (microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido).

Mediante difracción de rayos-X se han analizado algunos revestimientos policromados de las paredes. Para ello las muestras se han molido en mortero de ágata hasta un tamaño menor de 0.053mm (270 mallas A.S.T.M.), excepto las sales, sobre las cuales sólo se ha realizado una ligera molienda. El polvo obtenido se monta en un portamuestras de aluminio, procurando no ejercer demasiada presión, que puede orientar de forma preferente los cristallitos. Se ha empleado un difractómetro Philips PW 1710 equipado con rendija automática, perteneciente al Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada. El registro e interpretación de los diagramas se ha realizado mediante diversos programas informáticos (Nieto et al., 1989; Martín Ramos, 1990). Las condiciones instrumentales son las registradas en la Tabla 2.1:

Radiación:	Cu K α
Filtro:	Ni
Voltaje:	40 Kv
Sensibilidad:	1.103
Tiempo de integración:	0.4 s
Velocidad goniómetro:	1°-6° 2 θ /min
Zona explorada:	2° a 80° 2 θ
Estándar interno:	Si metálico

Para la estimación de la abundancia (relativa) de las fases presentes en las muestras se han tenido en cuenta los problemas que presenta esta labor: tamaño de grano, cristalinidad, homogeneidad de la muestra, condiciones instrumentales (Bradley y Grim, 1961; Gibss, 1961; Rodríguez Gallego et al., 1969). Los poderes reflectantes considerados son los calculados para el difractómetro Philips PW 1710 en las condiciones instrumentales antes citadas (Informe Interno del Departamento de Mineralogía y Petrología). Estos poderes reflectantes se presentan en la Tabla 2.2. La precisión que el método permite es de $\pm 5\%$ relativo. El problema se ha planteado en las muestras de sales, para las que el poder reflectante no está calculado. Su carencia ha obligado a que en este trabajo sólo se haya estimado aproximadamente la abundancia relativa de las distintas fases directamente a partir de las áreas de las reflexiones de mayor intensidad.

Tabla 2.2 Poderes reflectantes de diversos minerales utilizados en la semicuantificación de las fases minerales presentes en las muestras analizadas. $d(\text{Å}) = \text{espaciado } c \text{ ó distancia basal } 001 \text{ (en angstrom)}$; **base de identificación de minerales mediante DRX.**

Mineral	Poder reflectante	$d(\text{Å})$
Cuarzo	1.38	3.33
Yeso	0.68	7.65
Calcita	1	3.03
Dolomita	1.03	2.88
Filosilicatos	0.1	4.45
Feldespatos	0.98	3.2
Celestina	0.50	3.30
Magnesita	1	2.74
Ankerita	1	2.90

2.1.3 Microscopía óptica de polarización

El reconocimiento de los minerales a través de sus propiedades ópticas es, sin ningún género de dudas, el método más comúnmente utilizado y el más versátil. En el campo de la conservación del Patrimonio Histórico, la microscopía óptica de polarización es una técnica fundamental para la evaluación del grado de deterioro de los materiales empleados en edificios históricos. En este sentido tienen especial interés tres aspectos:

- el estudio de las características y evolución del sistema poroso del material pétreo, que es de importancia decisiva en el comportamiento físico-mecánico de la roca y en su alteración,
- el examen del grado de alteración de los granos minerales componentes, del cemento intergranular y de las características del contacto grano-cemento, y,
- la identificación y localización de fases minerales salinas que pueden formarse durante los procesos de alteración.

Mediante microscopía óptica con luz transmitida se ha realizado el estudio petrográfico y mineralógico de los materiales constructivos y ornamentales del Monasterio, tales como calcarenitas y travertinos, morteros de unión y revestimiento, muestras pictóricas... En el caso de las calcarenitas se han constatado las variaciones composicionales y texturales existentes entre los materiales inalterados de cantera o del monumento, y los degradados. Para el estudio con esta técnica se han preparado láminas delgadas cuando la consistencia de la muestra lo permitía. En ocasiones, como ya se ha comentado, el avanzado grado de alteración del material provoca que el simple roce con los dedos produzca su desmoronamiento.

Para el análisis de los componentes y estructura de las muestras pictóricas, el estado material de sus capas y la técnica de ejecución, ha sido necesario elaborar estratigrafías pictóricas preparadas como láminas delgado pulidas, realizándose su estudio con luz transmitida y luz reflejada. La microscopía óptica de polarización constituye una técnica cuya validez está ampliamente probada en cualquier tipo de estudio pictórico (Plesters, 1959; Plesters y Lazzarini, 1976). La resolución que proporciona es suficiente tanto en términos de imagen como de análisis. Para la observación de las sales cristalizadas en los experimentos del laboratorio se han elaborado láminas delgadas descubiertas y pulidas en seco, para evitar fenómenos de disolución. Se ha utilizado un microscopio óptico polarizado de luz transmitida y luz reflejada Carl Zeiss modelo Jenapol U, perteneciente al Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada.

2.1.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En el campo del Patrimonio Histórico la microscopía electrónica de barrido (Southworth, 1975; Loretto, 1984; White, 1985; González et al., 1991; Potts et al. 1995), constituye una poderosa herramienta ampliamente utilizada en el estudio de los materiales que lo componen. Su utilización está justificada en la caracterización de los materiales constructivos y ornamentales de los monumentos (Charola et al., 1984; Van Grieken et al., 1990; Alessandrini, 1992; Soriano, 1996); el diagnóstico de los procesos de deterioro de dichos materiales (Klemm et al., 1978; Cantonni, 1984; Fitzner, 1991; Rodríguez Navarro, 1994), y el control de la eficacia de los productos de limpieza, consolidación y protección aplicados a los mismos (Crevello et al., 1981; Rossi-Manaresi et al., 1984; Klingspor et al., 1992 y Durán Suárez, 1996). Pero además se ha aplicado en otros campos de investigación de las obras de arte, cuyo éxito se encuentra avalado por la prolífera documentación bibliográfica que existe al respecto. Así, en el terreno de la pintura se utiliza para identificar pigmentos y caracterizar la textura de las capas pictóricas (Delbourgo, 1971; Birkett et al., 1977; Winter, 1983; Rossi-Manaresi, 1992; Cardell, 1994); en el campo de la cerámica (ladrillos, terracora, azulejos, esmaltes y otros) se emplea en la evaluación de la temperatura de cocción del material, en el estudio de su decoración, en la síntesis de nuevos materiales, etc (Freestone et al., 1987; Tite, 1975; Núñez et al., 1992; De la Torre, 1995). Otra aplicación es en el estudio de costras negras de contaminación (Ross et al., 1989; Sabbioni, 1992), en la caracterización de especies vegetales desarrolladas en monumentos (Diakumaku et al., 1994; Laborda et al., 1994) y en la identificación de sales presentes en distintos materiales. En relación a este último tema, y debido a su estrecha relación con el principal objetivo de este trabajo, parece oportuno mencionar por su importancia algunas referencias, por ejemplo: Stambolov (1976); Charola y Lewin (1979); Pühringer (1983); Arnold y Zehnder (1985, 1990), Arnold y Kueng (1985); Garrecht et al. (1991); Doehne (1994) y Rodríguez Navarro et al. (1996).

La microscopía electrónica de barrido ha permitido el estudio morfológico y microanalítico detallado de las sales muestradas en la Iglesia, y previamente seleccionadas mediante lupa binocular por su hábito. Debido a la naturaleza de las sales, y a que muchas de ellas estaban hidratadas, las condiciones de trabajo fueron especiales para evitar su desintegración. La intensidad del voltaje del haz de electrones fue más baja de lo usual, entre 10 y 15 Kev, empleándose en las sales que lo resistían el voltaje normal de 20 Kev. Mediante SEM también se han identificado los pigmentos de las estratigrafías pictóricas, se han estudiado las calcarenitas, y los morteros que se elaboraron como láminas delgadas sin cubrir. Para el análisis químico y textural de las sales cristalizadas en las probetas del ensayo en laboratorio, se ha trabajado sin la ventana de Berilio que normalmente lleva incorporado el SEM. De esta manera se han identificado los elementos de más bajo número atómico, tales como el carbono, nitrógeno y oxígeno, indispensables para determinar la naturaleza de las sales estudiadas. El equipo utilizado ha sido un Zeiss DSM 950 con microanalizador Link QK 2000 del Centro de Instrumentación Científica (C.I.C.) de la Universidad de Granada.

2.2 COMPOSICION QUIMICA

La composición química del material pétreo, morteros, sales, etc, se ha establecido mediante las técnicas que a continuación se exponen. Para el caso en que los análisis correspondientes a una misma técnica y tipo de muestras han sido proporcionados por equipos y/o laboratorios diferentes, muestras "patrones" han permitido minimizar la influencia que este hecho siempre implica.

2.2.1 Fluorescencia de rayos X (XRF)

Mediante esta técnica se han analizado elementos mayoritarios en calcarenitas y morteros, tales son Si, Al, Ca, Mg, K, Mn, Fe, Ti y P. Las mediciones se han realizado en el Centro de

Instrumentación Científica de la Universidad de Granada con un equipo Philips PW 1480, y en los Laboratorios X-Ray Assay de Ontario (Canadá) con un espectrómetro Philips PW 1600.

2.2.2 Espectrometría de plasma acoplado por inducción (ICP)

En calcarenitas se han medido los siguientes elementos: Ca, Fe, Mg, K, Na, Co, Cu, Sr, Ni y Zn. El proceso de disolución de la muestra ha sido el siguiente: la muestra groseramente molida se lava con agua destilada para que se disuelvan las sales que pueda contener, pero no el carbonato cálcico. A continuación se filtra en papel secante y se deja secar a temperatura ambiente. Se muele finamente en mortero de ágata y se introduce en una estufa a 110°C durante 5h. Se pesan 200g de muestra, se ataca con 25 ml de CIH al 10% y se enrasa a 100 ml en matraz. En algunos revocos del interior de la Iglesia de San Jerónimo, en los que era evidente la existencia de sales solubles en su seno (pero no visibles), se ha medido el contenido en Na. Para su determinación se agregó 50 ml de agua destilada a una cantidad de muestra previamente pesada, se agitó y dejó en reposo durante 2h. A continuación se filtró y se enrasó a 100 ml.

Mediante ICP se ha realizado la determinación de Na, K, Ca y Mg de las sales procedentes del Monasterio de San Jerónimo, y de las soluciones salinas empleadas en el experimento de cristalización de sales. Para su análisis químico se partió de la fracción soluble en agua destilada, a fin de evitar contaminaciones del sustrato pétreo. Las muestras previamente pesadas se disolvieron en 100 ml de H₂O destilada. e ha utilizado un equipo Leeman Labs serie PS del Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada. En los Laboratorios X-Ray Assay se analizaron mediante ICP en calcarenitas, travertinos, morteros y sales los siguientes elementos: Be, B, Li, V, Ni, Cu, Zn, Ge, Ag, Cd y Pb.

2.2.3 Espectrometría de plasma-masas inductivamente acoplado (ICP-MS)

Con esta técnica se han analizado los elementos traza de los morteros. Las muestras se han atacado con una mezcla de HNO₃ y HF, se han evaporado a sequedad y disuelto en 100 ml de HNO₃ al 4% de volumen. e ha utilizado un espectrómetro Perkin Elmer Sciex Elan 5000 perteneciente al Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada. El patrón interno utilizado es de Rh y Re. La precisión es de 2% y 5% relativo para una concentración de analito de 50 y 5 ppm respectivamente.

2.2.4 Activación neutrónica (NA)

Se han analizado con esta técnica, en los Laboratorios X-Ray Assay de Ontario (Canadá), los siguientes elementos en calcarenitas y morteros: Au, Na, Ca, Sc, Cr, Fe, Co, As, Se, Br, Rb, Sr, Mo, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Hf, Ta, W, Th y U.

2.2.5 Cromatografía iónica (IC)

Se ha utilizado un cromatógrafo iónico Dionex modelo DX 300 perteneciente al Departamento de Química Inorgánica de la Universidad de Almería para analizar los cloruros, nitratos y sulfatos de las sales muestreadas en la Iglesia de San Jerónimo. Los cloruros, nitratos y sulfatos de las soluciones salinas ensayadas en el experimento se han analizado con un cromatógrafo del mismo modelo perteneciente al Instituto del Agua de la Universidad de Granada.

2.3 Porosimetría de inyección de mercurio (MIP)

El estudio del sistema poroso de un material pétreo se puede realizar mediante técnicas directas y/o indirectas. Las técnicas directas son aquellas que permiten observar el espacio vacío. Principalmente son técnicas de microscopía entre las que destacan la microscopía óptica de polarización y la microscopía electrónica de barrido (en ambos casos con o sin análisis digital de imágenes), tanto por su fácil manejo como por los óptimos resultados ofrecidos. Respecto a los métodos indirectos, existe un complejo grupo de técnicas de análisis del sistema poroso que, en base a propiedades físico-químicas de un determinado fluido (líquido o gas), o una radiación (rayos-X o neutrones), permiten obtener información indirecta del mismo. Los métodos y técnicas más utilizados son los siguientes: métodos de succión, de adsorción de N₂, picnometría de helio, saturación de agua en vacío, difracción de rayos X de bajo ángulo, y porosimetría de inyección de mercurio. En este trabajo se ha elegido la porosimetría de inyección de mercurio para estudiar el espectro poroso de los materiales pétreos naturales y artificiales extraídos del Monasterio, así como los empleados en el experimento de cristalización de sales.

Desde el punto de vista petrofísico, los componentes petrográficos que definen las características de las rocas y permiten interpretar sus propiedades físicas son, en esencia, la textura y la mineralogía. No obstante, en temas alterológicos y de durabilidad de materiales pétreos debe enfatizarse, en especial, la importancia de los espacios vacíos como componentes texturales. Debe analizarse en detalle su sistema poroso, siendo insuficiente una mera cuantificación global del mismo. En el caso de utilizar las rocas con fines ornamentales, el volumen y distribución de tales espacios vacíos (poros y fisuras) condiciona las características tanto de uso (industrial) como de alterabilidad y/o durabilidad (Montoto, 1983; Alonso, 1986). Los poros o espacios vacíos de una roca se caracterizan por una serie de propiedades o parámetros que es posible cuantificar: presentan una cierta geometría (poros esféricos, planares, en forma de caverna, etc.), unas dimensiones (macroporos, mesoporos o microporos), una cierta continuidad o grado de conexión entre ellos (porosidad eficaz o comunicada, porosidad cerrada) que puede realizarse por medio de poros de distinto tamaño y/o morfología (fisuras capilares, conductos) etc. Todo ello contribuye a determinar la configuración tridimensional del entramado poroso. Pero además cada roca presenta un volumen de poros que es posible cuantificar. La porosimetría de inyección de mercurio constituye un excelente método para realizar esta medida. El valor absoluto de porosidad permite clasificar una roca en diversas categorías para su uso industrial u ornamental. Así, se denominan rocas muy poco porosas o de baja porosidad aquellas que rara vez superan el 5% de volumen de poros (mármol o granito); de porosidad intermedia, las que tienen valores de porosidad comprendidos entre el 5% y el 20% (la mayoría de las calizas y dolomías), y por último, las rocas con porosidad mayor del 20% se consideran muy porosas (calcarenitas, travertinos...)

A pesar de la relevancia del valor absoluto de porosidad de una roca, éste adolece de grandes limitaciones si se pretende, a partir de él, establecer el comportamiento de la misma frente a problemas de alteración. Se hace necesario, por tanto, definir la porosidad cerrada o no comunicada, que es el volumen de poros que no presenta ningún tipo de comunicación con los poros de su alrededor, y por lo tanto, tampoco con el exterior. Este tipo de porosidad no contribuye a la permeabilidad o al transporte de un fluido en el seno de un material pétreo, y en consecuencia, no tiene ninguna incidencia ante fenómenos de alteración química, aunque puede afectar al comportamiento y mecánico de la roca. Por contra, la porosidad eficaz o comunicada es el volumen de poros que presenta un cierto grado de conexión, de forma que un fluido (líquido o gas) puede ser transportado a través de ellos por todo el volumen de la roca. Este espacio poroso juega un papel fundamental en la durabilidad de una roca por varios motivos, algunos ya mencionados:

- pone en contacto el interior del material pétreo con el exterior,
- es el medio de transporte de todo tipo de fluidos que pueden actuar directamente en su degradación, tanto física como química,

- en gran medida condiciona otra serie de características petrográficas, como por ejemplo: dureza, resistencia mecánica, permeabilidad, conductividad térmica, etc.

La cuantificación, por tanto, de las citadas características del sistema poroso (tipo de poro, tamaño, distribución, abundancia relativa, etc.) resulta indispensable para la correcta evaluación de la durabilidad de un material poroso frente a procesos tales como hielo/deshielo (Everett, 1958; Litvan 1981), cristalización de sales (Fitzner y Snethlage, 1982; Rossi-Manaresi y Tucci, 1990), en la evaluación de su comportamiento frente al agua (Vos, 1978), o para cuantificar su reactividad química-área superficial (Boucher, 1976) y propiedades estructurales (Everett, 1958). Dentro del análisis y estudio de la distribución de rangos de poro, en este trabajo se ha adoptado como límite entre macroporosidad y microporosidad el establecido por Ashurst y Dimes (1977), Zehnder (1982) y Veniale y Zezza (1988), y fijado en un valor de 2.5 μm . Esta clasificación se basa en los límites establecidos tras la observación del sistema poroso por microscopía óptica, y son coincidentes con la propuesta de Russell (1927). De forma paralela hay que decir que parece ser la más adecuada para este tipo de roca, cuyo estudio ha sido realizado con anterioridad por Rodríguez Navarro (1994) y Durán Suárez (1996).

El ensayo consiste en medir la cantidad de poros y la distribución de los rangos de poros presentes en un volumen dado de biocalcarenita (empleada en la Iglesia de San Jerónimo, y la utilizada en el experimento de cristalización de sales realizado en laboratorio). Para ello se ha utilizado un porosímetro de mercurio que permite determinar el espectro de porosidad. Ahora bien, para estudiar los fenómenos de degradación de un material determinado en un medio agresivo, suele ser más eficaz manejar el concepto de área superficial, también calculado con este instrumento. En este sentido hay que tener en cuenta que, sustancias con macroporos, aún teniendo un gran volumen de poros, presentan una escasa actividad química dada su baja superficie específica. Por el contrario, sustancias microporosas con pequeño volumen de poros poseen elevada superficie específica y, por tanto, son muy activas químicamente.

El principio físico de la porosimetría de inyección de mercurio se basa en que, debido a su elevada tensión superficial, el mercurio es un líquido que no moja (ángulo de contacto $> 90^\circ$) y, por tanto, para que penetre en la región capilar de un sólido debe ejercerse una determinada presión. A mayores presiones el mercurio se introduce en poros cada vez más pequeños. Esta técnica presenta una serie de errores que pueden deberse a varias causas. Unos son inherentes a la propia técnica, entre los que se pueden considerar: los inducidos por la geometría de los poros (que presupone que son cilindros perfecto), la variación del ángulo de contacto del mercurio por la variación de la presión, etc. Algunos autores indican que las variaciones en la medida pueden llegar a ser grandes (Lowell et al., 1989; Huisman, 1993). Otros errores están condicionados por la selección del número de muestras a analizar, número que debe ser lo suficientemente representativo; otros por las condiciones de manipulación y preparación de las muestras, etc.

A pesar de todo, el desarrollo científico que esta técnica ha tenido (Washburn, 1921; Ritter et al., 1945; Honeyborne, 1958), y las numerosas referencias bibliográficas existentes, ponen de manifiesto que la porosimetría de mercurio es una técnica empleada sistemáticamente por numerosos investigadores para caracterizar los materiales naturales y artificiales del Patrimonio Histórico Arquitectónico, tanto en la determinación del grado de alteración (Accardo et al., 1978; Efes, 1979; Alonso et al., 1987; Gauri et al., 1989; Fitzner, 1990; Punuru et al., 1990), como en la evaluación de la eficacia de los productos consolidantes y protectivos aplicados (Rossi-Manaresi y Tucci, 1985; Hammecker et al., 1992; Durán Suárez, 1996).

En este experimento se han seguido en gran parte las recomendaciones propuestas por el Documento NORMAL 4/80 (1980); no obstante, tanto el número de muestras empleadas como su forma, se encuentran condicionadas por haberse extraído de un monumento histórico, adaptándose igualmente a las particularidades del porosímetro empleado en la realización del ensayo. Para el estudio de los materiales procedentes de la Iglesia de San Jerónimo se ha utilizado un equipo

Quantachrome Autoscan-60 con cámara para la baja presión, perteneciente al Departamento de Mineralogía y Petrología y Departamento de Química Inorgánica de la Universidad de Granada. En el análisis del sistema porosimétrico de las calcarenitas del experimento de laboratorio se ha empleado un aparato Carlo Erba modelo PASCAL 140 para la baja presión, y modelo PASCAL 240 para la alta presión, perteneciente al Centro "Gino Bozza" para el estudio de las causas de alteración y de los métodos de conservación de las obras de arte de Milán (Italia).

Las muestras requieren escasa preparación para su análisis. Han de ser de reducida dimensión, aproximadamente de 1x0.5x0.5 cm, aunque las muestras pertenecientes al Monasterio no han tenido en general las mismas dimensiones debido, como se ha comentado, a las limitaciones derivadas de ser piezas extraídas de un monumento. El único cuidado adicional que precisan es cepillarlas para evitar la existencia de partículas pulverulentas que pueden distorsionar el resultado. Las calcarenitas y morteros procedentes de la Iglesia de San Jerónimo se han secado en estufa a 80°C durante 24h. Se pesan y se introducen en la célula portamuestras del porosímetro. La intrusión forzada de Hg se hace en dos fases: a baja presión (2 atmósferas), y a alta presión (4000 atmósferas). Las calcarenitas sometidas a la cristalización inducida de sales se han secado durante 2h a 50 °C.

2.4 ANALISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE

Dada la complejidad composicional de algunas sales (sales compuestas) puesta de manifiesto por el microanálisis realizado con SEM (Cap. 8), se ha recurrido a un análisis estadístico que ha permitido asignar adecuadamente (en la mayoría de los casos) los datos analíticos de los aniones y cationes a las posibles fases minerales. A pesar de ello sigue existiendo la limitación de no poder discernir si las sales son polifásicas o en realidad se trata de sales con composición mineralógica compleja. La aplicación del análisis estadístico ha consistido en formular y evaluar el ajuste del modelo matemático elegido, que pretende explicar el conjunto de datos de composición química de las sales, a partir de la reducción proporcional del error que tal modelo plantea. Se ha seleccionado un modelo de regresión, en concreto un modelo lineal multivariante representado con notación matricial. El programa estadístico empleado ha sido el Multivariate General Linear Hypothesis (MGJH) del paquete SYSTAT (Wilkinson, 1990), que estima los parámetros del modelo lineal multivariante mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios. Así, se plantea un sistema de ecuaciones del tipo $AX=B$ (matricialmente) donde:

- el vector B viene dado por las cantidades de los elementos presentes en la mezcla,
- A es la matriz de los coeficientes que se construye tras la elección de las fases presentes, siendo los coeficientes las cantidades de los elementos en las fases seleccionadas,
- X es la incógnita, que en este caso son las cantidades de las fases presentes en la mezcla.

Una vez planteadas las ecuaciones:

- si el número de ecuaciones (que viene dado por el número de elementos químicos presentes) es mayor o igual que el número de incógnitas (fases minerales posibles en la mezcla) se puede obtener una solución única,
- si el número de ecuaciones es mayor que el número de incógnitas, mediante el método de Mínimos Cuadrados se elige un conjunto de soluciones que minimicen el error cuadrático. La aplicación de este método algebraico permite no sólo determinar las fases minerales, sino también sus proporciones en la mezcla.

La validez de este modelo la da el error cuadrático medio.

Para la aplicación de este tratamiento matemático ha sido necesario elaborar patrones de las sales simples que se supone existen en las sales muestreadas. Para ello se han analizado mediante SEM, y establecido la relación entre la intensidad de los picos diagnóstico de los aniones y los cationes de

cada una de las sales. Se han realizado patrones de las siguientes sales: NaCl, KCl, CaSO₄ · 2H₂O, MgSO₄ · 7H₂O, K₂SO₄, Na₂SO₄. El intento no fue posible con MgCl₂ · 6H₂O y CaCl₂ · 6H₂O pues las sales se pulverizaban al proceder a analizarlas con el SEM. La relación de alturas de los picos diagnóstico del anión y del catión para cada sal se indican en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Relación de alturas de los picos diagnóstico del anión y del catión para cada sal.

NaCl	Na : Cl	1 : 20.3
KCl	K : Cl	1 : 1.3
CaSO ₄ · 2H ₂ O	Ca : S	1 : 1.08
MgSO ₄ · 7H ₂ O	Mg : S	1 : 9
K ₂ SO ₄	K : S	1.8 : 1
Na ₂ SO ₄	Na : S	1 : 4

2.5 TRANSMISIÓN DE ONDAS ULTRASONICAS

La detección de defectos e inhomogeneidades presentes en el seno de un material rocoso, así como la valoración de su estado tensional y posibles inestabilidades mecánicas, se puede determinar mediante técnicas no destructivas. Estas técnicas se basan esencialmente en la auscultación y análisis de una señal (onda elástica) y el reconocimiento de variaciones significativas de la misma. Las señales pueden proceder de forma continua y espontánea del propio material (método pasivo), o haberse inducido artificialmente (método activo). Entre éstas últimas se encuentran los "pulsos ultrasónicos", además de la energía neutrónica, térmica y electromagnética (Montoto, et al., 1987). Como señalan Thompson y Thompson (1985), la energía ultrasónica es una de las más utilizadas por varios motivos:

- puede propagarse a bastante distancia por el interior de muchas estructuras sin sufrir demasiada atenuación,
- las señales captadas poseen suficiente capacidad de suministrar información como para poder determinar importantes características del material y sus defectos.

Las técnicas de ultrasonidos tienen su origen en los trabajos de Firestone (1945). Los equipos actuales siguen siendo similares en su concepción a los antiguos aunque muy mejorados, variando sus características según la finalidad del ensayo. Un equipo de ultrasonidos funciona de forma sucinta de la siguiente manera: se "inyectan" en el material a examinar ondas elásticas por medio de un transductor (emisor) acoplado a su superficie. Tras viajar las ondas por su interior se recogen en otro transductor (receptor), y se miden las modificaciones que han experimentado, así como el tiempo transcurrido entre su emisión y su recepción. El principio físico de este ensayo se basa en la propagación de ondas elásticas en un medio. Poisson demostró en 1828 que pueden producirse dos clases distintas de ondas en un medio físico ilimitado. La primera es una onda longitudinal o de compresión (L), y la segunda una onda transversal o de cizalla (T). El equipo de ultrasonidos considera que las velocidades de ambas ondas se igualan, de modo que a efectos prácticos se habla de velocidad de propagación de la onda ultrasónica. Las ondas generadas pueden ser continuas, pero es más frecuente que se utilice la emisión por impulsos. El cálculo de la velocidad de ondas ultrasónicas se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$V = l/t$$

donde *l* es la distancia entre el emisor y el receptor expresada en metros, y *t* es el tiempo empleado por la onda en recorrer el material ensayado, expresado en segundos. La velocidad de propagación de las ondas depende de la naturaleza del medio donde se transmiten, es decir, de sus características

composicionales y texturales, por lo que posibilita la evaluación del grado de alteración de dicho material.

Dependiendo de una serie de variables se distinguen diferentes métodos ultrasónicos. Así, según sea el sistema de emisión y recepción de las ondas, las técnicas de ultrasonidos se clasifican en métodos de resonancia, métodos de impulso-eco y métodos de transparencia o sombra, que se subdividen en función de la magnitud medida (e.g. frecuencia de resonancia, intensidad acústica, tiempo de recorrido...). Dependiendo de la forma de la auscultación, se distinguen métodos por transmisión y métodos por reflexión. Los primeros son muy útiles para la detección de espacios vacíos, defectos debido a fisuras, etc., ya que en dichos vacíos la señal inyectada suele sufrir una elevada atenuación en comparación con la que se transmite por el medio sólido. Por la posición de los transductores el procedimiento de medida de las ondas es por transmisión directa, semidirecta o indirecta. Independientemente del método seleccionado, hay que considerar una serie de factores para la obtención de los resultados correctos. Entre éstos caben destacar cinco:

- Frecuencia de los transductores. Es el mayor condicionante de los resultados, empleándose frecuencias entre los 20 kHz y 25 MHz. El uso de bajas frecuencias implica pérdida de definición (la onda puede atravesar huecos del material ensayado) pero cubre mayores distancias dentro del material. Las altas frecuencias permiten muy buena definición pero menor penetración en el material.
- Impedancia acústica del material. Es el producto de la densidad del material por la velocidad de propagación de las ondas. El gran contraste de impedancia entre un material rocoso y el aire que rellena los poros, posibilita la utilización de los ultrasonidos en los estudios de deterioro de diversos materiales.
- Acoplamiento correcto de los transductores a la superficie del material. El acoplamiento debe ser tal que se facilite el paso del sonido entre estos sensores y el material sometido a verificación. Para tal fin se emplean revestimientos de plástico, aceite, vaselina o plastelina, de modo que cuanto más rugosa sea la superficie más denso deberá ser el medio de acoplamiento.
- Dimensiones transversales de la probeta de material rocoso. Por ejemplo, para una dimensión lateral de 80 mm es necesario emplear un pulso de 50 kHz de frecuencia.
- Falta de homogeneidad de los áridos de la probeta. Se compensa eligiendo un bloque de dimensión equivalente a 10 veces el tamaño máximo de grano de los áridos.

Las técnicas ultrasónicas abarcan un amplio campo de aplicación, de modo que permiten determinar aspectos relacionados con la calidad y durabilidad de las rocas empleadas en edificios históricos y de cantera (Valdeón et al., 1992), la caracterización de parámetros estructurales y mecánicos de diversos materiales (Delgado Rodríguez, 1983), el control de estos parámetros en ensayos de alteración acelerada (Calleja et al., 1989) y la evaluación de la calidad de los tratamientos de conservación (Rossi-Manaresi et al., 1983, Durán Suarez, 1996), entre otros. En este sentido cabe mencionar que algunos autores han propuesto un índice relacionado con la calidad de los materiales, de modo que se puede evaluar y controlar la evolución de la degradación (Tourenq et al., 1971; Delgado Rodríguez, 1983), así como un índice de anisotropía textural y elástica (Zezza, 1990).

Por lo que respecta al objetivo propuesto con el ensayo de ultrasonidos realizado en este trabajo, se pretende evaluar los efectos generados por la impregnación con soluciones salinas de los bloques de calcarenita. Esto es, si las soluciones salinas "inyectadas" en las calcarenitas han originado cristalización de sales, y en este caso si su efecto es cementante o disruptivo. En este sentido, el aumento de la velocidad de transmisión de la onda ultrasónica informa acerca de la variación en el grado de cementación que ha experimentado la roca con respecto al material de cantera. En este trabajo el ensayo de propagación de ondas elásticas en bloques de calcarenita ha sido el método de transmisión directa de impulsos ultrasónicos. Siempre que ha sido posible se han seguido las

recomendaciones propuestas por la Norma Española UNE 83-38-806 (1985) y la Comisión NORMAL (NORMAL 22/36, 1987). Las probetas de calcarenita ensayadas poseen una dimensión de 150x23x23 mm, por lo que se han utilizado transductores de 100 kHz de frecuencia, con forma cilíndrica y no terminados en punta, porque la energía de los impulsos es menor. El medio de separación entre los sensores ha sido un elastómero. No se ha empleado sustancia gelatinosa alguna para impedir la introducción de sustancias no deseadas en el interior del bloque, opción justificada por los posteriores análisis a que se ha sometido la calcarenita. Igualmente se ha empleado este elastómero en la calibración del equipo de ultrasonidos. Este ajuste se realiza con una pieza de PVC duro, siendo el tiempo de recorrido de la onda ultrasónica exactamente 10 μ s. El equipo se ha calibrado cada 7 medidas. Para evitar errores en la obtención de las medidas, se ha procurado ejercer siempre la misma presión al aplicar los transductores, tanto en la pieza de calibrado como en los bloques de calcarenita.

El problema que ha presentado la aplicación del ensayo de ultrasonidos ha sido que el material pétreo verificado estaba en la mayoría de los casos alterado, con desarrollo de fracturas y/o cristalización de eflorescencias. Ha sido necesario raspar la superficie de las probetas para que ésta quedase lo más lisa posible. A pesar de ello el acoplamiento de los transductores no ha sido el adecuado en numerosas ocasiones, en cuyo caso no se ha obtenido señal alguna. El número de muestras sometidas a impulsos ultrasónicos ha sido una por cada ensayo de cristalización de sales, limitación impuesta por el propio experimento que únicamente contempla una probeta por solución salina. Las mediciones se han realizado bajo condiciones termohigrométricas de 20°C de temperatura y 40% de humedad relativa. La rutina de trabajo ha consistido en medir de forma directa los valores de velocidad de transmisión de impulsos ultrasónicos según las tres direcciones ortogonales X, Y, Z, sugeridas en el documento 28/86 de la Comisión NORMAL. Como la forma de la probeta es un paralelepípedo se han realizado tres medidas en siete puntos de cada probeta ensayada, en los lugares representados en la Figura 2.1. Posteriormente, y dada la heterogeneidad textural que presenta la calcarenita, se ha obtenido el valor medio y la desviación estándar de las mismas. El equipo de ultrasonidos empleado es un modelo STEINKAMP BP V. formado por un generador de impulsos de baja potencia, dos transductores de alta potencia y un convertidor de impulsos ultrasónicos en impulsos eléctricos. El campo de medición es de 0.1 a 9999.9 μ s, siendo de 10^{-5} s la exactitud del emisor del tiempo.

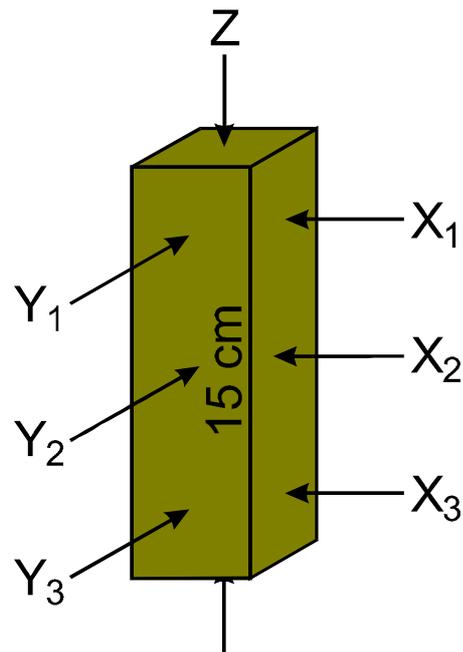


Fig. 2.1. Diseño de la rutina de trabajo seguida en la medición de la velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas en una probeta de calcarenita. Las flechas X_1 , X_2 , X_3 , Y_1 , Y_2 , Y_3 , y Z indican el lugar de colocación de los transductores (en direcciones ortogonales) para la obtención de los siete valores.

PARTE I: El Monasterio de San Jerónimo de Granada



El estudio de un edificio histórico debe tener en cuenta los más variados aspectos conectados con la esencia y la vida del monumento. Normalmente dicho estudio se aborda desde tres puntos de vista, que son: el análisis histórico, el artístico, y el estructural. Para su correcto desarrollo se debe:

- considerar el conjunto histórico-monumental como un todo, incluyendo las diferentes fases constructivas e intervenciones posteriores,
- tener en cuenta todas sus particularidades, tanto del exterior como del interior (decoración, bienes muebles, etc), y,
- enmarcar la construcción histórica en el contexto del entorno medioambiental.

En esta primera parte se aborda la caracterización de las patologías del Monasterio-Iglesia de San Jerónimo, caracterización que requiere el concurso de los aspectos anteriormente mencionados, como consecuencia de que el Monasterio se localiza en un ambiente concreto y posee una dimensión histórica, estética y material. De estos estudios previos depende, en gran medida, la correcta evaluación y confrontación de los resultados obtenidos en la caracterización composicional y textural de los materiales constructivos y ornamentales del citado monumento, así como de sus patologías. Estos conocimientos preliminares se han dividido en dos grandes grupos: el primero abarca una investigación de carácter histórico artístico, y el segundo el entorno medioambiental donde se ubica el edificio histórico. Adicionalmente y a fin de comprobar si el fenómeno de desarrollo de sales en el interior de la Iglesia del Monasterio es un fenómeno particular del mismo, se ha ampliado el estudio a dos monumentos próximos. Se tratan del Hospital de San Juan de Dios y la Iglesia del Perpetuo Socorro. Por tal motivo, también se hará una breve reseña histórico artística de estos dos últimos.

3 ASPECTOS HISTORICO-ARTISTICOS

La investigación histórico-artística constituye un elemento imprescindible que dota de un marco adecuado al que referir los datos científico-técnicos, y permite formular una propuesta de intervención con garantías de respeto y adecuación a la obra. Por otra parte, posibilita profundizar en el conocimiento del monumento desde un punto de vista estilístico y técnico, de sus etapas constructivas, de los cambios de uso que ha experimentado a lo largo del tiempo, de las consiguientes rehabilitaciones y/o restauraciones a través de documentos, o por las huellas que han perdurado. Evidentemente no se trata aquí de profundizar sobre los aspectos antes mencionados, pues constituyen un tema fuera de la competencia de este trabajo, pero sí conocer y poner de manifiesto aquellos aspectos necesarios y relevantes para la consecución del fin propuesto.

3.1 HISTORIA Y ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN

Las fundaciones del Monasterio-Iglesia de San Jerónimo, la Catedral y la Capilla Real de Granada supusieron una de las empresas fundamentales dentro de la nueva configuración de esta ciudad como metrópoli cristiana tras la conquista en 1492. Otros edificios relevantes como el Palacio de Carlos V o la Chancillería contribuyeron a definir la imagen urbana de la ciudad renacentista bajo la política castellana. El Monasterio-Iglesia de San Jerónimo fue el centro donde se polarizó buena parte de la vida espiritual de Granada. Dicho Monasterio tuvo sus antecedentes en el Convento de Santa Catalina, donado por los Reyes Católicos a los monjes jerónimos en la cercanía de la ciudad de Santa

Fe, el mismo año de la ocupación de Granada. Pero el lugar había quedado tan plagado de insectos que no era grato para los monjes, pues "no parecían frailes de San Jerónimo sino de San Lázaro, según estaban de lacerados y mordidos" (Sigüenza, 1909; Colina Munguía, 1986). Por este motivo, y la entrada a la ciudad del ejército castellano que dejó el Real de Santa Fe desolado, los monjes se trasladaron a Granada, al lugar que actualmente ocupa el Hospital de San Juan de Dios, que se decía la *Almoraba*, en el que existía una casa con huerta llamada El *Nublo*. La fundación pasó entonces a la advocación de la Concepción de Ntra. Sra. Sta. María, primer Templo del mundo dedicado a este misterio, comenzando aquí el arte concepcionista que en Granada alcanzó extraordinaria boga (Gómez Moreno-González, 1892). El 13 de Junio de 1504, para mejorar la fundación, los Reyes Católicos dispusieron que el Monasterio se edificase en un lugar inmediato al que ocupaba, conocido por *Dar Ibn Murdi* (Gallego y Burín, 1982; en Moreno Olmedo, 1994). Los terrenos constaban de casa, huerta, palomar y molino de aceite, y quizás pertenecieron al rey Boabdil, como así consta en una carta contemporánea a los Reyes Dña. Isabel y D. Fernando. Para tal empresa los Reyes Católicos donaron a los monjes todo el ladrillo y piedra procedentes del cementerio musulmán denominado *Saad ben Malic*, sito ante la Puerta de Elvira y en tales días en trance de desaparición. En 1521 los monjes se trasladaron al Monasterio. La actual portada del Hospital de San Juan de Dios se dice que perteneció a la primitiva del Monasterio de San Jerónimo, y que después se adaptó a la portada actual.

En cuanto a la Iglesia del conjunto monumental, ya estaba comenzada en 1513, pero fue en 1525 cuando la viuda del Gran Capitán y Duquesa de Terranova se comprometió a terminarla y dotarla de retablo, reja y túmulos, al solicitar su capilla Mayor a Carlos V para enterramiento del ilustre caudillo. Se encargó de la obra Jacobo Florentino "el Indaco", y tras su muerte, al año siguiente, le sucedió en la dirección el insigne escultor y mejor arquitecto de España en el momento, Diego de Siloé. Siloé trabajó en esta obra de San Jerónimo durante quince años. En Marzo de 1543, ya cerrada la capilla Mayor, el artífice se dio por despedido, pasando a las obras de la Catedral, que llevaba conjuntamente (Ordúñez, 1941; Rosenthal, 1966; Gómez-Moreno Martínez, 1983). El Monasterio se fue enriqueciendo con espléndidas donaciones, hasta que con la invasión napoleónica (1810-1812) todo lo perdió al convertirse en cuartel de caballería y depósito de grano. La posterior exclaustración de los monjes en 1835 con la ley de Desamortización de Mendizábal lo sumió en un abandono casi total, estando amenazado de tal ruina que se pensó en derribarlo. Más tarde fue ocupado por el regimiento de cazadores de Lusitania, pasando todo el conjunto monumental a pertenecer al Ministerio de la Guerra. En 1867 fue declarado monumento nacional histórico-artístico, a pesar de lo cual continuó cumpliendo su función como cuartel de infantería, después de caballería y por último de ingenieros. Para colofón de desastres se produjo un incendio en 1927 que afectó principalmente al patio de clausura. En 1957 las tropas militares abandonaron el edificio. En 1973 el Monasterio fue restituido a la Orden Jerónima y el 1 de Julio de 1977 fue ocupado por la comunidad de monjas jerónimas del Convento de Santa Paula.

Desde el punto de vista arquitectónico, el Monasterio supuso un gozne de unión entre el gótico tardío y el renacimiento, al asumir nuevas formas arquitectónicas y concretar en el exterior programas historicistas y alegóricos. Se sabe que en 1519 estaba acabado el claustro grande o primero, y al año siguiente el segundo claustro (de clausura). Formando ángulo con el Monasterio está la Iglesia, la cual constituye el objeto de este trabajo, motivo por el que se describe con más detalle (Fig. 3.1 y 3.2). Comenzada a edificar pobremente en un estilo gótico isabelino sencillo, pasa a partir del crucero al estilo renacentista cuando se encargó de ella Jacobo Florentino "el Indaco" y posteriormente Diego de Siloé, que convirtió al Templo en una de las más notables prendas del renacimiento español. En la parte baja de los muros se observa la construcción primitiva hecha con grandes trozos de piedra caliza de Sierra Elvira y travertinos de Alfacar (Gallego y Burín, 1982; Olmedo et al., 1986), encontrándose algunos bloques de caliza gris con nódulos de sílex, y restos de lápidas de arenisca procedentes del cementerio vecino a la Puerta de Elvira (Gómez-Moreno González, 1892). A partir del tercio superior del primer cuerpo hasta el cimborrio, la construcción es en su mayoría de calcarenita. A la derecha de su fachada principal se alzaba la gran torre construida por Siloé (Fig. 3.2), cuya mitad superior fue

desmochada por los franceses para construir con sus materiales el "Puente Verde" sobre el río Genil (Colina Munguía, 1964).

El interior de la Iglesia ofrece una de las muestras más ricas y majestuosas del renacimiento español. En el siglo XVIII se pintó todo el Templo, incluidas las esculturas de Siloé, cubriéndose las naves con pinturas murales al fresco realizadas por Juan de Medina entre 1723 y 1735 (crucero y bóvedas respectivamente). Como se comprobará en este trabajo, muchas de estas pinturas fueron ejecutadas al temple. El retablo principal, que ocupa totalmente la capilla Mayor a la que se asciende por una gran escalinata, fue comenzado en el siglo XVI (1570) por Juan de Aragón, y constituye una de las obras maestras de la imaginería española, siendo punto de arranque de las escuelas de escultura de Sevilla y Granada. En él trabajaron sucesivamente importantes escultores, pintores y estofadores de la época, entre los que cabe mencionar a Juan de Aragón, Diego de Pesquera, Lázaro de Velasco, Juan Bautista Vázquez "el Mozo", Pablo de Rojas, Juan Martínez Montañés, Pedro de Olea, Pedro de Raxis y Diego de Navas (Camón, 1981; Gallego y Burín, 1982). La bóveda de la capilla Mayor es semejante a las tres del crucero y adornada como aquellas. A partir del segundo cuerpo, arrancando del cornisamiento general de la nave del crucero y de la capilla Mayor, Siloé marcó su gran genio. Los cascos esféricos que cierran el ábside, labrados a manera de gran concha, poseen figuras del Salvador, apóstoles y ángeles.

El conjunto monumental del Monasterio de San Jerónimo consta de distintas dependencias que constituyen elementos independientes, pero relacionados entre sí: la Iglesia, el claustro primero, el claustro segundo (de clausura) y el compás (Figura 3.1). A estos cuatro elementos principales se adosan el resto de las demás dependencias. Las plantas suelen tener dos cuerpos, aunque en el caso de la Iglesia es de tres. La planta de la Iglesia mide 54.70 m de longitud por 22.68 m de ancho, sin contar el espesor de los muros que es aproximadamente de 1 m (Gallego y Burín, op. cit.). Entre los pilares de su única nave, con cabecera semioctogonal (ábside), se abren cuatro capillas a cada lado. El exterior de la Iglesia se divide en dos cuerpos coronados por un cimborrio. En el borde de cada cuerpo hay una cornisa, y entre el segundo cuerpo y el cimborrio existe un canal perimetral de desagüe de aguas con gárgolas (Fig. 3.2).

3.2 RESTAURACIONES PRECEDENTES

El Monasterio-Iglesia de San Jerónimo, como ya se ha expuesto, ha tenido a lo largo de su historia un acusado cambio de usos que ha contribuido a su actual estado de precariedad. La primera restauración de la que se tiene referencia la decidió el Estado, y se llevó a efecto de 1916 a 1920 por el arquitecto Fernando Wilhelmi (Gallego y Burín, 1982). De 1949 a 1981 el arquitecto Francisco Prieto-Moreno Pardo llevó a cabo la reconstrucción y restauración de numerosas partes de la Iglesia y convento de San Jerónimo, así como Joaquín Prieto-Moreno Ramírez en 1981 y José María Casado en 1983 (Ministerio de Cultura, 1989). Con el abandono de las tropas militares en 1957, el Monasterio pasó a manos del Ministerio de Educación Nacional, iniciándose un "acuerdo entre la Orden de San Jerónimo y la Universidad de Granada para la restauración de la vida monástica en el Monasterio de San Jerónimo, en función de la instalación del Colegio Mayor Universitario de San Jerónimo...". Una cláusula de este acuerdo hacía referencia a que "la Orden Jerónima se compromete a la restauración de la Iglesia y locales cedidos, así como mantener el culto y dirección espiritual del Colegio Mayor, y que la restauración quedará sujeta a los organismos competentes en lo que se refiere a su valor artístico y arqueológico" (Colina Munguía, 1986). En otoño de 1957 se iniciaron las obras de restauración que se prolongaron por espacio de casi veinte años. Se estableció un orden de prioridades y el trabajo se dividió en tres fases: demolición de los aditamentos adheridos por razón de los distintos usos del Monasterio; restauración de las techumbres y restablecimiento de la línea original de entrada; reconstrucción del campanario de la torre y plantación de naranjos en el claustro primero, de acuerdo con la descripción de los viajeros del siglo XVI (Navagero, 1524-1526, traducido por Fabié, 1983).

El encargado de la ejecución de las obras fue Antonio Dalmases Megías. Este personaje ha fallecido y toda la documentación que pudiera existir acerca de sus trabajos resulta inaccesible por estar celosamente guardada por sus herederos. Además, la copia de sus informes depositados en el Archivo de la Curia desaparecieron en el incendio ocurrido en el Palacio Arzobispal de Granada en 1982. Una sencilla lápida labrada en "piedra franca" resume en el compás del Monasterio, con pocas palabras, la restauración de este conjunto histórico-artístico: "La restauración de San Jerónimo ha sido fruto del sacrificio de Los Mártires". Aunque las restauraciones llevadas a cabo durante la década de los años sesenta fueron de vital importancia para la "supervivencia" del Monasterio, las intervenciones acometidas se realizaron con conceptos restauracionistas desaconsejados en la actualidad, y han originado la difícil lectura de alguno de sus elementos. Como ejemplos se pueden mencionar la reconstrucción del segundo Claustro de clausura, la actual torre de la Iglesia, y determinados elementos pétreos decorativos del exterior del edificio, tales como gárgolas y pináculos.

Recientemente se ha vuelto a intervenir en el Monasterio-Iglesia de San Jerónimo. Así, en Mayo de 1989 la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía realizó las "Fichas Diagnóstico", y en el período de Julio a Septiembre de ese mismo año se ejecutaron las primeras "Actuaciones de Emergencia". Se intervino en la cubierta de los claustros, en el material pétreo, se creó la infraestructura de un sistema contra incendios, y se protegió contra la carcoma. Desafortunadamente, algunas de estas obras también fueron desafortunadas, tales como la restitución de gárgolas de piedra por otras de metal en la cornisa entre el primer y segundo cuerpo. La aceptación del "Proyecto Ordinario" de la citada Consejería se firmó en Septiembre de 1992, pero a fecha del año 1998 no se había actuado. El 8 de Mayo de 1995 la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía anunciaba públicamente la contratación de las obras de conservación y restauración del Monasterio de San Jerónimo, que nunca se llegaron a ejecutar. Por fin, la resolución del 4 de Julio de 1997 de la Dirección General de Bienes Culturales anunciaba concurso para la adjudicación de contrato de obras para la restauración del Monasterio de San Jerónimo (BOJA nº 85, 1997). Felizmente dichas obras se han acometido ayudando a subsanar el avanzado estado de deterioro en el que estaba sumido el monumento.

Por lo que concierne a la vida en el Monasterio, actualmente está ocupado por una congregación de monjas jerónimas procedentes del convento de Santa Paula. Algunas de sus dependencias permanecen abiertas al público sin ningún control aparente, ni de las obras muebles que allí se exponen, ni de las inmuebles (esculturas pétreas, pinturas murales...). La única atención existente es una rigurosa limpieza de pavimentos y otros objetos ornamentales, que en algunos casos perjudica más que beneficia, pues contribuye a elevar la humedad del lugar e introduce compuestos químicos nocivos con los productos de limpieza utilizados. Además, debe añadirse el estado de abandono en que durante años y hasta fechas recientes se ha encontrado el edificio. Sirva como ejemplo la abundancia de plantas superiores en los muros de la Iglesia y en el patio del claustro primero, que se encontraba tan plagado de malas hierbas que resultaba casi imposible el acceso a la fuente situada en el centro. Otro aspecto digno de mencionar, y que resalta el estado de deterioro de los elementos decorativos del cornisamiento de la fachada exterior del ábside, ha sido la permanencia continuada desde 1989 hasta hace un par de años, de una valla protectora para impedir posibles accidentes por parte de aquellos que se acercaran al ábside de la Iglesia.

3.3 HOSPITAL DE SAN JUAN DE DIOS

Fue el primero de la Orden hospitalaria, establecido por su fundador, San Juan de Dios, que llegado a Granada en el 1536 comenzó a ejercitar su apostolado de caridad, recogiendo y curando enfermos pobres. La primera sede hospitalaria data del año 1537 y se ubicó en la casa nº 34 de la calle de Lucena, trasladándose al siguiente año cerca del arco de las Granadas, en la Cuesta de Gómez. Llegó a tener este centro doscientas camas, sostenidas con las limosnas de muchas de las personas principales de Granada. A la muerte de su fundador en 1550, el Hospital quedó a cargo de sus

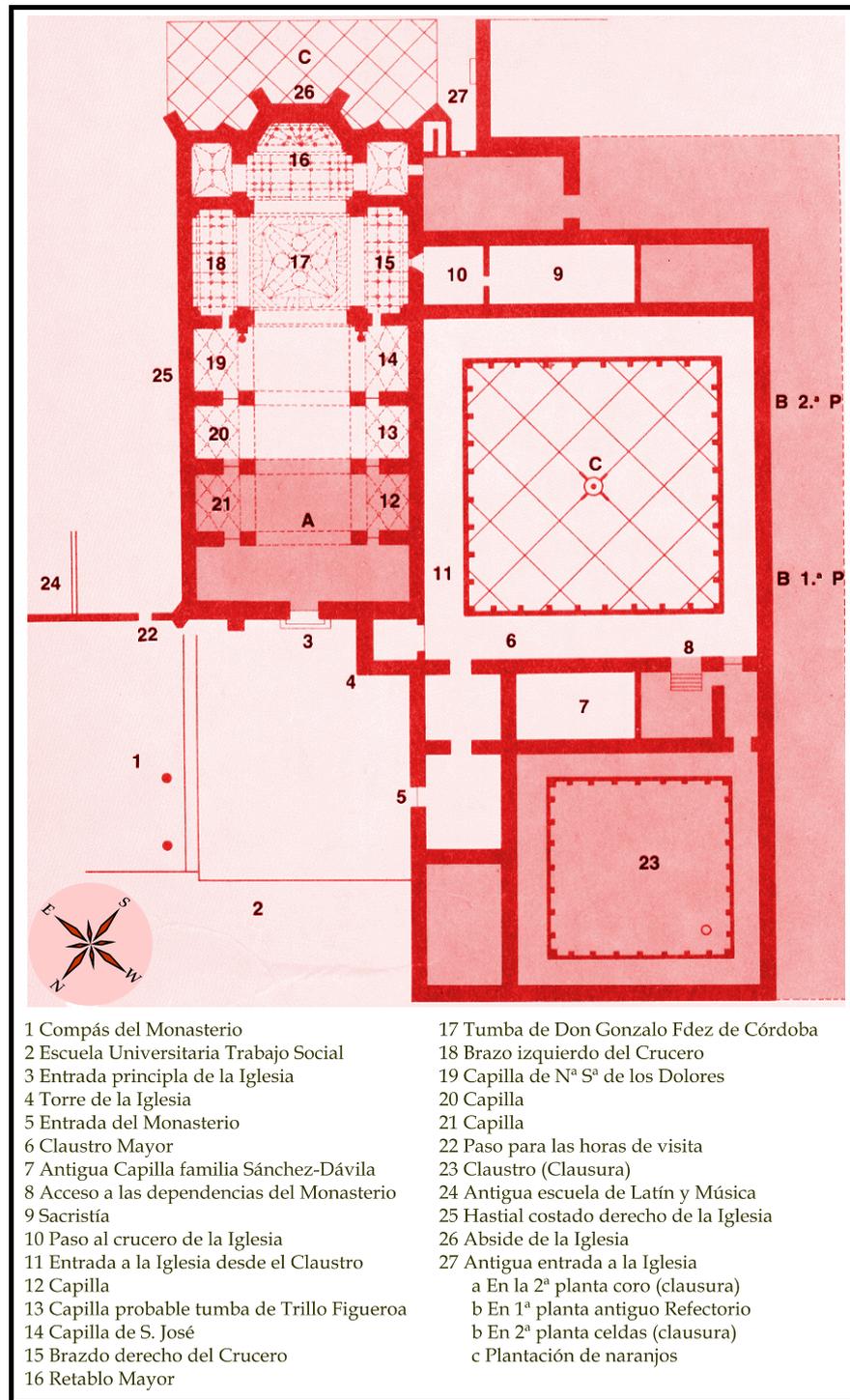


Figura 3.1 Planta del Monasterio e Iglesia de San Jerónimo de Granada (tomado de Colina Munguía, 1986).



Figura 3.2. Vistas generales del exterior del Monasterio de San Jerónimo (de izquierda a derecha y de arriba a abajo). Fachada principal de la Iglesia vista desde el Compás del Monasterio. Fachada lateral oeste, vista desde el Claustro Mayor. Ábside de la Iglesia visto desde la calle Gran Capitán. Torre de la Iglesia (desmochada en la invasión napoleónica y totalmente reconstruida en 1963) vista desde la terraza del segundo cuerpo del ábside.

discípulos, y en 1552 se estableció en una casa de la calle de San Jerónimo (en la actualidad queda ubicada en la calle San Juan de Dios), incorporándose al hospital que tenían los monjes jerónimos, siendo regentado por éstos y cuidando los Hospitalarios de los enfermos. Tras un pleito, los seguidores de San Juan de Dios quedaron como únicos dueños, haciendo un edificio nuevo merced a los donativos que recibían, entre ellos el de Diego de Siloé, quien les legó sus bienes en 1555. Con la desaparición de las órdenes religiosas en el s. XIX, el centro fue incautado por el Estado, pasando a depender de la Diputación, que lo restauró en 1981.

El Hospital de Granada funciona hoy atendido por las Hermanas de San Vicente de Paul. El edificio, asiento primitivo del Monasterio de San Jerónimo, lo rehicieron los Hospitalarios, y su portada, correspondiente a la Iglesia de aquél, la construyó en 1609 el cantero Cristóbal de Vélchez (Fig. 3.3). Consta el Hospital de dos patios. El primero contiene arquerías semicirculares alzadas sobre columnas dóricas. Rodeando las galerías hay un alto zócalo de azulejos valencianos, con la inscripción "El que costeó esta obra pide le encomienden a Dios" (Gallego y Burín, 1982). Sobre el zócalo hay veintinueve grandes cuadros pintados hacia 1749 por Diego Sánchez Sarabia, varias veces restaurados. La decoración al fresco que los rodea es un confuso conjunto de grutescos, figuras alegóricas, paisajes, episodios bíblicos, flores, frutas, etc, realizada por el pintor Tomás Ferrer antes de 1760. El patio posterior es obra del s. XVIII, y se encuentra muy desfigurado en nuestros días.

3.4 IGLESIA DEL PERPETUO SOCORRO

Corresponde a la antigua Iglesia de San Felipe Neri. Se comenzó a construir en 1688, trazada por Melchor de Aguirre, que la dirigió hasta su muerte en 1695. La fachada se terminó cuatro años después (Fig. 3.3), abriéndose al culto en 1717, y acabándose su capilla Mayor en 1725. La invasión francesa convirtió el edificio en cuadras y depósito de municiones, causando grandes destrozos y despojándolo de sus riquezas. Fue habilitada de nuevo por los Padres del Oratorio en 1817. Al disolverse la Congregación, el Templo se vendió a un particular. Se derribaron las torres, pasó más tarde a ser casa de vecindad, asilo, escuela de Bellas Artes en 1889 y luego almacén de carbones. En 1920 la ocuparon los Padres Redentoristas, colocándola bajo la advocación de Nuestra Señora del Perpetuo Socorro, y restaurándola con poco (Gallego y Burín, 1982). El Templo es de piedra franca bien labrada, y la fachada muy pobre y de mala traza (Gómez Moreno-González, 1892). El interior de amplias proporciones se apoya en grandes pilastras corintias que soportan una cornisa sobre la que vuelan bóvedas de crucería. El crucero se cubre con una cúpula hecha en 1817, y a uno y otro lado de la nave se abren seis capillas con tribunas encima. Apenas queda algo de la abundante decoración y obras de arte originales.



Figura 3.3. Fachadas principales de la Iglesia del Perpetuo Socorro (foto superior) y del Hospital de San Juan de Dios (foto inferior), vistas desde la calle del mismo nombre.

4 ENTORNO MEDIOAMBIENTAL

El estudio de las características del entorno medioambiental donde se ubica un monumento abarca varios aspectos, tanto intrínsecos, estrictamente conectados con el origen y naturaleza del edificio, como extrínsecos, que se derivan de fuentes externas al mismo. Los aspectos intrínsecos incluyen los relacionados con la edificación, ya sea en cuanto a su emplazamiento o estructura, independientemente de que se haya construido en varias fases. Por tanto, hacen referencia a aspectos que guardan conexión con la ubicación y orientación geotopográfica del monumento, en el que se incluyen las condiciones climáticas, características inherentes al subsuelo, tales como su naturaleza, composición y características hidrogeológicas, aspectos conectados con los materiales de construcción y ornamentales del edificio (naturales y artificiales), métodos de ejecución del proyecto de construcción, etc. Por su parte, los aspectos extrínsecos engloban todos los que modifican sustancialmente el concepto original de la construcción, ocasionando el deterioro del monumento. Dentro de este grupo se consideran las acciones de tipo físico, químico, y biológico que conducen al envejecimiento paulatino de los materiales del edificio, los fenómenos naturales de carácter catastrófico (seísmos, deslizamientos...), y la actividad humana, que incluye todas las modificaciones deliberadas tanto en la estructura del edificio como en el medio ambiente que le rodea.

Se presentan por tanto en este capítulo, las características climáticas de la ciudad de Granada, el emplazamiento del Monasterio en el casco urbano de dicha ciudad, la naturaleza y características del subsuelo donde se alza el conjunto monumental y el microclima del interior de la Iglesia. Además se hará referencia a todos aquellos aspectos ambientales que considero puedan contribuir al deterioro del monumento y/o a explicar los procesos de alteración que en el mismo se observan.

4.1 CLIMATOLOGÍA DE LA CIUDAD DE GRANADA

La ciudad de Granada se encuentra enclavada a una latitud 37° 8' N y longitud 3° 37' W, con una altitud media de 710 m sobre el nivel del mar. Presenta en términos generales un clima mediterráneo, con características que lo asemejan a un clima continental semiárido. En las Tablas 4.1 y 4.2 se resumen los datos climáticos más significativos registrados en el casco urbano de la ciudad en el período de tiempo comprendido entre 1989 y 1996 años durante los cuales se ha realizado este trabajo. Se trata de un período de sequía de los más importantes padecidos por la región andaluza en el siglo pasado, excepto el año 1996 que, paradójicamente, ha sido uno de los más lluviosos. En la Tabla 4.1 se pone de manifiesto la disparidad de valores entre la temperatura media máxima y la temperatura media mínima mensual de Granada, de 33.2°C y 2.2°C respectivamente. La temperatura máxima absoluta registrada en estos años fue de 41.3°C en Julio de 1995, y la mínima absoluta de -7.8 °C en Diciembre de 1994. A pesar de la latitud en la que se encuentra Granada, estas temperaturas tan bajas se ven favorecidas por la cercanía de la ciudad a Sierra Nevada, que contribuye igualmente a que sean frecuentes las fuertes oscilaciones térmicas incluso en un mismo día, de modo que se pueden registrar diferencias de hasta 20°C de temperatura. Considerando estas temperaturas mínimas no es de extrañar que se registren al año algunas nevadas. Más frecuente es la presencia de escarcha (39 días al año, principalmente en Diciembre, Enero y Febrero), y de rocío (78 días concentrados en los meses de Mayo y Noviembre).

En cuanto a la precipitación en forma de lluvia, se pueden distinguir a grandes rasgos dos períodos de máxima pluviosidad: Octubre, Noviembre y Diciembre, y los meses de Febrero, Marzo y Abril. En la Tabla 4.2. se presentan los valores pluviométricos entre los años 1989 y 1996. En general los valores de precipitación media anual han sido bajos, exceptuando el año 1989 en que casi se alcanzaron casi los 500 l/m², registrándose en 1996 hasta 875 l/m². En el resto de los años no se han superado los 400 l/m² anuales. Ello se ha debido, como se ha mencionado, a la grave sequía que en los cinco primeros años de la década de los noventa ha asolado a España. La humedad media anual ha sido de 55%, correspondiendo la máxima humedad (70%) al mes de Diciembre y la mínima a Julio con un 40%. El índice de aridez de Martonne es de 13.6 en el intervalo de 1989-1995 ascendiendo a 25.8 si se considera el año 1996. ($I=p/T+10$; $p=pp$ media anual, $T=T$ media anual).

El régimen de vientos es moderado, siendo las direcciones predominantes S y W. Debe mencionarse, por su especial incidencia en el deterioro de las fachadas de los monumentos, los vientos portadores de lluvia que, en el caso de la ciudad de Granada, proceden principalmente del sector W-SW, hecho digno de ser mencionado ya que el ábside de la Iglesia de San Jerónimo y su hastial izquierdo tienen esta orientación (Fig. 3.1). Cabe añadir en este estudio que el número de días despejados al año es muy elevado (121), así como el número de horas de exposición solar (2831), lo que unido a la no muy elevada humedad relativa del aire favorece los procesos de evaporación, especialmente en las fachadas con orientación S y W (Guardia Olmedo et al., 1986). Si consideramos además, tal como ya se ha mencionado, los cambios bruscos de temperatura habituales en esta ciudad, se concluye que los fenómenos de alteración por estrés térmico son frecuentes en los monumentos de Granada. A este fenómeno hacen referencia autores como Galán (1991), Galán et al., (1992) y Durán Suárez et al., (1992, 1993) quienes tras realizar estudios térmicos respectivamente en las columnas de mármol del Patio de los Leones de la Alhambra de Granada, y en las columnas de travertino de la Iglesia del Salvador (Granada), han concluido que los cambios térmicos que afectan a estructuras ya alteradas contribuyen a acelerar el proceso de destrucción de material constructivo.

Respecto a la influencia que tiene la variación de la temperatura en el estrés térmico en rocas carbonatadas, existen referencias, por ejemplo, en calizas, calizas dolomíticas y dolomías de Puglia (Italia) (Baldassarre et al., 1989). Los valores obtenidos para el estrés superficial se encuentran por debajo del límite de rotura por compresión uniaxial (130 MPa) y por corte (30 MPa), pero están muy próximos al de tracción (6 MPa). La mayoría de los estudios térmicos se han realizado en mármoles (Zezza et al., 1985; Ferrari da Passano et al., 1986) y granitos (Delgado Rodrigues, 1982; Kelly, 1985). En las calcarenitas de Santa Pudia no se han efectuado estudios térmicos como los mencionados.

Existen principalmente dos mecanismos responsables de procesos de alteración mecánica basados en los cambios de temperatura, que dependen de la presencia o ausencia de agua, y que en última instancia pueden conducir a la fragmentación de la roca:

- la presencia de agua en poros y fracturas es uno de los medios más eficaces de fracturación mecánica, cuando existe alternancia de condiciones hielo/deshielo. Al pasar el agua a hielo incrementa su volumen hasta un 9.2%, que vuelve a disminuir al pasar de nuevo al estado líquido. Si esta acción se repite de forma sistemática la roca puede desintegrarse. El fenómeno se denomina gelifracción y origina formas de alteración por descohesión (fracturación, fisuración, escamación...);
- en ausencia de agua, los fenómenos producidos por alteración térmica dependen esencialmente de la conductividad térmica de la roca, de los coeficientes de expansión térmica de los diferentes minerales, de su capacidad calorífica, de las variaciones de temperatura diarias, así como su distribución (homogeneidad) en la roca. Los efectos de esta variación térmica son principalmente: desplazados, hinchamiento y disgregación granular.

Tabla 4.1. Promedios mensuales. (Datos cedidos por el Dr. Nicolás Velilla).

1989-96	Tm	Tm-max	Tm-min	Tmax-ab	Tmin-ab	P	HR	Plv	# lluv
Enero	7.7	13.3	2.2	19.1	-5.9	704	64	46	6
Febrero	9.9	16.0	3.8	25.5	-4.8	703	60	36	8
Marzo	13.5	19.9	7.0	29.4	-5.3	702	57	35	7
Abril	14.3	20.1	8.4	29.2	2.9	699	55	38	8
Mayo	18.2	23.6	12.7	33.2	5.7	702	51	33	7
Junio	22.1	28.2	16.0	37.0	9.4	704	48	18	4
Julio	27.0	33.2	20.9	41.3	15.2	706	40	3	2
Agosto	26.7	32.7	20.6	38.2	13.0	706	44	2	2
Septiembre	21.7	27.3	16.0	34.2	7.9	704	52	36	5
Octubre	16.3	21.4	11.3	32.8	4.8	702	60	54	8
Noviembre	12.1	17.1	7.1	26.6	-1.2	702	64	52	9
Diciembre	8.9	13.8	4.0	20.2	-7.8	701	70	72	12
Media	16.5	22.2	10.8	41.3	-7.8	703	55	426*	77*

Nota: Tm: Temperatura media. Tm-max: Temperatura máxima media. Tm-min: Temperatura mínima media. Tmax-ab: Temperatura máxima absoluta. Tmin-ab: Temperatura mínima absoluta. P: Presión atmosférica (mlbar). HR: Humedad relativa (%). Plv: Pluviometría (mm³/m²) # lluv: número mensual de días de lluvia. *= Datos anuales.

La temperatura tiene además efectos indirectos muy importantes. Regula la humedad en los poros de las rocas, la solubilidad de los gases disueltos, la velocidad de las reacciones químicas, y la hidrólisis de los minerales (Cabrera, 1979). Un aspecto que no suele considerarse, es que la desintegración de un material pétreo o artificial puede producirse por la expansión térmica de las sales atrapadas en sus poros (Pühringer, 1983). En este sentido, Cooke y Smalley (1968) asignaron una gran importancia al elevado grado de expansión de la halita por debajo de 100 °C. En la Figura 4.1. se aprecia la expansión diferencial de la halita en comparación con cuarzo, calcita y granito. Dicha expansión llega a ser de 0.5% cuando la temperatura aumenta desde 0 °C hasta 60 °C, mientras que el granito expande menos de 0.2%. Aunque estos valores (en términos absolutos) pueden parecer pequeños, se cree que la expansión disruptiva de una sal participa en la alteración física de una piedra.

Tabla 4.2. Datos de pluviometría (en mm) de los años 1989 a 1996. (Datos cedidos por el Dr. Nicolás Velilla).

	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Enero	27	50	5	20	0	55	15	194
Febrero	37	0	61	35	10	56	12	80
Marzo	36	38	70	23	27	6	29	52
Abril	37	95	18	37	50	37	14	17
Mayo	28	34	4	4	60	24	1	109
Junio	26	0	8	66	2	1	24	17
Julio	0	2	1	14	0	1	0	7
Agosto	1	2	0	2	1	1	10	1
Septiembre	77	30	61	18	4	40	4	57
Octubre	34	71	57	107	65	59	5	36
Noviembre	85	53	23	16	37	44	53	105
Diciembre	109	32	31	25	4	6	167	200
Total	497	407	339	367	260	330	334	875

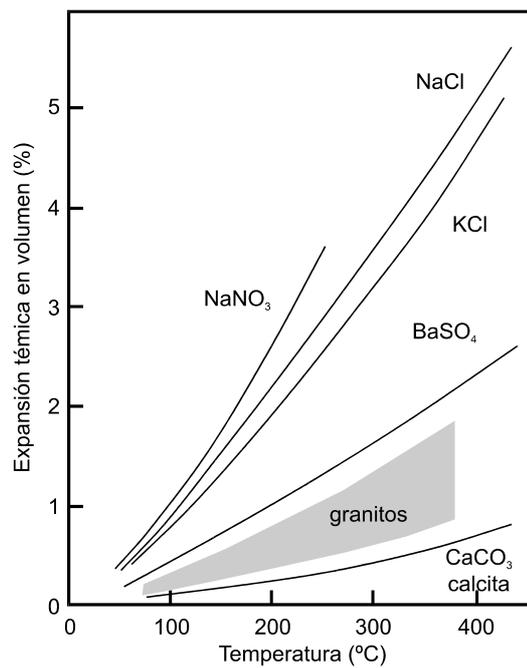


Figura 4.1. Expansión térmica volumétrica de algunas sales y granitos (tomado de Cooke y Smalley, 1968).

4.2 EMPLAZAMIENTO URBANO

Es importante realizar una descripción detallada del emplazamiento del Monasterio-Iglesia de San Jerónimo en el casco urbano de Granada, de las calles que lo delimitan en la actualidad y las de antaño, así como las zonas verdes que lo rodean, pues es de fundamental relevancia comprobar si las condiciones y componentes del subsuelo en que se construyó este edificio han contribuido al desarrollo de las formaciones salinas que aparecen en la base de sus muros, y llegan a alcanzar hasta 3 m de altura. La orientación del Monasterio-Iglesia de San Jerónimo, atendiendo al eje mayor de la Iglesia, es NW-SE. En la actualidad limita con la calle Gran Capitán al S, y al E con la calle Rector López-Argüeta y calle Compás de San Jerónimo. Al N se alza el edificio San Jerónimo que alberga la Escuela Universitaria de Relaciones Laborales y la Escuela Universitaria de Trabajo Social, y al W el ambulatorio de Gran Capitán y una serie de edificios de nueva construcción (Figura 4.2.). Delante de la fachada S de la Iglesia, que corresponde al ábside, hay una placeta con cerca de medio centenar de naranjos, lo que favorece la retención de humedad en el suelo cuando llueve o se riegan los árboles. Esta zona del ábside, con orientación S-SE se corresponde en la parte interna del Templo justamente con la base de la capilla mayor, lugar donde aparecen de forma masiva formaciones salinas (Figuras 4.3a. y 4.3b.). Durante muchos años la entrada a la Iglesia se efectuó por una puerta existente al costado izquierdo del ábside, atravesando una pequeña cancela y descendiendo unos peldaños (Colina Munguía, 1986). Junto a esta puerta existe una fuente con fechas de 1565 y 1790 impresas en sendas losas. Actualmente no tiene salida de agua, pero es evidente que en otro tiempo la tuvo.

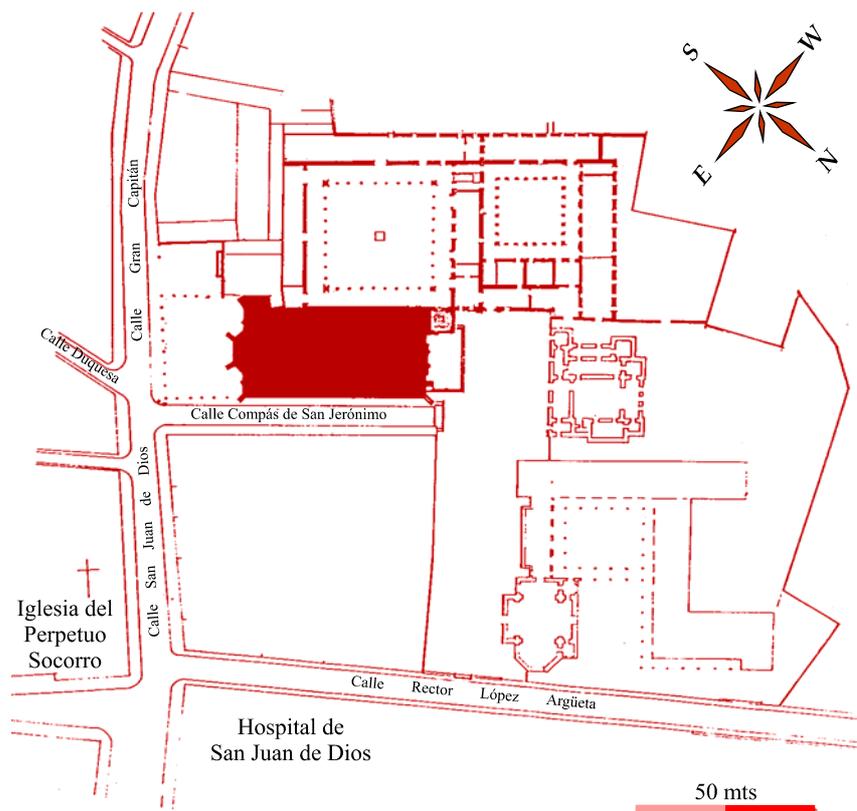


Figura 4.2. Emplazamiento urbano del Monasterio de San Jerónimo, Hospital de San Juan de Dios e Iglesia del Perpetuo Socorro, con indicación de las calles circundantes. Tomado de Gallego y Burín (1982).

Es interesante la observación de que para entrar por esta puerta a la Iglesia hacía falta descender unos peldaños, pues ello indica que la planta del Templo se encontraba levemente hundida, tal y como se aprecia hoy día. El hastial del costado derecho de la Iglesia que discurre paralelo a la calle Compás de San Jerónimo tiene a su vez una ligera inclinación descendente (Figura 4.4.). Estos dos datos mencionados son indicativos de que ya desde tiempos antiguos existía una pendiente del terreno donde se edificó el Monasterio con dirección SE-NW, sugiriendo algunos autores que quizás esté relacionada con el paso de una acequia que surtía de agua al Monasterio y sus huertas (Guardia et al., 1987), lo que indudablemente refuerza la idea de que debido a estas características del entorno circundante, el monumento ha estado sometido a la acción continuada de aguas y humedades.



Figura 4.3a. Alzado del ábside de la Iglesia de San Jerónimo. Tomado de Guardia Olmedo y colaboradores, 1986. Escala 1 :100.



Figura 4.3b. Ábside de la Iglesia de San Jerónimo visto desde el interior.

Al fondo de la calle Compás de San Jerónimo existe una valla con puerta que da acceso al Compás del Monasterio y de la Iglesia, hoy muy reducido. La amplia extensión que ocupó este Compás, según la "Plataforma de Granada" del maestro Ambrosio del Vico dibujada en el año 1612, patentiza que poseía abundancia de arbolado: "sus álamos colocados en triple hilera, formando avenida que conduce a las fachadas del Monasterio y de la Iglesia" (Gómez-Moreno Calera, 1992). En Junio de 1966 se abrió esta antigua entrada al Monasterio por la actual calle Rector López Argüeta, con ocasión de la restauración iniciada en 1957 por la Orden Jerónima. De fondo al Compás se sitúa la fachada del Monasterio. Formando ángulo recto con la anterior, se encuentra la fachada principal de la Iglesia, en cuyo lado izquierdo se localiza otra fuente actualmente fuera de uso. Debe añadirse, que de los dos claustros que posee el Monasterio, el claustro primero, el más grande y más próximo a la Iglesia, está ocupado por un jardín de naranjos con una fuente en su centro.

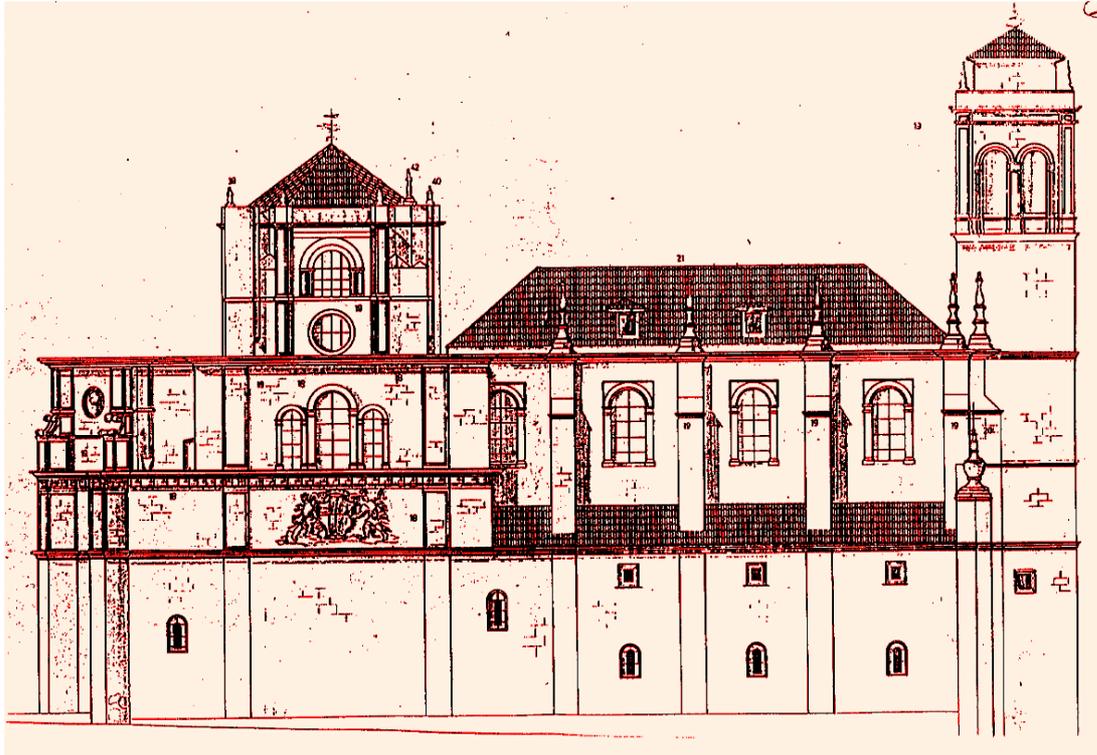


Figura 4.4. Alzado del hastial NE de la Iglesia de San Jerónimo. Obsérvese el desnivel del terreno. Extraído de Guardia Olmedo y colaboradores, 1986. Escala 1 :100.

4.3 CARACTERÍSTICAS DEL SUBSUELO

Con motivo de la reforma de una nave ubicada en el recinto del Monasterio-Iglesia de San Jerónimo, la rama femenina de la Orden Jerónima encargó un estudio geotécnico a la empresa Geotécnica del Sur, S.A. a principios del año 1991. El reconocimiento del subsuelo efectuado para la realización del tal Informe ha sido decisivo para conocer las características morfológicas del terreno sobre el que se edificó el Monasterio (Geotécnica del Sur, S.A., 1991).

La zona estudiada se localiza en la Depresión de Granada. En ella se depositaron durante el Neógeno y Cuaternario sedimentos arcillosos y limosos con frecuentes intercalaciones irregulares de conglomerados (Aguirre, 1958; Braga et al., 1990; Fernández et al., 1991). El edificio se construyó sobre material que constituye la vega alta granadina, caracterizada por un depósito típico aluvial. Aunque en conjunto la estratigrafía de estos materiales es bastante simple, en detalle presenta ciertas irregularidades típicas de los depósitos aluviales. La capa superior es de material de derribo y cascotes con espesores variables, en algunos casos de cierta consideración, pues alcanza hasta 4 m de profundidad. Bajo dicha capa existe un sustrato granular predominante con interdigitaciones de suelos finos limo-arcillosos. El material de relleno es muy heterogéneo, siendo en unos casos arcilloso y en otros de textura granular, todo ello con abundantes restos de ladrillo. Desde un punto de vista mecánico-geotécnico, este material se caracteriza por presentar bajo e irregular grado de compactación.

El material aluvial se reconoce bajo toda la capa anterior, constituyendo el sustrato del emplazamiento. En general está formado por niveles alternantes de arenas y gravas con matriz limosa y/o limo-arenosa marrón y arcillas de tonalidad marrón. La distribución de estos materiales es muy

irregular, pues aparecen niveles arcillosos y limosos de considerable potencia hacia el W, disminuyendo en dirección E. Este tipo de interdigitaciones de capas es típico de materiales aluviales, pudiéndose observar la estructura probable en el perfil estratigráfico que se muestra en la Figura 4.5. Los resultados de los ensayos de identificación de los materiales clasifican los niveles finos como CL-ML, CL y ML¹. Si bien en el E existe abundante fracción arenosa y se clasifica como SC. En el caso de las capas de textura gruesa (arenas y gravas de matriz limosa y limo-arenosa con cantos y bolos), las clasificaciones que se obtiene son: GP-GM, GP y GM. Al no detectarse nivel freático dentro de la profundidad reconocida, unos 15 m aproximadamente, se procedió a la determinación de sulfatos solubles en el suelo, dando negativo el resultado.

Se han comprobado otros dos informes geotécnicos realizados en terrenos próximos al Monasterio, uno de ellos en la misma calle San Juan de Dios esquina calle Arriola, y otro en la calle Duquesa esquina calle Triana. Las características del subsuelo son semejantes en los tres informes, aunque es de resaltar que en la calle Duquesa el nivel freático aparece a 6 m de profundidad.

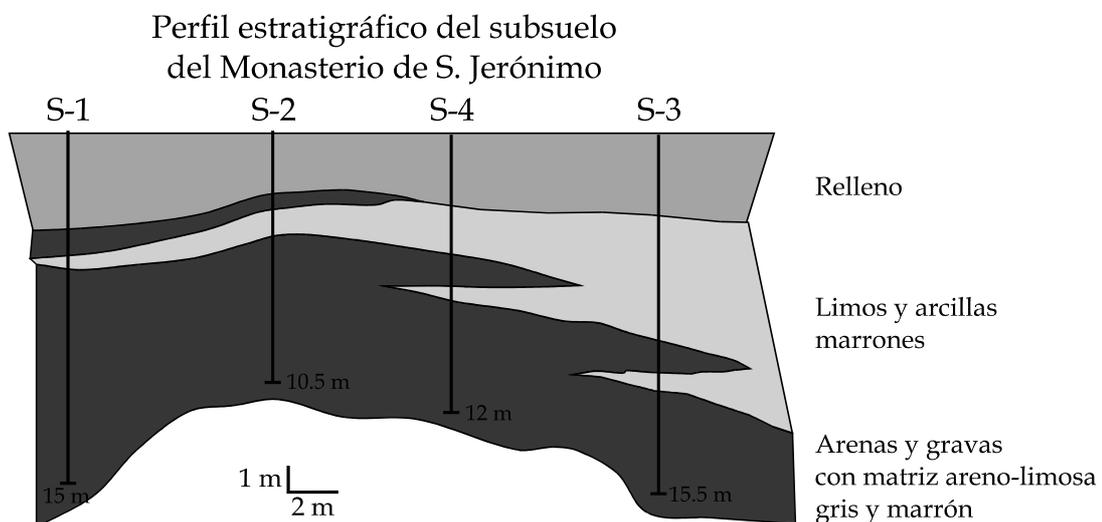


Figura 4.5. Perfil estratigráfico del subsuelo del Monasterio de S. Jerónimo. S=sondeo. Tomado del informe inédito de Geotécnica del Sur S.A. (1991).

Debe mencionarse que la inadecuada canalización de las aguas de abastecimiento y residuales, con abundantes fugas bajo los edificios, junto a la existencia de lentejones de arcillas en el terreno, pueden provocar bolsadas de agua en el subsuelo. Ello, unido al material excesivamente poroso con que están contruidos los edificios históricos (no así los modernos) contribuye a que ascienda agua por capilaridad en sus muros, y que incluso llegue a alcanzar hasta 3m de altura. Tal es el caso del Monasterio de San Jerónimo, el Hospital de San Juan de Dios y la Iglesia del Socorro.

¹ Según el sistema unificado de clasificación de los suelos (ASTM, 1986), éstos se clasifican según su grado de asentamiento. Para tal fin se emplean siglas. Las nombradas en esta Tesis y su significado son las siguientes:

CL: Arcilla inorgánica de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.

ML: Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillas ligeramente plásticas, limos de baja plasticidad.

CL-ML: Arcillas limosas.

SC: Arenas arcillosas.

GP: Grava mal graduada, mezcla de grava y arena con poco o nada de finos (grava limpia: poco o nada de partículas finas).

GM: Gravas limosas, mezcla de grava, arena y arcilla. Gravas con finos: cantidad apreciable de partículas finas.

La presencia de sales (principalmente halita) en la zona inferior de la Iglesia de San Jerónimo tiene su origen en el terreno. El suelo aporta las soluciones salinas que nutren la red capilar de los materiales, y al ser un proceso acumulativo en el tiempo causa una concentración de las mismas en su seno. La presencia actual, y sobre todo en el pasado, de zonas verdes circundantes y acequias en el entorno del Monasterio de San Jerónimo para abastecer de agua a sus huertas, fuentes y patios, ha contribuido a la presencia de una elevada humedad en el terreno (Moreno Olmedo, 1994). La identificación de halita es frecuente en las zonas bajas de los muros de otros monumentos granadinos con emplazamientos diferentes. Mención especial es el caso de la Casa de Castril (Navarrete Aguilera, 1989; Rodríguez Gordillo et al., 1990), el Hospital Real (Sebastián et al., 1989) y la Iglesia de El Salvador (Durán Suárez et al., 1992; 1993) construidos todos ellos con calcarenita y travertino.

Con objeto de explicar la posible procedencia de los aniones de estas sales, en particular de los cloruros y del sodio, se han consultado algunos análisis químicos de las aguas de los ríos Darro y Genil que atraviesan la ciudad de Granada, así como de las aguas de lluvia, aguas de abastecimiento y aguas residuales. Es muy poco probable que las aguas de los ríos Darro y Genil ejerzan alguna influencia en el subsuelo de la Iglesia de San Jerónimo, dado el distanciamiento del edificio a los mismos. Sus datos se incluyen aquí porque algunos monumentos granadinos situados próximos al río Darro muestran un desarrollo espectacular de cristales de halita en la zona baja de sus muros, y sistemáticamente su presencia se ha atribuido al elevado contenido en NaCl del Darro (Rodríguez Gordillo et al., 1990). Por otra parte, se han obviado los datos de las aguas del acuífero de la Vega de Granada porque dada su lejanía y profundidad, escasamente o en nada interfieren en el terreno de la ciudad.

En la Tabla 4.3 se presentan los datos del análisis químico de las aguas de los ríos Darro y Genil (extraído de Castillo Martín, 1986). Los resultados revelan que se tratan de aguas bicarbonatadas cálcicas pobres en NaCl. En la Tabla 4.4 se presentan los datos del análisis químico, pH y conductividad del agua a la salida de la planta de tratamiento de Emasagra, así como los resultados de los puntos de control situados en el Salón, Cuesta de Alhacaba y Albayzín. Se advierte la baja concentración en Na y K. En las aguas residuales únicamente se mide la demanda biológica de oxígeno a los 5 días, pues los análisis restantes son similares a los de las aguas potables. Por consiguiente, una posible explicación para justificar la masiva presencia de sales de cloruro de sodio en la parte inferior del Monasterio es la preconcentración continua de esta sal en el terreno consecuencia de la natural evapotranspiración de las aguas de infiltración. Además hay que añadir la ocasional contaminación urbana, descartando los efectos de intercambios iónicos, adsorción y actividad biológica, pues el ión cloruro es insensible a ellos. Es necesario mencionar, y se comentará ampliamente en el capítulo 5, que la mayor parte del Monasterio se ha construido con una calcarenita bioclástica, cuyos datos analíticos revelan que su contenido en Na es suficiente como para contribuir en la formación de estas sales en el edificio.

Tabla 4.3. Contenidos medios del análisis químico realizado en los ríos Genil, Darro y Aguas Blancas en Septiembre y Marzo de 1984. Datos en mg/l, excepto pH. Extraído de Castillo Martín, (1986).

Ríos	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ H ⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	pH
Genil	13	76	196	5.5	13	4.3	55	15	7.5
Darro	9	37	311	13.3	6	1.7	64	25	8.1
Aguas Blancas	12	107	287	2.7	9	3.2	72	37	8.0

Tabla 4.4. Análisis químico de las aguas de distintas estaciones de tratamiento de la ciudad de Granada. Resultados en mg/l. Valores correspondientes al año 1996. Datos inéditos cedidos por Emasagra, S.A.

	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ H ⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	pH
Salida estación	16.6	29.1	105.3	5.5	1.05	0.4	31.23	9.8	7.8
Cuesta Alhacaba	17.8		76.5	4.3	1.3	0.6	30.8	12.4	7.9
Paseo del Salón	17.8		83.4	4.6	1.4	0.5	32	13.1	7.8

4.4 MICROCLIMA DE LA IGLESIA DE SAN JERÓNIMO

En un estudio climático no es posible prescindir del estudio microclimático local. En el caso de un edificio monumental debe realizarse tanto en su exterior como en el interior, en áreas restringidas del mismo, o en torno a un objeto de arte. El control del microclima, a través de la medición de los parámetros termohigrométricos, permite determinar los momentos en los que se manifiestan oscilaciones en éstos y que suponen un riesgo para la obra. En el presente caso, el objetivo de las mediciones es determinar las variaciones de temperatura y humedad relativa del ambiente, variaciones que son las que controlan la cristalización y disolución de sales. El comportamiento termohigrométrico de un sistema (por sistema se entiende el medio ambiente y las obras contenidas en él) está gobernado, en primera instancia, por las condiciones meteorológicas locales debidas a los ciclos diurnos y estaciones del tiempo (Cacace, 1991; Camuffo, 1991).

Son numerosos los casos en los que en el interior de una iglesia o museo se han desarrollado grandes procesos de alteración de los materiales constructivos u ornamentales. Algunos ejemplos que se pueden mencionar son la Catedral de Cádiz (Vázquez et al., 1987), la Iglesia de San Jerónimo de Granada (Cardell & Rodríguez Gordillo, 1992), o algunas importantes iglesias de Puglia (Italia), como la Catedral de Bari, la de San Ciriano en Ancona, y la de Trani (Zezza, 1981; De Tommasi & Laurenzi, 1989). El paramento interno pétreo de estos edificios está deteriorado profundamente, con más intensidad que el externo, aunque haya sido construido con el mismo material (Laurenzi Tabasso, 1986; Galán, 1989). La mayoría de estas construcciones están cerca de la orilla del mar, donde la alteración de la piedra está directamente relacionada con la presencia de sales solubles (sobre todo sódicas) provenientes del aerosol marino, y a las particulares condiciones termohigrométricas de su interior, en particular el elevado contenido en humedad del aire. No es este el caso de la Iglesia de San Jerónimo, emplazada a unos 50 km de la costa y con una humedad relativa interior excepcionalmente baja.

Se ha propuesto la hipótesis del posible alcance a largas distancias de suspensiones salinas de origen marino a través de grandes movimientos atmosféricos (Auger, 1989). Si bien es cierto que su acción disminuye con la distancia respecto al mar, no obstante pueden tener incluso una mayor importancia en zonas desérticas o subdesérticas, debido al hecho de que tales suspensiones no están diluidas por el agua de lluvia, contribuyendo de esta manera a la acumulación general de sales en los monumentos por causas climáticas. Dado que el desarrollo de sales en la Iglesia de San Jerónimo se localiza en áreas muy específicas, se desestima que el aporte salino sea como consecuencia del fenómeno citado, siendo más lógica la argumentación de la existencia de sales cloruradas por preconcentración en el terreno de dichas soluciones salinas, o su presencia intrínseca en los materiales de construcción.

En la Iglesia de San Jerónimo se han efectuado mediciones de temperatura (T) y humedad relativa (HR) sólo en el interior del Templo. La toma de datos se ha realizado en zonas muy determinadas, que corresponden al ábside (a distintas alturas) coincidiendo con los lugares donde aparecen formaciones salinas. También se han efectuado mediciones puntuales en los muros del altar mayor y en las dos habitaciones laterales con un termohigrómetro electrónico marca Novasina Msl, provisto de célula electrolítica. Los rangos de medición que incluye este aparato son los siguientes: gama de medida de humedad relativa entre 6% y 98%, precisión 99% (para un intervalo de humedad relativa entre 20 y 90%), gama de medida de temperatura entre -20 y 80°C con una precisión de 99.99%. En la

zona alta del retablo (aproximadamente 15-20 m) se ha realizado un registro continuo mensual de T y HR mediante un termohigrógrafo marca Salmoiraghi modelo 1750 QM. El campo de medida de la parte higrométrica está comprendida entre 0% y 100% de humedad relativa, mientras que la de la parte termométrica se puede elegir entre tres rangos de temperatura con distinta sensibilidad de lectura. En las medidas efectuadas se ha seleccionado el rango entre 0°C a +40°C, con una precisión de medida de 0.5°C. También se han realizado mediciones puntuales con el termohigrómetro.

La toma de medidas puntuales sólo se ha podido efectuar durante las horas en que el Templo permanece abierto al público (el horario de verano es de 10 a 1.30 h y de 16 a 19.30 h. En invierno mantiene el mismo horario por la mañana y por la tarde abre de 15 a 18.30 h), lo que supone una grave limitación para establecer las oscilaciones microclimáticas, al carecer de los datos nocturnos. A esto hay que añadir la imposibilidad de situar en las zonas bajas un termohigrógrafo de registro continuo, dado el poco civismo por parte de los visitantes, que en ocasiones han llegado a robar hasta el dinero destinado a limosna depositado en las urnas.

En la Tabla 4.5 se presentan los valores medios de T y HR para julio, agosto, noviembre y diciembre del año 1994, a las 11 h y a las 17 h. Los datos se han tomado de forma puntual con el termohigrómetro. Como es de esperar, las temperaturas más elevadas se registran en los meses de verano, cuando los valores de HR son más bajos, y viceversa, las temperaturas son menores y la HR más alta durante el período invernal. De los valores microclimáticos reflejados en esta tabla se pueden extraer una serie de conclusiones. Para una misma estación, los valores de T y HR medidos en los lugares seleccionados y a diferentes horas del día no muestran grandes oscilaciones. Aún así, es posible distinguir dos microambientes en la Iglesia de San Jerónimo. Durante el verano, en la parte alta del retablo se registran las temperaturas más elevadas, que llagan a ser 4° superiores a las de las zonas bajas del Templo. La HR en ocasiones es considerablemente menor, apenas alcanza el 15%, mientras que en el altar y habitaciones laterales es aproximadamente del 25%. Estos datos se correlacionan claramente con el hecho de que en la parte superior del retablo la luz solar incide directamente durante bastantes horas al día, a consecuencia de la existencia de grandes ventanales en el segundo cuerpo arquitectónico. En la zona baja del Templo la luz solar incide débilmente. En los meses de invierno, las oscilaciones térmicas son menos marcadas.

En las Figura 4.6 se representa la evolución de los valores de la temperatura (T) y humedad relativa (HR) en los meses de Julio y Noviembre de 1994 en la zona alta del retablo. Llama la atención la escasa o casi nula variación de los datos entre el día y la noche, especialmente de la temperatura, y particularmente en Noviembre, no así en Julio, donde se aprecian oscilaciones de HR entre las 18-20 h (13.8%) y las 10-12 h (22.5%). Ello se debe a que el termohigrógrafo se colocó en la zona W, justo la que está expuesta a menos variaciones climáticas.

La Iglesia de San Jerónimo es un monumento escasamente visitado (apenas 50 personas al día), por lo que no se detectan los consecuencias propias de un público numeroso, tales como aporte de calor, vapor, CO₂, introducción de polvo del exterior, rozamiento físico, etc. Por otra parte, esta Iglesia está cerrada al culto religioso, y tampoco lo usan las monjas jerónimas para este fin debido a sus grandes dimensiones, por lo que no hay peligro de fuertes oscilaciones térmicas debidas a la instalación de calefacciones o focos luminosos. Excepcionalmente se ofrecen al año algunos actos públicos (conciertos) con asistencia masiva de visitantes y sin ningún tipo de control. La ventilación es escasa, sólo permanece abierta una entrada lateral, que además presenta doble puerta de acceso. La iluminación en la zona inferior es baja, debido a que los grandes ventanales se encuentran a unos 15 ó 20 m de altura. Esta fuente de luz propicia que la evaporación en las zonas elevadas sea mayor, y que el aire caliente se concentre arriba, haciéndolo el frío abajo, creándose corrientes de convección que favorecen, entre otros fenómenos, el transporte de partículas de polvo (Camuffo et al., 1991).

Tabla 4.5. Valores de HR y T obtenidos en los meses de Julio-Agosto y Noviembre-Diciembre de 1994. Se presentan los valores máximos, mínimos y la media.

	HRmin-HRmax		Tmin-Tmax	
	HRm	Tm	HRm	Tm
Julio-Agosto	11h		17h	
Retablo Este	25.9 - 27.7 26.8	28.8 - 29.2 29	13.5 - 16.6 14.8	30.3 - 30.6 30.4
Retablo Oeste	27.5 - 28.2 27.85	28.5 - 28.7 26.6	13.1 - 17.1 15.1	30.2 - 30.7 30.45
Altar: Este	23.3 - 23.9 23.6	26.9 - 27.5 27.2	25.3 - 26 25.5	25.9 - 27.8 26.7
Altar: Oeste	23.2 23.2	27 - 27.2 27.1	20.1 - 26.9 25.1	27.2 - 27.8 27.4
Habitación Este	22.8 - 23.2 23	27 - 27.2 27.1	21.3 - 25 23.9	26.3 - 30.5 28.6
Habitación: Oeste	24 - 24.1 24.05	27.6 - 27.9 27.75	23.4 - 26.9 25.4	25.9 - 26.6 26.3
Noviembre-Diciembre	11h		17h	
Retablo: Este	39 - 50.7 44.85	16.3 - 16.7 16.5	33.8 - 47.9 40.85	16.9 - 17.3 17.1
Retablo: Oeste	37.4 - 49.1 43.25	16.8 - 17 16.9	32.9 - 47.7 40.3	17.1 - 18.2 17.65
Altar: Este	39.9 - 46.3 43.1	15.9 - 18.1 17	42.3 - 47.3 44.8	16 - 18.1 17.05
Altar: Oeste	40.7 - 46.3 43.5	15.8 - 18.1 16.9	42.5 - 47.8 45.15	15.9 - 18 16.95
Habitación Este	38.5 - 46.3 42.4	16.3 - 18.1 17.2	38.8 - 46.5 42.65	17 - 18.2 17.6
Habitación Oeste	41.1 - 46.4 43.7	15.7 - 18.1 16.9	41.5 - 46.8 44.15	15.5 - 17.9 16.7

En este epígrafe de características climáticas se debe mencionar que, aunque la ciudad de Granada no presenta una atmósfera muy contaminada, en zonas puntuales como son las calles de mayor tráfico, entre las que se encuentra la calle Gran Capitán, los valores de contaminación son más elevados. Según diversos autores (Camuffo et al., 1982, 1983; Del Monte et al., 1984a, 1984b; Cheng et al., 1987; Rodríguez Navarro et al., 1996) las partículas de contaminación contribuyen de forma decisiva a la formación de las costras de alteración. Ello se debe a su composición (rica en metales pesados) pudiendo actuar como catalizadoras de las reacciones de oxidación del SO₂ para formar H₂SO₄ como producto final, en presencia de H₂O. Este es el fenómeno responsable de la disolución de los carbonatos que componen la mayoría de los materiales de construcción y ornamentales de los monumentos granadinos. El color de la costra de yeso resultante, llamada "costra negra", se debe a la presencia de este tipo de partículas (Del Monte, 1984a), entre las que destacan las de composición carbonosa (hollín) y residuos sólidos producidos por motores de explosión que usan derivados del petróleo como combustible.

Se han realizado diversos estudios composicionales de las costras negras detectadas en monumentos granadinos. Entre ellos se encuentran los efectuados por Navarrete (1989) en la portada del Museo Arqueológico de Granada, y por Rodríguez Navarro (1994) en la Catedral de Granada, que ponen de manifiesto el enriquecimiento en ciertos metales pesados y elementos como Sr y Ba.

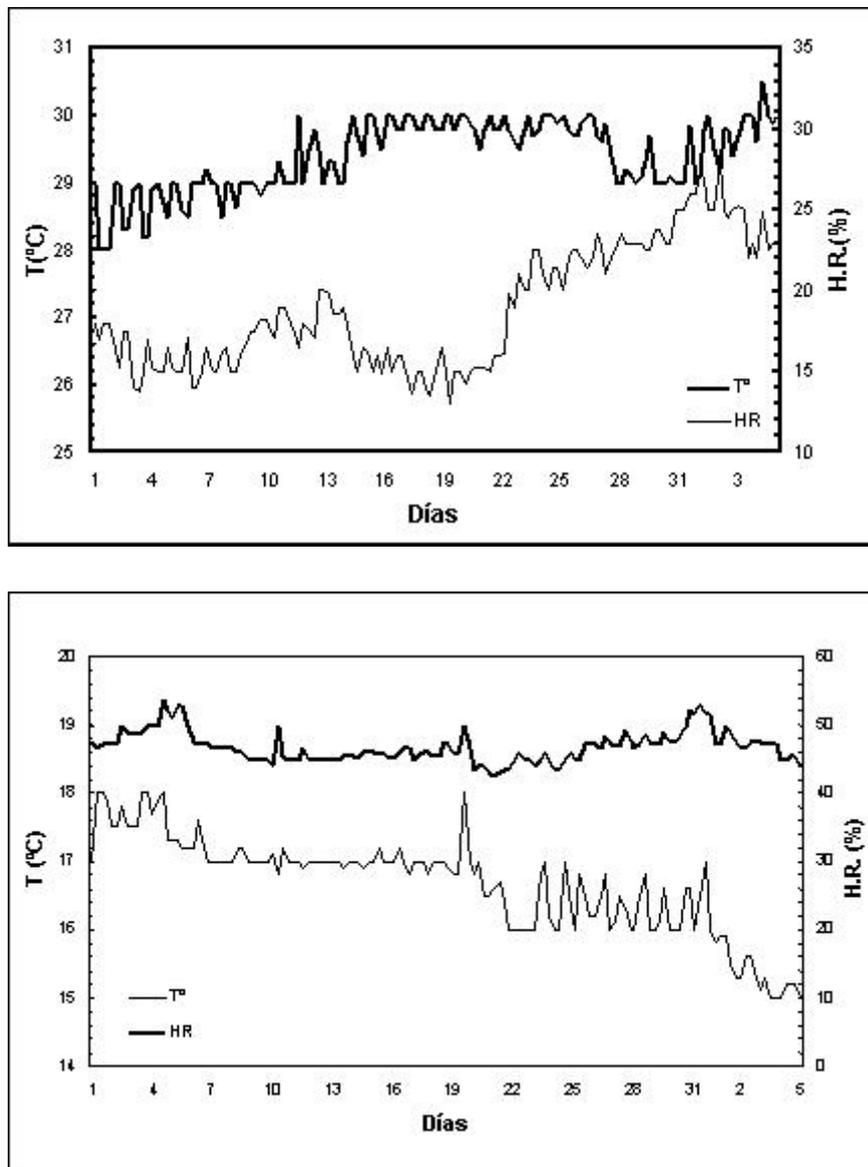


Figura 4.6. Variación de la temperatura y humedad relativa del ambiente en la parte superior del retablo de la Iglesia de San Jerónimo. Año 1994. A) Mes de Julio. B) Mes de Noviembre.

5 MATERIALES PETREOS

Antes de establecer cuál es el estado de conservación de la Iglesia de San Jerónimo, es necesario hacer una exposición de las variedades litológicas observadas en el monumento, indicando las canteras de procedencia de los diferentes materiales, así como su uso y emplazamiento en el edificio. Ello es importante ya que los fenómenos de alteración adoptan diferentes formas de degradación según sea el material pétreo al que afecten. También se describen los tipos de morteros identificados: de unión y de revestimiento, ya que igualmente se ven atacados por los fenómenos de degradación.

Durante el Renacimiento, la utilización de sillar de cantería, es decir, de la piedra como elemento constructivo, quedó reservada a ciertos edificios de rango superior, entre los que se consideraron la Catedral y el Monasterio de San Jerónimo (Gómez-Moreno Calera, 1989). Así, en los tres primeros metros de este último edificio se trabajó con piedra procedente del cementerio musulmán denominado *Saad ben Malic*, situado ante la Puerta de Elvira y en tales días en trance de desaparición (Colina Munguía, 1986). Se han identificado en el basamento calcarenitas, calizas grises (algunas con nódulos de sílex), areniscas, travertinos, trozos de tejas, ladrillos, piezas de lápidas grabadas y morteros de diferente naturaleza. La disposición de los materiales es en *Opus incertum* y *Opus mixtum* (Paniagua, 1990), consecuencia de ello es el desorden de la fábrica, y una degradación químico-física y mecánica diferencial de los materiales frente a los agentes de alteración.

Se presentan a continuación las variedades litológicas identificadas en la Iglesia de San Jerónimo, su ubicación y empleo. Se ha realizado un estudio más detallado de la calcarenita por ser la variedad pétreo más empleada en el monumento, y porque la aparición del resto de los materiales es puntual y apenas presentan problemas de deterioro comparados con la calcarenita.

5.1 CALCARENITAS

Este litotipo se ha utilizado masivamente en los paramentos, muros de cerramiento, contrafuertes y muros de carga del conjunto monumental de San Jerónimo. Pero además, por sus características de fácil elaboración y bella tonalidad, también se ha empleado como roca ornamental en toda la crestería superior, pináculos y demás ornatos escultóricos. Debido a que es el material pétreo más utilizado en la construcción y ornamentación de los monumentos granadinos, se ha estudiado ampliamente desde el punto de vista químico, mineralógico y petrográfico, y determinado sus características físicas y mecánicas (Sebastián Pardo et al., 1992; Rodríguez Navarro, 1994; Durán Suárez, 1996). Por tal motivo en esta Tesis no se vuelve a caracterizar la composición y textura de las calcarenitas procedentes de cantera, como tampoco se realizan ensayos de laboratorio, a excepción de los experimentos de cristalización de sales ya mencionados (Cap. 10). Únicamente se han realizado análisis químicos adicionales, así como su respuesta frente a la transmisión de impulsos ultrasónicos.

Se presenta a continuación, de forma concisa, el contexto geológico de las calcarenitas y sus datos analíticos, ambos de vital importancia para la adecuada interpretación de los resultados del estudio del material procedente del Monasterio de San Jerónimo, así como de los ensayos de cristalización de sales en el laboratorio.

En la zona SW de la depresión de Granada afloran materiales detríticos calcáreos formados por bioclastos de edad Tortonense. Este tipo de arenisca organógena se ha extraído durante siglos de las canteras de La Escribana y Las Parideras, en la zona del Cortijo de Santa Pudía (municipio de Escúzar), en las cercanías de Granada (a unos 24 km al SW). Las calcarenitas representan el depósito, en condiciones marinas someras, de los esqueletos calcáreos de diferentes tipos de organismos, posteriormente removilizados y mezclados con los aportes detríticos de los relieves cercanos (xenoclastos de esquistos y micaesquistos), lo que confirma su procedencia de los mantos alpujárrides. Tras esta primera etapa de sedimentación sufrieron una diagénesis poco pronunciada, que ocasionó una cierta cementación y por tanto una reducción de la porosidad. Este proceso de cementación no fue homogéneo en todos los niveles calcareníticos. Ello, junto a la heterogeneidad en el tamaño de grano, tipo de bioclastos y composición química, ocasiona una variación en la formación calcarenítica, que supone comportamientos distintos de la roca según el nivel de extracción.

5.1.1 Análisis químico, mineralógico y textural

La calcarenita bioclástica está formada en su mayoría por restos de algas (rojas principalmente), conchas de bivalvos, serpúlidos, equinodermos, restos de briozoos y foraminíferos bentónicos. Presenta en algunos casos dos generaciones de cemento calcáreo: la primera, de tipo micrítico (barro carbonatado) y excepcionalmente microesparítico; la segunda generación es de tipo esparítico y sólo aparece en los tramos de cantera más compactos. Como minerales accesorios se identifican cuarzo, feldespatos y arcillas (moscovita, biotita, paragonita, clorita, caolinita y esmectitas).

En las dos canteras estudiadas se aprecian diferentes subtipos de roca en base a la variación de color y textura. El análisis mineralógico y petrográfico confirma a su vez una fuerte heterogeneidad composicional y textural. En las Tablas 5.1, 5.2, y 5.3 se recogen la composición mineralógica, química y las características texturales de los subtipos de calcarenita de cantera establecidos.

Tabla 5.1. Composición mineralógica (%) obtenida mediante XRD de las distintas variedades de calcarenita de las canteras de Santa Pudia. Tomado de Rodríguez Navarro (1994).

Tipo	Muestra total				Arcillas		
	Calcita	Cuarzo	Feldespatos	Arcillas*	Illita	K+Cl	Esmectitas
E-1	100-90	>10	-	<1	85	15	-
E-2	>95	-	-	3.5	40	5	55
E-3	>90	<10	<5	2.5	50	5	45
Par	<100	-	-	1.7	85	15	-

*Datos obtenidos por pesada del residuo insoluble de tamaño menor de 2 μm .

Tabla 5.2. Contenido en elementos mayoritarios (%) y elementos traza (ppm) de las calcarenitas de las canteras de Santa Pudia. PC=pérdida por calcinación.

Muestra	E-1*	E-2*	E-3*	PAR*	C-1	C-2	C-3	C-4	Escl-15	Escl-16
SiO ₂	1.2	1.3	2.2	0.2	0.8	4.6	4.5	3.7	1.8	0.5
Al ₂ O ₃	0.5	0.5	0.4	0.2	0.2	0.9	1	0.7	0.4	0.8
CaO	55.8	53.8	54.3	53.6	53.9	52.3	52	45.7	54.8	54.8
MgO	0.6	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.6	5.6	0.5	1
Na ₂ O	0.1	0.1	<0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
K ₂ O	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
Fe ₂ O ₃	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.3	0.4
MnO	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	0.2	0.1	0.2	<0.1	<0.1
TiO ₂	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	<0.1
P ₂ O ₃	0.1	0.1	0.1	<0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
PC	42.3	42.4	42.5	42.7	44.5	41.5	40.5	43.5	41.8	40.6
Total	99.4	99.9	100.5	100.3	100.4	100.5	99.4	100.3	99.8	97.7
Cr	-	-	-	-	4	13	13	11	10	11
Sr	355	327	290	169	312	438	495	406	457	452
Co	3.5	2.5	1.5	7	2	3	3	3	3	3
Ni	9.3	8.5	8.5	11	4	6	7	5	7	8
Cu	5.8	16.1	4.6	8	3.5	5.2	6.9	4	3.4	4.3
Zn	27.5	38.1	26.1	29	8.8	32.2	36.3	14.1	60.6	46
Pb	5	3	6.5	8	<2	<2	<2	<2	2	2
Ba	27	21	10	10	17	28	17	<10	32	36

*Datos extraídos de Sebastián Pardo et al., (1992).

5.1.2 Propiedades petrofísicas

Las calcarenitas se caracterizan por tener un bajo grado de anisotropía textural. En las distintas variedades de La Escribana este parámetro es siempre inferior al 5%, mientras que en las Parideras es ligeramente superior al 7%. En general son piedras macroporosas. Todas las variedades pétreas presentan una distribución de radio de acceso de poro (determinado con MIP) con máximos de frecuencia para valores cercanos a 100 μm . El grado de conexión entre poros es muy elevado.

En la Tabla 5.4 se recogen los valores medios de porosidad (en %) y área superficial específica (en m^2/g). En la Tabla 5.5 se presenta la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos de cada una de las variedades de calcarenita de cantera. La fuerte dispersión de valores (entre 2400 y 3200 m/s) obtenidos por diversos autores (Durán Suárez, 1996) confirman que se trata de un material bastante heterogéneo desde un punto de vista estructural.

Tabla 5.3. Características texturales y composición de las distintas variedades de calcarenita de cantera. Extraído de Sebastián Pardo et al. (1992).

Cantera	Tipo	Textura	Situación	Composición
La Escribana	E-1	Color blanco. Muy cementada: 1º generación micrítica (o micro-esparítica). 2ª generación esparítica. Pequeño tamaño de bioclasto. Baja porosidad (12-20%). Hay una sub-variedad más porosa (25-30%) denotada E-1b.	Nivel superior.	Algas (rojas), bivalvos, equinodermos, for. bentónicos.
	E-2	Color blanco-amarillento. Muy homogéneo. Bajo nivel de cementación (Una generación). Bioclastos de tamaño elevado, con gran fracturación. Muy poroso (<30%).	Nivel superior, intercalado entre el subtipo E-1.	Serpúlidos, algas, equinodermos, briozoos, for. bentónicos, xenoclastos.
	E-3	Color amarillo oscuro. Pequeño tamaño de bioclasto, textura más homogénea que E-2. Dos generaciones de cemento: 1ª micrítica, 2ª esparítica. Porosidad intermedia entre E-1 y E-2 (=25%).	Nivel inferior.	Algas (rojas), equinodermos, for. bentónicos, gran proporción de xenoclastos.
Las Parideras	Par	Color blanco. Tamaño de bioclasto muy elevado (cm). Alta porosidad inter e intraclástica. Muy heterogéneo.	Nivel superior (único explotado antiguamente)	Briozoos, algas rojas, equinodermos.

Tabla 5.4. Valores medios de porosidad (%) y área superficial (m²/g) de las variedades de calcarenita de cantera. Valores calculados mediante porosimetría de inyección de mercurio. Datos tomados de *Sebastián Pardo et al. (1992); °Rodríguez Navarro (1994); y øDurán Suárez (1996).

Variedad	Porosidad Hg (media)	Intervalo de variación	Área superficial	nº de muestras
E-1*	17.7	12.7 - 22.9	1.26	8
E-2*	31.2	27.8 - 34.7	0.87	5
E-3*	24.6	22.2 - 28.1	0.94	6
PAR*	25.2	21.9 - 31.0	0.53	5
E-1A°	12.3		2.40	
E-1B°	17.0		2.08	
E-2A°	33.8		1.64	
E-3A°	28.1		1.77	
Eø	24.1 ± 2.3			11

5.1.3 Comportamiento hídrico

Las calcarenitas de Santa Pudía presentan una elevada velocidad de absorción libre de agua, así como de succión y ascenso capilar según Durán Suárez (1996). El coeficiente de absorción capilar es de $753.4 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^2 \text{ min}^{1/2}$ (con un error de 1.49%); el coeficiente de penetración capilar es de $0.53994 \text{ cm/min}^{1/2}$ (error = 2.13%); la capacidad de imbibición es de 18.70%; la permeabilidad al vapor de agua es de $274.85 \text{ gr/m}^2 \text{ 24h}$; el ángulo de contacto calcarenita-agua es 0° , y el índice de secado es igual a 0.7229. El secado es lento en los primeros instantes, se acelera notablemente a partir de las primeras 9 horas, hasta prácticamente hacerse nulo a partir del tercer día. En la Figura 5.1 se representa el comportamiento de la calcarenita frente a la absorción libre de agua, en la Figura 5.2 la desorción libre de agua y en la Figura 5.3 el ascenso capilar.

Tabla 5.5. Velocidad de propagación de ultrasonidos (m/s) en calcarenitas de cantera. Se presentan los valores medios, rango de variación y desviación estándar, según tres direcciones perpendiculares. Los valores de M y m se refieren a anisotropía elástica total y relativa (%) respectivamente. Tomado de Sebastián Pardo et al., (1992).

Variedad	VL1	VL2	VL3	M	M
E-1a	3328	3566	3441	5.0	3.6
	2957 - 3643	3130 - 3938	3031 - 3805		
	257	310	309		
E-1b	3046	3315	3183	5.7	4.0
	2782 - 3741	3077 - 3819	2861 - 3680		
	127	153	205		
E-2	2658	2816	2669	3.1	5.4
	2586 - 2750	2764 - 2896	2605 - 2768		
	71	76	74		
E-3	3037	3270	3167	2.1	2.6
	2907 - 3194	2945 - 3454	2934 - 3238		
	71	41	76		
PAR	3324	3645	3537	7.4	3.0
	3054 - 3542	3564 - 3699	3420 - 3617		
	230	42	17		

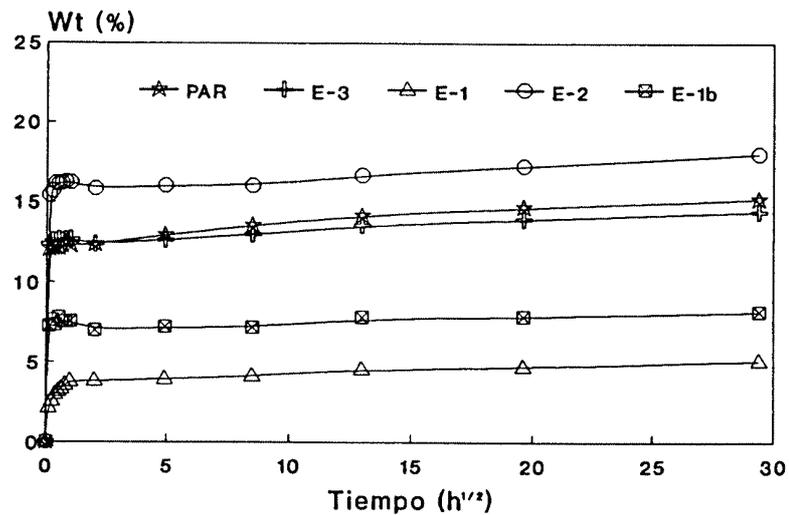


Figura 5.1. Absorción libre de agua en muestras de calcarenitas de las canteras de Santa Pudia (Granada). Según Sebastián Pardo et al., (1992).

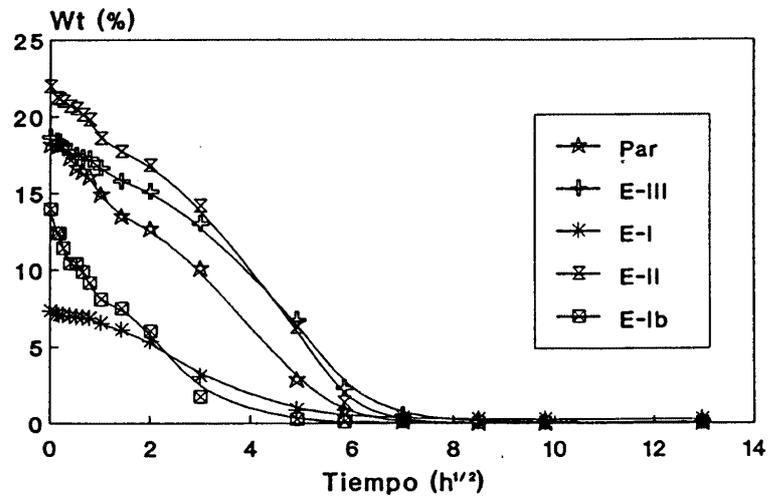


Figura 5.2. Desorción libre de agua en muestras de calcarenitas de las canteras de Santa Pudia (Granada). Según Sebastián Pardo et al., (1992).

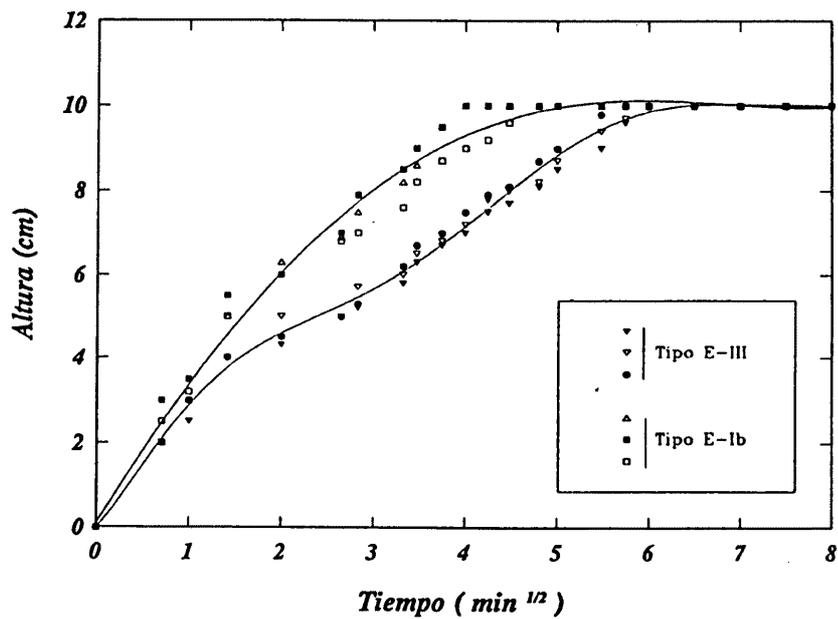


Figura 5.3. Ascenso capilar de variedades de calcarenita empleadas en la construcción de edificios históricos en la ciudad de Granada (material de cantera). Tomado de Rodríguez Navarro (1994).

5.1.4 Propiedades mecánicas

Las tres variedades de calcarenita diferenciadas en “La Escribana” presentan un comportamiento mecánico algo diferente según Sebastián Pardo y colaboradores (1992); la más resistente es el tipo E-1, y la menos el tipo E-2. En el caso específico de la tracción, el comportamiento de E-2 y E-3 es similar. Los parámetros mecánicos del material de “Las Parideras” son, en general, más bajos en compresión y flexión, pero más resistentes a la tracción que los de “La Escribana”. En la Tabla 5.6. se pueden ver los valores de la resistencia (kg/cm^2) para la compresión, tracción y flexión en el material calcáreo de cantera, determinados según tres planos perpendiculares. Los resultados obtenidos por otros autores (Durán Suárez, 1996) de compresión uniaxial (9.03 ± 2.71 MPa) y módulo elástico (1879 ± 446.8 MPa) para esta calcarenita confirman que se trata de una roca con poca resistencia mecánica y bajo módulo elástico.

Tabla 5.6. Valores de resistencia mecánica (kg/cm^2) a compresión (σ_c), tracción indirecta (σ_{Tr}) y flexión (σ_f) de los materiales de las canteras históricas. Se presenta media, moda y desviación estándar. Tomado de Sebastián Pardo et al. (1992).

		E-1	E-2	E-3	PAR	
σ_c	\perp	171	136	16	158	
		148 - 202	91 - 171	125 - 200	144 - 180	
		24	33	32	15	
		156	124	147	101	
		128 - 176	98 - 146	105 - 186	95 - 112	
		22	23	34	8	
		149	122	140	74	
		137 - 165	92 - 159	108 - 178	67 - 84	
		13	31	29	9	
	σ_{Tr}	\perp	16.0	12.2	12.0	16.7
			12.4 - 21.8	9.2 - 14.5	9.7 - 14.7	12.7 - 23.1
			3.0	1.9	1.5	3.6
		13.5	11.2	11.6	16.4	
		10.9 - 16.4	9.2 - 14.3	9.7 - 13.5	12.5 - 21.0	
		1.9	1.6	1.3	3.2	
\perp	12.8	10.8	10.6	11.0		
	10.0 - 16.1	7.6 - 14.1	9.6 - 12.5	8.5 - 19.5		
	1.8	1.7	1.0	3.2		
σ_f		49.2	33.6	69.9	36.8	
		31.7 - 63.4	25.4 - 40.4	28.5 - 51.8	24.1 - 44.8	
		13.8	4.3	10.3	9.7	

5.2 TRAVERTINO

El travertino, también conocido como "piedra toba", procede de Alfacar. La cantera más famosa es la llamada del Rey, en dicho término municipal (NE de Granada). A pesar de la textura grosera del travertino, con grandes oquedades, ser excesivamente heterogéneo y poco vistoso, se ha utilizado de forma masiva en diferentes zonas del Monasterio, y siempre con función constructiva. Su presencia no se ha constatado en ningún caso en los muros internos del Templo, en cambio, en el ábside externo de la Iglesia y el hastial E aparece por encima del basamento heterogéneo, hasta una altura aproximada de 10 m en el primer cuerpo arquitectónico. Por su parte, la Torre, hasta una altura equivalente a la de

la fachada de la Iglesia, está construida por bloques de travertino alternados en las aristas con sillares de calcarenita. Se intuye en la cara W que originalmente la toba estaba cubierta por placas de calcarenita o revocos que la imitaban, como lo evidencian fenómenos de desplazados. El travertino también se ha empleado (de forma muy aislada) en otros sitios poco visibles tales como el cimborrio.

Son escasos los datos de tipo composicional, físicos y químicos que se tienen de este material. No obstante pueden citarse los ensayos físico-mecánicos realizados por Guardia Olmedo et al. (1987) y los trabajos de caracterización mineralógica y textural, así como estudios térmicos llevados a cabo por Durán Suárez et al. (1992, 1993). Los resultados proporcionados por los primeros autores se presentan en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Ensayos físico-mecánicos realizados en travertinos de la cantera de Alfacar (Granada).. Datos tomados de Guardia-Olmedo et al. (1987).

Ensayo de capilaridad. Coeficiente de capilaridad = 1.6×10^{-1} kg/m² min
Densidad aparente = 1.82 g/cc
Ensayo de compresión. Resistencia = 61.1 kg/cm²
Ensayo de ultrasonidos. Velocidad = 2.64 m/s
Ensayo de humedad-sequedad. Pérdida media de peso = 1.08%
Ensayo de hielo-deshielo. Pérdida media de peso = 8.23%

5.3 CALIZA GRIS

La caliza gris procede de Sierra Elvira, en el término municipal de Atarfe, al norte de Granada. Esta roca se identifica sin dificultad *de visu* por su coloración y textura muy homogénea y compacta. Ha sido escasamente utilizada y principalmente con fin decorativo. Aparece con uso ornamental en la portada de la fachada principal de la Iglesia, constituyendo el conjunto arquitectónico que enmarca la puerta, como es el basamento y las columnas dóricas, el frontón, conjunto escultórico de San Jerónimo, y los pináculos. Pero además, y a diferencia de su uso habitual en otros edificios históricos de la época, se han detectado grandes bloques de caliza gris con nódulos de sílex sin labrar en el basamento de la Iglesia. Son pocas las referencias existentes acerca de las características mecánicas y de composición de esta piedra. La Tabla 5.8 muestra los resultados de algunos ensayos realizados por Guardia Olmedo y colaboradores (1987).

Tabla 5.8. Ensayos físico-mecánicos realizados en caliza gris de Sierra Elvira (Granada).. Datos tomados de Guardia-Olmedo et al. (1987)..

Densidad aparente = 2.69 g/cc
Densidad real = 2.78 g/cc
Ensayo de compresión. Resistencia = 513 y 690 kg/cm²
Ensayo de flexotracción = 215 kg/cm²
Ensayo de ultrasonidos. Velocidad = 2.92, 3.18, 4.45 m/s
Ensayo de humedad-sequedad. Pérdida media de peso = 0.27%
Ensayo de hielo-deshielo. Pérdida media de peso = 0.10%

5.4 OTROS MATERIALES

En el interior del Templo se han utilizado otros materiales pétreos, como son el mármol blanco, al que todas las referencias bibliográficas asignan de Macael (Gómez-Moreno González, 1892; Gallego y Burín, 1982; Colina Munguía, 1986; Guardia Olmedo (1989), y una caliza rosa nodulosa de Sierra Elvira, en zonas de gran ornato y pavimentos (Gallego y Burín, 1982).

Respecto a los morteros identificados en el exterior de la Iglesia de San Jerónimo son de dos tipos: de unión y de revestimiento. El mortero de unión original entre bloques y sillares en la zona inferior del edificio presenta una textura grosera. El aglomerante (ligante) de color gris claro engloba áridos de diferente naturaleza y granulometría variada, alcanzando tamaños de hasta 3-4 mm, por lo que más que un mortero debería considerarse un hormigón fino. Entre los sillares de calcarenita y mezclados con el mortero de unión, es frecuente encontrar cuñas de madera y trozos redondeados de micaesquistos de dimensiones superiores a 5 cm. Se distinguen dos clases de morteros de revestimiento: uno aplicado sobre el mortero de unión, con textura homogénea y color crema (enlucido); el otro es un revoco sobre la superficie de los sillares, que puede considerarse un hormigón fino. Su textura y color es tal que imita a la calcarenita. En las zonas elevadas de la Iglesia se ha identificado también este último mortero de revestimiento, siendo el aspecto, textura y color del mortero de unión entre sillares y el enlucido que lo recubre, semejantes a los de la parte baja del edificio.

6 ESTADO DE CONSERVACION

La conclusión a la que se llega tras un primer examen visual sobre el estado de conservación del Monasterio de San Jerónimo es su avanzado grado de deterioro. Peligra la estabilidad de algunos elementos constructivos y decorativos, tanto del interior como del exterior, sirva como ejemplo que son continuos los desprendimientos de trozos de roca, y recientemente de pinturas murales. Debido a la extensión del conjunto monumental, y a que el objetivo fundamental de esta Tesis es el estudio de formaciones salinas en el interior de la Iglesia, se describe exclusivamente el estado de conservación de la misma. Una observación más detallada del edificio pone de manifiesto la conexión entre las alteraciones que afectan a los materiales pétreos del exterior de la Iglesia y la presencia masiva de formaciones salinas en el interior del Templo. Estas patologías están inducidas por defectos estructurales en la construcción, pérdida de función de algunos de sus elementos arquitectónicos externos, y el emplazamiento y orientación geográfica del edificio.

En la descripción de las formas de alteración se ha seguido la terminología propuesta por: Ordaz y Esbert (1988), Fitzner et al., (1992) y las recomendaciones NORMAL 1/88 del CNR-ICR (1980). Con objeto de sistematizar la exposición del estado de conservación, se hará en primer lugar una descripción del exterior de la Iglesia, dividiéndola en tres cuerpos arquitectónicos, y teniendo en cuenta el tipo de material constructivo y la orientación geográfica de sus cuatro fachadas. A continuación se describirán las formas de alteración del interior del Templo.

6.1 EXTERIOR DE LA IGLESIA

Existe una extensa gama de fenómenos y formas de alteración que presentan una intensidad variable de degradación según incidan en uno u otro tipo de material pétreo. No obstante, puede

establecerse que los principales daños se concentran en dos zonas muy localizadas de la Iglesia: el basamento y las zonas más elevadas que comprenden las cornisas, cresterías, gárgolas, pináculos, etc. Anotar que la fachada W de la Iglesia conecta con el claustro mayor del Monasterio, por lo que solamente se puede apreciar para su estudio la zona alta del segundo cuerpo arquitectónico.

6.1.1 Cuerpo inferior

La concentración de humedad es muy intensa en las primeras hileras de sillería del edificio. Se detectan fenómenos de ascenso capilar del agua del terreno hasta una altura de 3 ó 4 m, especialmente visibles en la fachada principal con orientación N. Este ascenso capilar afecta de diferente modo a los distintos materiales. Así, en la Torre, cuyo arranque es de travertino, material pétreo con grandes cavidades que facilitan la evaporación de agua, los sillares apenas están deteriorados. Cuando el travertino presenta revoco de mortero imitando a la calcarenita se producen desconchaduras y/o descamaciones especialmente en el muro NW y W, hasta una altura equivalente al segundo cuerpo de la Iglesia. A partir de aquí la construcción corresponde a las obras de reconstrucción realizadas en 1962.

En las calcarenitas el agua ha favorecido los fenómenos de desagregación arenosa y/o pulverulenta. Esta forma de alteración es la más extendida en este litotipo, independientemente de su ubicación en el monumento y tipo de talla. Así, se pueden observar sillares en las cuatro fachadas donde la pérdida de material es tan elevada que aparecen grandes huecos que alcanzan hasta 10 cm de profundidad. La arenización es especialmente intensa a una altura de 1.5 m del suelo, por lo que no se descarta que la pérdida de material haya sido favorecida por la destrucción mecánica consecuencia de la actividad humana. La descohesión también es frecuente en los elementos labrados, siendo muy llamativo en todos los motivos de crestería de las zonas superiores y muy especialmente en las cornisas, donde este tipo de degradación se ve favorecida por un intenso lavado de las aguas de lluvia que provoca importantes pérdidas de material. De igual modo los ornamentos heráldicos y religiosos han visto disminuido su relieve, principalmente los ubicados en las fachadas S y W, donde es mayor tanto la incidencia del viento portador de lluvias, como el número de horas de insolación.

Otros tipos de alteración que aparecen puntualmente en los niveles inferiores de calcarenita son la alveolización, principalmente en las fachadas anterior (NW) y posterior (SE) de la Iglesia, acanaladuras y picaduras, muy patentes en algunos sillares. Hay que señalar que estos tipos de degradación que conllevan pérdida de material suelen ser selectivos, es decir, que no afectan por igual a sillares contiguos. Se pueden observar bloques de calcarenita con fenómenos de disgregación muy avanzados, y otros vecinos con apenas daños aparentes (Fig. 6.1). En estos casos, juegan un papel decisivo, en el desarrollo de las formas de alteración, el modo de extracción de la cantera, cortado y puesta en obra de cada uno de los sillares, además de las características texturales y físico-mecánicas del material (Zezza, 1990).

Por lo que respecta a las calizas grises, el conjunto arquitectónico-decorativo de la portada del Templo se ha construido con este material. También se han localizado de forma aislada bloques en la fachada principal de la Iglesia y en el hastial derecho. Su textura micrítica compacta hace que estas calizas tengan una buena respuesta frente a la alteración, comparadas con las calcarenitas. Los fenómenos de degradación que se aprecian en las primeras son en general de tipo abrasivo, con redondeados del relieve de los motivos decorativos y a veces pérdida de material. Pero la forma de alteración más habitual es la fisuración y descamación que provocan el levantamiento y separación en escamas o pequeñas lascas paralelas a la superficie de la roca, debido a diferentes mecanismos. Entre ellos se pueden apuntar como más probables los ciclos térmicos, de hielo-deshielo, y la acción de plantas superiores, muy abundantes en la fachada principal de la Iglesia. La microfisuración es especialmente patente en la base de las columnas de la portada, que favorece además la implantación de microorganismos y desarrollo de plantas superiores, las cuales a su vez aumentan la dimensión de las fisuras al ejercer un marcado esfuerzo mecánico.



Figura. 6.1. Pérdida de relieve y desprendimiento de elementos decorativos en la fachada SW de la Iglesia de San Jerónimo. Detalle de alveolización y descohesión selectiva en sillares contiguos.

Otras formas de degradación, tales como las costras y pátinas, afectan tanto a las zonas bajas como a las altas, estando más relacionadas con la orientación geográfica del monumento y con su emplazamiento urbano. La pátina es una capa o película superficial y delgada que se forma sobre las piedras por diversas causas, provocando frecuentemente una modificación superficial del color que no implica necesariamente procesos de degradación o deterioro. El término genérico de pátina incluye varias acepciones, algunas de las cuales se han identificado en el monumento, además de la pátina “noble” o “histórica”, tan querida por los historiadores del arte. Por ejemplo, son muy abundantes las pátinas de ennegrecimiento en el ábside y hastial E de la Iglesia. Ambas fachadas se encuentran respectivamente delante de las calles Gran Capitán y Compás de San Jerónimo, siendo el tráfico de automóviles muy abundante en la primera. Aunque la acumulación superficial de suciedad se puede observar a todo lo alto y largo de estos dos paramentos, es especialmente abundante en las zonas protegidas, debajo de las cornisas, molduras, y en general en todos aquellos relieves en los que es posible la acumulación de polvo y difícil su remoción por lavado de agua de lluvia.

Otras pátinas son de carácter orgánico, las llamadas pátinas biológicas. Estas se localizan sobre todo en las zonas altas de las cuatro fachadas, preferentemente en las zonas sombrías de orientación N y NW. Aparecen de forma muy llamativa en las cornisas y en el canalón perimetral de recogida de aguas del segundo cuerpo. Además se ha detectado herrumbre, que es una pátina de tinción rojiza amarillenta, producida por la oxidación de pernos de hierro y otros elementos metálicos abundantes en la edificación. Algunos son originales del proyecto inicial y otros pertenecen a intervenciones posteriores, como en los pináculos. Como consecuencia de la rotura de las cornisas, se ha producido una diferente coloración de los muros debido a la acción de limpieza que ejerce el agua en los sillares al discurrir por distintas zonas.

Las costras grises presentan similar distribución y coloración a las pátinas de suciedad, no habiéndose identificado costras negras. Las costras grises están compuestas fundamentalmente por acumulación de polvo (partículas sólidas de contaminación, arcillas, calcita, etc.) y cantidades importantes de yeso. Dentro de las pátinas también se debe considerar un tipo de degradación con cierto "carácter histórico-artístico". Se trata de los *graffitis* que aparecen en las zonas bajas, pero también en las altas, tanto en el exterior como interior de la Iglesia. En este último nivel recuerdan a aquellos afortunados que tuvieron acceso a él.

Otra causa de deterioro de carácter antrópico es consecuencia de intervenciones poco satisfactorias en las que se han empleado morteros inadecuados y cementos. Lejos de subsanar los desperfectos, han potenciado aún más el fenómeno de alteración, al ejercer fuertes presiones en la piedra original provocando desgarros y pérdida de material.

Curiosamente, y a pesar de que la patología más importante detectada en el monumento es el desarrollo masivo de sales en el interior del Templo, no se han identificado eflorescencias visibles en los paramentos externos, aunque sí se ha puesto de manifiesto su presencia en el seno poroso de algunas calcarenitas. Su cristalización y crecimiento provoca importantes fenómenos de arenización.

6.1.2 Cuerpo superior

Los mayores daños se localizan en el cuerpo superior del edificio. Destacan los defectos de estructura de la construcción, el más importante, la mala canalización de las aguas de lluvia de la techumbre (Fig. 6.2). En cuanto a los defectos relacionados con los aspectos estructurales del edificio, se debe mencionar la existencia en la fachada principal de dos grietas verticales de gran envergadura. Su origen parece estar conectado con recalces ocurridos en el terreno por el paso de una acequia que surtía de agua al Monasterio y sus huertas, y/o a la posibilidad de que la presencia de la Torre influya creando un *momento de vuelco* que origina tracciones en la parte superior de la fachada. Este *momento* podría haberse producido por un asiento de la base de la Torre hacia la parte exterior de la fachada (Guardia Olmedo et al., 1987).



Figura 6.2. Pulverización de calcarenita en una gárgola de desagüe en la fachada S de la Iglesia de San Jerónimo.



Figura 6.3. Desplazamiento del arco de la bóveda del interior de la Iglesia de San Jerónimo.

En el ábside se ha observado la existencia de varios defectos estructurales propios del período de ejecución del edificio. Tales son el desplazamiento de hasta 5 cm de algunos sillares, que ha obligado a reajustes estructurales en los laterales del ábside. En la correspondiente parte interna del Templo se observa igualmente el desplazamiento diferencial del arco de la bóveda sobre el retablo (Fig. 6.3). Este defecto se prolonga en el exterior hacia arriba, afectando a las dovelas del rosetón del cimborrio. En los grandes ventanales de los hastiales de la Iglesia también existe descompensación de las dovelas de los arcos y separación de sillares. Aparte de los defectos de estructura por causas de tipo técnico, es muy probable que los movimientos sísmicos, tan frecuentes en la ciudad de Granada, hayan afectado a la edificación favoreciendo estas descompensaciones. Las separaciones entre sillares, fisuras y fracturas son importantes vías de penetración de agua, y por tanto, zonas de fácil acceso a la alteración y al desarrollo de vegetación que las potencia aún más.

Se localizan deterioros importantes igualmente en las dos cornisas y sus correspondientes gárgolas. La superior presenta un estado de conservación más precario. Los sillares que la componen muestran la junta perfectamente visible desde abajo y, por el efecto de lavado del agua de lluvia, parte de la moldura labrada se ha perdido. Además existe abundante desarrollo de plantas superiores y presencia de líquenes en toda la línea del alero. En la cornisa inferior, y a ambos lados del escudo del Gran Capitán, las tres primeras hileras de calcarenita aparecen exfoliadas y desplazadas, con pérdida de material (Fig. 6.4). La localización tan puntual de esta alteración se debe a la evacuación inadecuada del agua de lluvia procedente del cuerpo superior, provocado por la pérdida de efectividad del canalón perimetral de la cornisa superior, que recoge las aguas procedentes de la cubierta de la nave principal. La obstrucción de este canal y de las gárgolas por plantas superiores, plumas, excrementos y restos de aves, así como la degradación del material pétreo que forma las gárgolas, incluso el desprendimiento de trozos de las mismas, origina el defectuoso encauzamiento de las aguas de lluvia. Esta se desborda desde el cuerpo superior por las gárgolas laterales e incide en la primera cornisa. Como consecuencia, la humedad se retiene justo en la unión del paramento vertical y el saledizo de la cornisa, originando pulverización y fisuras en esta zona.

La observación detallada ha permitido conectar esta degradación de la calcarenita del paramento externo, que se produce aproximadamente a unos quince metros de altura, con el desarrollo masivo de formaciones salinas en el interior del Templo. Este encuentro entre el muro y la solería de las cornisas constituye una vía de fácil penetración del agua de lluvia con el consiguiente efecto destructivo en la zona del interior del ábside. En la cubierta del segundo nivel de donde parte el muro del cimborrio, se ha detectado otra zona de humedad, posiblemente con el mismo efecto de degradación en la zona interna de la bóveda del ábside y bóvedas colaterales, pero que por imposibilidad de acceso al lugar no se ha podido constatar.

Otro fenómeno de alteración muy extendido en los niveles superiores son los desplazados y descamaciones, que se localizan en elementos constructivos y ornamentales tales como cornisas, gárgolas, crestería, pináculos y sillares, en éstos últimos con desarrollo más espectacular. Dada la localización preferente de los desplazados en las fachadas S y W, donde las horas de incidencia de luz solar son más elevadas, y además coinciden con las direcciones predominantes de vientos cargados de lluvia, parece que ambos fenómenos atmosféricos contribuyen de manera decisiva en su formación. Este tipo de alteración se caracteriza por la separación o pérdida de continuidad de elementos planares con el resto del soporte pétreo y paralelamente a la superficie externa de la piedra. Si el relieve de la misma es plano, el fenómeno se denomina *case hardening* (Winkler, 1979) o simplemente desplazado, como ocurre en los sillares del paramento W (Fig. 6.5A). En cambio, cuando afecta a zonas con relieve complejo, tal es el caso de los pináculos, la separación de las placas se suele desarrollar conservando toda la forma curva del elemento subyacente (Fig. 6.5B). En tal caso el término alterográfico empleado es el de *contour scale* (Zehnder, 1979) o *flakes* y *scales* (Fitzner et al., 1992), cuya traducción al castellano es igualmente desplazado o escama.



Figura 6.4. Localización puntual de desplazados, presencia de líquenes y desarrollo de plantas superiores en sillares de la primera cornisa de la fachada S de la Iglesia de San Jerónimo.

En los niveles superiores del edificio la cantidad de excrementos de aves es tan elevada, que impide el acceso a los distintos cuerpos por las escaleras. Estos restos contienen materiales terrosos y arenosos en proporción variable, además de un 20-25% de materia orgánica, 1-2% de nitrógeno y 0.5-1.5% de ácido fosfórico, por lo que la percolación continuada del agua de lluvia a su través puede tener un efecto corrosivo sobre las piedras que atraviesa.



Figura 6.5. A) Fotografía izquierda. Pérdida de elementos planares ("case hardening") en sillares de calcarenita en la fachada W de la Iglesia. B) Fotografía derecha. Desplacado en un pináculo situado en el cimborrio de la Iglesia ("contour scale").

6.2 INTERIOR DE LA IGLESIA

Los estudios preliminares sobre el estado de conservación del Monasterio-Iglesia de San Jerónimo han puesto de manifiesto que, el tipo de alteración más notable y perjudicial es la presencia masiva de formaciones salinas en el interior del Templo (Cardell & Rodríguez Gordillo, 1992). Las eflorescencias aparecen en zonas muy puntuales: la zona baja del ábside a ambos lados del altar, y sus dos habitaciones laterales con orientación E y W, y a una altura aproximada de 15 m, el corredor con barandilla que bordea la parte superior del retablo. La cantidad y diversidad de formaciones salinas en cuanto a composición, hábitos y/o morfologías difiere dependiendo del material constructivo u ornamental donde se ubican, provocando lógicamente diferentes formas de alteración.

6.2.1 Cuerpo inferior

En la zona baja del ábside y habitaciones laterales el material pétreo constructivo es la biocalcarenita, cubierta por revocos de distinta naturaleza. En el altar además se han identificado trozos de ladrillo de forma aislada. Sobre el revoco de la pared de acceso a la habitación E y en toda la habitación W existen pinturas murales al *fresco* (Gallego y Burín, 1982), comprobándose que en algunos casos están ejecutadas al temple. En estas zonas bajas los principales deterioros están en conexión con la ascenso capilar de humedad del terreno. En la habitación E el desarrollo de sales llega a superar los 3 m de altura, presentándose como costras gruesas de hasta 3 cm. Como en esta habitación no existen pinturas, los daños se limitan a los reventones originados por las costras salinas en los parches de morteros colocados en intervenciones pasadas, probablemente para intentar sanar las humedades del muro (Fig 6.6A y 6.6B). Entre las baldosas del suelo también aparecen sales, pero son escasas, aunque con hábitos más variados. Las policromías existentes en el acceso a esta habitación y los sillares de calcarenita están tapizados por una pelusa de eflorescencias que, en principio, sólo causan perjuicio estético.

Las paredes de la habitación W y su entrada están cubiertas por pinturas murales. En los tres primeros metros la acción de la humedad es tan intensa que la policromía se ha desprendido, quedando el material constructivo a la vista (Fig. 6.7). Para paliar los efectos destructivos que conlleva la humedad se han aplicado revocos y enlucidos que, lejos de subsanar el problema lo han agravado, aparte del impacto estético negativo que producen. Los revocos aparecen desprendidos del sustrato de calcarenita como consecuencia del crecimiento de subeflorescencias, y a su vez tapizados por eflorescencias (Fig. 6.8). Las sales afectan a los bloques de calcarenita, al mortero de unión y a la pintura mural. En la base del altar el desarrollo de sales es igualmente espectacular, el cual debe haberse producido desde tiempos lejanos, habida cuenta de la superposición de morteros de revestimiento de diversa naturaleza que favorecen el deterioro (Fig. 6.9).

6.2.2 Cuerpo superior

En las zonas superiores del interior del ábside el material pétreo utilizado, tanto con fines constructivos como decorativos es la biocalcarenita, que se encuentra cubierta por una capa de enlucido de yeso. El fondo del presbiterio y bóvedas central y laterales están cubiertos por hornacinas ornamentadas con figuras de santos, héroes, bustos, querubines, monstruos, etc, estando todo el conjunto policromado. Se observa el desprendimiento general de las capas de enlucido y pictóricas, hecho especialmente patente en el triple ventanal arqueado con orientación W, consecuencia de la incidencia prolongada de la luz solar. Pero la principal patología es el desarrollo masivo de eflorescencias y subeflorescencias en la base de algunas esculturas ubicadas en el corredor que bordea la parte alta del ábside. Las sales están muy localizadas, justo a ambos lados del retablo y coincidiendo con la zona exterior de la primera cornisa, donde se producen los fenómenos, ya mencionados, de desplazación de sillares de calcarenita y percolación de agua de lluvia a su través. El desarrollo de sales es de tal envergadura que, en determinadas partes de las esculturas, el desmoronamiento (sacraficación) de la calcarenita es total (Fig. 6.10).



Figura 6.6. A) Fotografía superior. Desarrollo de sales hasta una altura superior a 3 m en la pared S de la habitación E de la Iglesia de San Jerónimo. B) Fotografía inferior. Detalle de la morfología de las sales y su acción destructiva en los revestimientos.



Figura 6.7. Desprendimiento del mortero de revestimiento con pintura mural en el acceso a la habitación W. Obsérvese las subeflorescencias entre dicho revestimiento y la calcarenita.



Figura 6.8. Detalle de dos frentes de ascenso capilar con desarrollo de sales en la habitación W de la Iglesia de San Jerónimo.



Figura 6.9. Superposición de revestimientos de diferente naturaleza y desprendimiento de los mismos con subeflorescencias y eflorescencias. Altar de la Iglesia de San Jerónimo.



Figura 6.10. Pulverización de la calcarenita que conforma el pie de una escultura policromada en la zona superior del ábside (Iglesia de San Jerónimo).

7 MUESTREO

Debido a la extensión del conjunto monumental, que comprende diversas dependencias, el muestreo se ha ceñido a la Iglesia lugar donde se localizan las sales que constituyen el principal interés de esta Tesis. La investigación llevada a cabo en la Iglesia de San Jerónimo se ha iniciado con una observación macroscópica detallada de los distintos materiales muestreados, valorando muy especialmente los indicadores externos de alteración. Como consecuencia de este exhaustivo examen se han seleccionado lugares representativos de muestreo de fácil acceso, en los que el impacto estético ha sido mínimo o nulo. La mayoría de las muestras correspondientes a material degradado son restos de material desprendido, desgraciadamente debido al estado de alteración tan avanzado que presentan. Esta fase fue acompañada de una documentación fotográfica de cada tipo y forma de alteración, así como de detalles de elementos arquitectónicos y decorativos que presentan fenómenos de degradación particulares.

Dado el inestimable valor histórico-artístico de los materiales estudiados y sus peculiares características, el muestreo ha reunido una serie de requisitos básicos, aplicables, por otra parte, a toda intervención sobre cualquier conjunto monumental.

- Llegar a un compromiso entre la representatividad de las muestras y el número seleccionado de las mismas, de modo que éste último sea el mínimo posible, reduciendo de esta forma el impacto negativo sobre el monumento.
- Muestrear los distintos tipos de material pétreo constructivo (natural y artificial) y elementos ornamentales, procurando obtener muestras de todas las formas de alteración desarrolladas

sobre ellos. Hay que considerar, como ya se ha mencionado, diferentes alturas y orientaciones del monumento.

- En concordancia con el primer requisito, aprovechar al máximo todos los restos de material desprendido, muy numerosos en la Iglesia de San Jerónimo, debido a su avanzado estado de deterioro.

Además de lo anteriormente expuesto, la premisa en la selección de las muestras de los diferentes materiales objeto de estudio ha sido su representatividad respecto a diversos aspectos. Tales son: ubicación en el monumento, que puede ser en las zonas bajas o en las altas del ábside, tanto del exterior como del interior del Templo, orientación geográfica de las paredes del edificio, grado de deterioro en los materiales pétreos, aspecto externo (color, textura, etc), y función en el caso de los morteros (de unión, de revestimiento...); morfología, hábito y emplazamiento (eflorescencias o subeflorescencias) en las sales, etc. En el caso de las calcarenitas y morteros se han muestreado zonas lo más intactas posible y otras con evidentes signos de alteración, con objeto de establecer las características de ambos estados de conservación y los fenómenos de deterioro que se producen en el seno de los materiales degradados. En el caso de las calcarenitas además se han comparado estos resultados con los del material original de cantera. Las sales se han tomado de aquellos lugares donde aparecen masivamente o de forma puntual, siendo el criterio de selección su aparición en forma de eflorescencias o subeflorescencias, su morfología, y el tipo de soporte sobre o bajo el que se desarrollan.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, y para establecer las relaciones oportunas, se han delimitado las siguientes zonas de extracción de muestras en el Monasterio de San Jerónimo:

- En el exterior de la Iglesia, las zonas bajas de las fachadas con orientación NW, E y SE, a una altura máxima de 2 m. La fachada W conecta con el claustro mayor del Monasterio, por lo que únicamente se ha podido muestrear la zona alta del tercer cuerpo.
- Aquellas zonas elevadas accesibles del exterior de la Iglesia, y a diferentes alturas.
- En el interior del Templo, el altar mayor y dos habitaciones laterales con orientación E y W (Fig. 7.1).
- El corredor que bordea la parte superior del retablo, a una altura aproximada de 15 m.

Para la identificación de las muestras se han utilizado códigos alfanuméricos, atendiendo a los siguientes criterios:

- Según su pertenencia a los diferentes monumentos muestreados:

Monasterio de San Jerónimo (SJ)

Iglesia del Perpetuo Socorro (PS)

Hospital de San Juan de Dios (JD)

- Dependiendo del material estudiado:

C: Calcarenita

M: Mortero

T: Travertino

L: Ladrillo

S: Sal

EP: Estratigrafía pictórica

- Atendiendo al orden de extracción, cada sigla va seguida de un número que indica el orden de la toma de la muestra.

El listado de las muestras estudiadas se incluye en el Anexo I. A continuación se especifican la cantidad y tipo de muestras extraídas de cada uno de los lugares de estudio delimitados:

7.1 EXTERIOR DE LA IGLESIA DE SAN JERÓNIMO

Parte baja de la fachada principal de la Iglesia (orientación NW)

- Tres travertinos en buen estado de conservación (SJT1 a SJT3).
- Tres muestras de sillares de calcarenita. Una de ellas presenta un grado de alteración muy avanzado, apreciándose a simple vista el desarrollo de sales en su seno (SJC23). Las otras dos se han extraído de la superficie ennegrecida de la calcarenita (SJC40 y SJC41).
- Cinco morteros originales de unión de sillares de calcarenita, con evidentes signos de alteración (SJM4 a SJM7 y SJM85).

Parte baja de la fachada E de la Iglesia

- Tres muestras de calcarenita. Una pertenece a un sillar con la superficie ennegrecida (SJC19), otra corresponde a una arenización (SJC21), y la última a una calcarenita bien conservada (SJC18).
- Dos morteros de unión originales alterados (SJM20 y SJM80).
- Cinco muestras de trozos de ladrillos: cuatro son de color rojizo (SJL1 a SJL4), presentándose SJL1 muy desmenuzado, y uno es de tonalidad ocre amarillento (SJL5).

Parte baja de la fachada posterior de la Iglesia (orientación SE)

Debido a que esta zona del ábside ha estado protegida por un andamio cerrado, de forma permanente desde el año 1989 hasta el 2001, sólo ha sido posible muestrear muy puntualmente esta parte de la construcción, justo en la esquina SW donde el muro aparece al descubierto. Se han extraído dos calcarenitas muy degradadas, próximas a la arenización (SJC1 y SJC1a), y un mortero original de unión (SJM80). Por otra parte, se han obtenido restos de material calcáreo desprendidos de las zonas elevadas del ábside y que se encontraban en el espacio existente entre el andamio y esta fachada SE (SJA1 a SJA8).

Zona NW del cimborrio

- Tres calcarenitas en buen estado de conservación (SJC14 a SJC16).

Zona E del cimborrio

- Tres calcarenitas con evidencias externas de alteración (SJC3 a SJC5).
- Un mortero de unión original degradado entre sillares de calcarenita (SJM16).

Primera cornisa de la fachada SE

- Ocho calcarenitas cuya superficie aparece ennegrecida (SJC6 a SJC9; SJC11 a SJC13 y SJC17)
- Once morteros: siete de unión originales (SJM9 a SJM15), y cuatro enlucidos que los recubren, de modo que el efecto es que enmarcan los bloques de calcarenita (SJM1 a SJM3 y SJM8).

Zona SW del cimborrio

- Dos calcarenitas, con la superficie ennegrecida (SJC2 y SJC14).

7.2 INTERIOR DE LA IGLESIA DE SAN JERÓNIMO

La cantidad y tipo de materiales muestreados en el interior del Templo es mayor que el de los paramentos externos, ya que se han extraído muestras de los diversos materiales afectados por el desarrollo de formaciones salinas, así como de estas últimas. Igualmente el número de muestras se ha elevado al muestrearse los soportes en estado óptimo de conservación y los alterados. Pero además, la lista se incrementa al variar la naturaleza de los morteros de revestimiento de unas dependencias a otras, incluso en pequeños espacios, debido a que las reposiciones e intervenciones a lo largo del tiempo han sido numerosas.

Otro aspecto que se ha tenido muy en cuenta durante el muestreo, ha sido extraer en un punto concreto muestras del material constructivo u ornamental y de los productos de alteración y/o sales que se desarrollan debajo de su superficie, encima de ella o en su propio seno. El objetivo es determinar si existe una relación en cuanto a composición entre los diferentes materiales involucrados en el proceso de deterioro y, caso afirmativo, establecer las relaciones químicas que provocan la alteración, o si la naturaleza de las sales es independiente del sustrato donde aparecen.

7.2.1 Habitación lateral E del Altar Mayor

Sólo se ha extraído una muestra de calcarenita muy alterada (SJC27), ya que las paredes, a la altura a la que se han podido muestrear, aparecen en su mayoría cubiertas por revocos (estucos y enlucidos), y a veces por pintura mural. La calcarenita se ha tomado de la entrada a la habitación a una altura de 1.5 m. Tanto en esta habitación como en la siguiente que se describirá, se ha comprobado que la calcarenita presenta una ligera tonalidad rojiza en su superficie, cuyo motivo se desconoce, y además una serie de incisiones intencionadas practicadas para favorecer la adhesión de los morteros de revestimiento.

Se han muestreado 15 morteros. Cuatro de ellos son de unión, que corresponden a SJM64 tomado de entre las baldosas del suelo, SJM62 y SJM63 entre sillares de calcarenita, y SJM68 entre las losas de mármol que hay bajo la escalinata de subida al altar ; los 11 restantes son morteros de revestimiento. Se ha comprobado que tales morteros de revestimiento (revocos y enlucidos) se superponen unos a otros, lo que imposibilita el fácil acceso al material pétreo que conforma el muro. El resultado es un parcheado general de las paredes, muy poco vistoso desde un punto de vista estético, excepto en el muro con orientación W donde aparecen los sillares de calcarenita a simple vista. En la pared S se ha identificado un revoco gris oscuro hasta una altura de 3-4 m aplicado en dos capas. La capa superficial tiene un acabado más fino, pero no puede considerarse un enlucido. Han sido 3 las muestras extraídas de este revoco (SJM36, SJM65 y SJM66), también identificado en determinados lugares de la pared E, de la que se ha cogido 1 muestra (SJM18). En la pared E se han identificado otros 3 revestimientos distintos. Desde la zona más interna del muro hacia el exterior son: un revoco de color terroso rojizo con textura grosera, distinguiéndose *de visu* los áridos (SJM17, SJM20, SJM38, y SJM67), y dos enlucidos, uno blanco (SJM37) y encima otro gris claro (SJM39). Ambos presentan un acabado fino y cuidado.

Se han tomado 26 muestras de sales a distintas alturas, desde el nivel del suelo hasta una altura de 2 m, y ubicadas encima, debajo o entre los distintos tipos de revocos, por lo que corresponden a eflorescencias y/o subeflorescencias. Las sales situadas entre las baldosas del suelo presentan un aspecto de eflorescencias pulverulentas muy cristalinas (SJS11, SJS12, SJS31, SJS66, SJS113). En la pared S se han identificado subeflorescencias, pero debido a las fuertes presiones de cristalización que ejercen sobre el revoco, han provocado su desprendimiento generalizado. Las sales aparecen en superficie como costras duras opacas de hasta 2-3 cm de espesor (SJS7, SJS73, SJS114 y SJS115). En la pared E se han extraído muestras de sales emplazadas debajo y encima de los distintos revocos anteriormente mencionados. Se presentan como costras cristalinas de escaso grosor o subeflorescencias (SJS10, SJS30, SJS67, SJS70 a SJS72).

En el estrecho acceso a la habitación E y bajo la balaustrada del altar se han muestreado 9 sales: siete tapizan los motivos y paredes policromadas, siendo su aspecto el de eflorescencias pulverulentas traslúcidas (SJS62 a SJS65, SJS86, SJS116, SJS117). Las dos restantes también son eflorescencias pulverulentas (SJS60 y SJS61) y se han extraído de las juntas de las losas de mármol que hay bajo la escalinata de subida al ábside. Se han localizado otros focos puntuales de desarrollo de sales en la primera capilla del ala E de La Iglesia, de donde se han muestreado 3 eflorescencias pulverulentas (SJS57, SJS58 y SJS90).

Los paramentos de la sala E aparecen desnudos de decoración pictórica, detectándose policromía únicamente en el acceso a la habitación. Se han extraído de aquí dos muestras para su posterior estudio en forma de estratigrafías pictóricas (SJEP-23 y SJEP-24).

7.2.2 Habitación lateral W del Altar Mayor

Como en el caso anterior, debido a que las paredes están cubiertas por revocos y en esta habitación además por pintura mural, ha sido difícil acceder a aquellos lugares en que la calcarenita del muro aparece al descubierto. El único lugar accesible es la zona de entrada a la sala, de donde se ha extraído a 1.5 m de altura una muestra de calcarenita muy alterada (SJC25), con desarrollo de sales en su seno.

Los morteros muestreados suman un total de 16. Cinco de ellos son de unión, de los que SJM53 corresponde a un mortero gris no original empleado para fijar un clavo a la pared S, SJM34 y SJM61 son morteros originales de textura fina y color beige, situados entre sillares de calcarenita en el acceso a la habitación, y SJM71 es otro mortero de unión original de las losas de mármol que hay bajo la escalinata de subida al altar. Por último, SJM72 es un revestimiento gris que sella al anterior mortero, y corresponde con toda probabilidad a una época distinta de ejecución. Respecto a los morteros de revestimiento, se pueden diferenciar entre revocos de unos 3-4 mm de grosor, y sus correspondientes enlucidos de menos de 1 mm de espesor. Por el aspecto externo, al menos dos de los revestimientos (que incluyen revoco y enlucido) corresponden a intervenciones distintas, por lo que se han distinguido:

- Un primer grupo de revocos en el que se incluyen los morteros originales sustrato de la pintura mural que aún se conserva en los medallones decorativos de la entrada a la habitación W, bajo la balaustrada, y en la escalinata de subida al altar. En este caso el revoco es de color beige, con textura fina y espesor máximo de 8 mm (SJM27B, SJM28B, SJM33B, SJM35), cubierto a su vez por un enlucido grisáceo de varios cientos de micras (SJM27G, SJM28G, SJM33A) sobre el que se aplicó la policromía.
- En el segundo grupo se engloban los revocos de color gris oscuro (SJM31) con enlucido también gris pero de tonalidad clara y textura más fina (SJM26, SJM29, SJM30 y SJM32), que cubren la pintura mural de las paredes con orientación E y S. Sin duda se tratan de morteros de revestimiento no original, posterior a la ejecución de la policromía ocultándola. Se deben haber aplicado con el único fin de contener el avanzado proceso de desarrollo de sales que se produce en esta habitación W.

Se han muestreado 15 sales, de las que 3 corresponden a subeflorescencias pulverulentas de la entrada de la habitación situadas a una altura no superior a 1.5 m. SJS15 se ha extraído de un mortero de unión de bloques de calcarenita que aparecen al descubierto tras desprenderse la policromía que los cubría. SJS13 y SJS108 aparecen debajo del revoco de un medallón policromado. El resto de las sales corresponden a eflorescencias que tapizan el revoco gris oscuro tan extendido en toda la estancia. Se han muestreado a distintas alturas observándose en general que las sales que aparecen en las zonas más bajas, entre 0 y 20 cm, son en general pulverulentas y se desprenden del sustrato con facilidad (SJS16, SJS33, SJS87, SJS106, SJS107, SJS32, SJS14, SJS84). Las situadas por encima de 1m consisten en finas costras cristalinas muy adheridas al revoco, que incluso permanecen tras raspar con un cepillo (SJS82, SJS83, SJS104).

Los muros de esta habitación W (que tiene acceso a clausura) están cubiertos con pinturas murales que casi han desaparecido en las paredes con orientación E y S, debido al intenso desarrollo de sales. Las sales alcanzan una altura superior a 2.5 m. Las pinturas se cubrieron con revocos y enlucidos para paliar el efecto destructivo de las sales. Lejos de resolver el problema, el efecto estético es aún más deplorable. En las otras paredes y en las zonas elevadas se conserva bastante bien la pintura, ejecutada con vivos colores. Se han extraído 3 muestras pictóricas (estratigrafías pictóricas) que son SJEP-27 (pared NW), SJEP-30 (pared E) y SJEP-32 (pared W).

7.2.3 Zona E del Altar Mayor

El zócalo del altar hasta una altura de 1 m (encima aparecen los bajorrelieves del retablo) está cubierto por revocos de distinta naturaleza dispuestos sin orden alguno. Este hecho sugiere que fueron aplicados en distintas intervenciones, con objeto de ocultar las humedades del muro. Lejos de resolver esta patología, han potenciado aún más el desarrollo de eflorescencias. En la parte E del altar, tras el desprendimiento de alguno de estos revocos, aparecen al descubierto los sillares de calcarenita del paramento interno del ábside y algunos restos de ladrillos. En esta zona se ha muestreado una calcarenita (SJC39), el producto de su pulverización (SJC33), y un ladrillo de color rojo (SJL6). Se han extraído 7 morteros. Dos originales de unión entre sillares de calcarenita que corresponden a SJM21 y SJM60, este último situado junto a la calcarenita SJC23. Respecto a los morteros de revestimiento, se tratan siempre de revocos de textura grosera, distinguiéndose varios tipos:

- un revoco de color beige, deleznable al simple tacto debido a su avanzado estado de alteración, pero sin desarrollo de eflorescencias en su superficie (SJM47);
- un revoco de color ocre rojizo (SJM59) que sella una grieta de SJM47, y sin sales visibles;
- un revoco de color gris oscuro (SJM48 y SJM73) aplicado directamente sobre los sillares de calcarenita, y con subeflorescencias y eflorescencias. Sobre él aparece otro revoco gris de similar aspecto pero menor grosor (SJM49), e igualmente con eflorescencias y subeflorescencias.

Las sales muestreadas se han cogido de calcarenitas y los distintos revocos anteriormente mencionados, a diferentes alturas que nunca superan 1 m. Dependiendo de la naturaleza del sustrato y del nivel de extracción, el aspecto y dureza de las eflorescencias varía, presentándose las subeflorescencias siempre pulverulentas. SJS118 corresponde a un costra salina delgada, dura, pero frágil, desarrollada sobre una calcarenita y SJS75 es idéntica pero tapiza un ladrillo; SJS74 y SJS76 son eflorescencias tomadas del revoco gris SJM49; SJS19 y SJS111 corresponden a costras endurecidas difíciles de desprender del sustrato. Las sales muestreadas a mayor altura (SJS112) son pulverulentas y por tanto fáciles de desprender con un cepillo suave.

7.2.4 Zona W del Altar Mayor

Han sido 6 los morteros muestreados. De ellos sólo uno es de unión (SJM50) de calcarenitas no alteradas. Los morteros de revestimiento presentan un aspecto más variado, identificándose revocos y finos enlucidos. Hay un revoco de color gris con eflorescencias (SJM74 y SJM75) similar al revoco gris muestreado en la zona E del altar, y otro revoco de color beige marrón (SJM51) que puede correlacionarse con el beige de la parte E, sin sales. Las calcarenitas próximas a la balaustrada que bordea esta zona del altar mayor aparecen cubiertas por una película delgada o enlucido de color beige crema (SJM76 y SJM77). El número de sales extraídas se eleva a 11: SJS17, SJS81 y SJS89 se han cogido del mortero de unión entre sillares de calcarenita, y SJS77 en la unión entre dos morteros en un altar de piedra caliza roja; SJS18, SJS80, SJS88 y SJS109 se extrajeron de bloques de calcarenita. Sobre el revoco gris se han cogido SJS78 y SJS79. Las sales muestreadas en esta parte W del altar son siempre eflorescencias pulverulentas, a diferencia de la zona E del altar.

En la parte alta del ábside se han muestreado dos zonas muy concretas donde se produce el desarrollo masivo de sales. Ambas zonas se localizan en los bajos de las esculturas situadas en el pequeño corredor con barandilla que bordea la parte superior del retablo mayor. Las formaciones salinas aparecen en seis esculturas, tres situadas a la izquierda del retablo mirando de frente, y otras tres localizadas a su derecha. Para evitar equívocos se ha optado por denominar a cada escultura con un número romano, comenzando por la figura situadas más al E, de modo que las esculturas I, II, y III se localizan en la parte E del retablo, y las IV, V, y VI en la zona W del retablo.

7.2.5 Zona E de la parte superior del ábside

Se han muestreado 4 calcarenitas: SJC31 es una calcarenita sin alterar de un sillar bajo la escultura I; SJC32 se ha extraído del festón decorativo debajo de la escultura I, y está cubierta por una capa amarillenta a modo de enlucido fino; SJC30 y SJCS5 corresponden a trozos de calcarenita alterada extraídas de los pies de la escultura I.

Los morteros muestreados son 6: SJM44 es un mortero original de unión alterado situado entre sillares de calcarenita, y SJM45 es un revoco del anterior, ambos extraídos de debajo de la escultura II. SJM58 pertenece a un trozo de mortero desprendido. La muestra SJM82 es un revoco color ocre oscuro del fondo de la hornacina de la escultura I. SJM83 es un revestimiento beige cogido de los sillares de calcarenita situados debajo de la escultura II. SJM84 es un enlucido del muro de separación entre las hornacinas de las esculturas II y III.

Las sales muestreadas ascienden a un total de 22, tratándose en todos los casos de subeflorescencias pulverulentas de baja cristalinidad (SJS5, SJS6, SJS9, SJS36 a SJS51, SJS53, SJS100 y SJS103). Se han extraído a diferentes alturas (0,5-2 m respecto al nivel del suelo) del corredor de los sillares que conforman el zócalo o base de las esculturas policromadas, de las propias esculturas y de las paredes de las hornacinas donde se ubican éstas.

Respecto a la policromía de las esculturas, se han extraído 5 muestras para su posterior estudio estratigráfico: de los pies de la escultura I (SJEP17), de la pared de su hornacina (SJEP16), de los faldones de la escultura II (SJEP14 y SJEP15), y del manto de la escultura III (SJEP13).





Figura 7.1 (página anterior y actual). Zonas muestreadas en la Iglesia de San Jerónimo. Página anterior, de arriba a abajo. A) Zona superior del ábside. Las muestras se han tomado de las esculturas policromadas localizadas a lo largo del corredor que bordea la parte superior del ábside. B) Vista general del Retablo Mayor. C) Altar mayor. Las muestras se han extraído del zócalo que sostiene al retablo. Página actual, de arriba a abajo. D) y E) Detalles de la zona superior del ábside (zonas E y W, respectivamente) que ilustran las esculturas muestreadas. Nótese el desarrollo de eflorescencias y la pérdida del relieve. F) Habitación lateral del ábside (zona W). Las muestras se han tomado desde el zócalo (donde las sales son abundantes) hasta una altura de 2 m.

7.2.6 Zona W de la parte superior del ábside

Se han muestreado 7 calcarenitas. Cuatro de ellas corresponden a trozos desprendidos con sales en su seno (SJC28, SJC29, SJC34, SJC35). SJCS1 se ha extraído de la pared del fondo de la hornacina de la escultura VI, SJCS2 de los sillares que hay debajo de esta misma escultura, y SJC37 de la hornacina de la escultura IV. En ambos casos las calcarenitas presentan evidencias de deterioro y formación de sales en su interior.

Los morteros estudiados han sido 6: SJM81 y SJM46 corresponden respectivamente a revocos de color ocre oscuro y claro de la pared de la hornacina de la escultura IV. Las muestras SJM55 a SJM57 pertenecen a trozos de revocos desprendidos. SJM41 es un mortero moderno sin alterar extraído cerca de la escultura VI. SJM42 es un revestimiento de un sillar de calcarenita. Se han muestreado otros dos revocos no alterados de la parte central del retablo, donde no existen fenómenos de degradación de los materiales constructivos y ornamentales. SJM43 corresponde a un mortero de unión de sillares de calcarenita, y SJM54 es un revoco de color beige.

El número de sales muestreadas se eleva a un total de 19. Son eflorescencias y/o subeflorescencias pulverulentas de aspecto poco cristalino. Las sales SJS24 a SJS28 se han extraído de los sillares del zócalo de las esculturas, y las muestras SJS20, SJS22, SJS23, SJS29, SJS101 y SJS102 de las paredes de las hornacinas donde se ubican las esculturas. SJS21 es de un pie de la escultura VI y SJS35 y SJS34 se han cogido de los faldones de las esculturas IV y V respectivamente.

Se han estudiado 10 muestras de policromía, de las que 5 proceden de los muros de las hornacinas (SJEP1, SJEP2, SJEP5, SJEP8 y SJEP9), y 3 se han extraído de las esculturas; SJEP7 (faldón escultura V), SJEP6 (pie izquierdo de la misma figura), SJEP3 (vestidura escultura VI. SJEP11 se ha cogido de un festón decorativo debajo de la escultura IV, y SJEP10 de un sillar debajo de la misma figura.

7.3 HOSPITAL DE SAN JUAN DE DIOS

Las pinturas murales al *fresco* del patio principal fueron restauradas a finales del siglo XX, por lo que no son visibles signos de deterioro. En el zócalo de azulejos valencianos se ha detectado de forma puntual el desarrollo de eflorescencias, cuya caracterización así como la del sustrato donde se desarrollan ha sido estudiado por Sánchez Navas, et al., (1992).

El desarrollo de sales en los muros es más llamativo en el segundo patio y en los corredores de acceso desde el primero. Existen evidencias de la elevada humedad que durante tiempo prolongado ha debido afectar a las paredes, pues éstas, exentas de pinturas murales, aparecen parcheadas hasta una altura de unos 3 m por revocos de distinta naturaleza, superpuestos la mayoría de las veces, y en bastante mal estado de conservación. Las sales que aparecen como subeflorescencias (JDE1, JDE2) originan los mayores deterioros, pues la presión de cristalización que ejercen ha provocado el desprendimiento de los morteros de revestimiento. En otras ocasiones aparecen halos de eflorescencias de espesor muy fino (JDE3 a JDE5).

7.4 IGLESIA DEL PERPETUO SOCORRO

Se ha detectado desarrollo de sales en las zonas bajas del interior de la Iglesia sobre sillares de biocalcarenita, constatándose que la mayoría de ellos están restaurados e incluso reemplazados. Algunos bloques están cubiertos por un revoco que imita el aspecto de la calcarenita; en este caso las sales aparecen como subeflorescencias pulverulentas (PSE2, PSE3, PSE5 y PSE6). En calcarenitas originales y también en sillares nuevos se desarrollan eflorescencias pulverulentas (PSE4, PSE8 a PSE11). Excepcionalmente la sal presenta una consistencia dura y aspecto opaco poco cristalino (PSE1 y PSE7).

8 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados relativos a los estudios mineralógicos, químicos, texturales y estructurales de los materiales muestreados, estructurados según el siguiente esquema:

- En primer lugar se presentan los resultados de los materiales pétreos constructivos más representativos de la Iglesia de San Jerónimo, es decir, las calcarenitas y los travertinos. Los datos son más numerosos en las primeras por los diversos motivos que a lo largo de este Trabajo ya se han mencionado.
- A continuación aparecen los resultados de los morteros de fábrica o de unión, y los morteros de revestimiento o revocos (estucos y enlucidos).
- Seguidamente se presentan los resultados de las estratigrafías pictóricas de las esculturas policromadas y las pinturas murales de la Iglesia de San Jerónimo.
- Por último se hace mención a las formaciones salinas. Estas se han muestreado, además de en la Iglesia de San Jerónimo, en dos edificios históricos próximos. Con ello se pretende verificar si el fenómeno de desarrollo de sales es exclusivo o no de dicho Templo. Se presentan en primer lugar los resultados de las sales en la Iglesia de San Jerónimo, y a continuación los del Hospital de San Juan de Dios y los de la Iglesia del Perpetuo Socorro.

8.1 CALCARENITAS Y TRAVERTINOS

8.1.1 Análisis mineralógico y textural

En las Tablas 8.1 y 8.2 se presentan los resultados del análisis mineralógico semi-cuantitativo por XRD de las calcarenitas y travertinos de la Iglesia de San Jerónimo de Granada. Por lo que respecta a los travertinos, son la variedad pétreo menos alterada del monumento; de hecho, no presentan apenas evidencias de deterioro, por lo que son escasos los datos que se presentan de los mismos. En cuanto a las calcarenitas, se comprueba que los materiales alterados de la Iglesia presentan una mineralogía parecida a los materiales de cantera (ver Tabla 5.3). Una observación más detallada permite establecer diferencias entre la composición de las calcarenitas del exterior del Templo y las del interior. En ambos casos las calcarenitas contienen yeso en proporciones variables, siendo la mineralogía más uniforme en las calcarenitas del interior de la Iglesia. Es de destacar la elevada proporción de yeso (28%) de la muestra SJC32. Ello se debe a su avanzado estado de alteración, aunque no se descarta una posible contaminación de yeso procedente de la aplicación sobre la calcarenita de una lechada de dicho material.

Tabla 8.1. Composición mineralógica (en %) de la muestra total de las calcarenitas y travertinos del exterior de la Iglesia de San Jerónimo.

#	Cal	Dol	Qtz	Fds	Fil	Gp
SJC1	93	-	7	-	-	-
SJC1a	97	-	<5	-	-	-
SJC2	97	-	<5	-	-	-
SJC3	97	-	<5	-	-	<5
SJC4	99	-	<5	-	-	-
SJC5	99	-	<5	-	-	-
SJC6	98	-	<5	-	-	-
SJC7	96	-	<5	-	-	-
SJC8	97	-	<5	-	-	<5
SJC9	84	7	<5	<5	<5	<5
SJC11	68	8	15	-	-	10
SJC12	97	-	<5	-	-	<5
SJC13	88	-	<5	T	-	12
SJC14	97	-	<5	-	-	<5
SJC15	98	<5	<5	-	-	<5
SJC16	97	-	<5	-	-	-
SJC17	100	-	-	-	-	-
SJC18	99	-	<5	-	-	-
SJC19	99	-	<5	-	-	<5
SJC21	92	7	<5	-	-	-
SJC22	51	11	29	7	<5	<5
SJC23	100	-	-	-	-	-
SJC28	55	7	9	<5	25	<5
SJC40	48	14	28	<5	8	-
SJA1	96	-	<5	-	-	-
SJA3	99	-	<5	-	-	-
SJA4	99	-	<5	-	-	-
SJA6	100	-	-	-	-	-
SJA7	99	-	<5	-	-	-
SJA8	99	-	<5	-	-	-
SJT1	98	<5	<5	-	-	-
SJT2	84	<5	14	-	-	-
SJT3	100	T	-	-	-	-

En el exterior del edificio, las muestras de calcarenita que presentan su superficie externa ennegrecida tienen una composición mineralógica más compleja. Además de calcita, se han identificado dolomita (que en ningún caso aparece en el interior de la Iglesia), feldespatos y filosilicatos, además del yeso ya mencionado.

Tabla 8.2. Composición mineralógica (en %) de la muestra total de las calcarenitas del interior de la Iglesia de San Jerónimo.

#	Cal	Qtz	Fil	Gp	Fds
SJC25	99	-	<5	-	-
SJC27	100	-	-	-	-
SJC28	100	-	-	-	-
SJC29	91	-	-	9	-
SJC30	100	-	T	-	-
SJC31	100	-	-	-	-
SJC32	69	T	-	28	<5
SJC33	99	<5	-	<5	-
SJC34	98	-	-	<5	-
SJC35	100	-	-	-	-
SJC37	100	-	-	-	-
SJC39	99	T	-	-	-
SJCS1	99	-	-	T	-
SJCS2	99	T	-	T	T
SJCS5	100	-	-	-	-
SJCS7	90	<5	-	9	-

T = cantidades traza.

En las calcarenitas, a medida que progresa el estado de alteración se produce sistemáticamente la pérdida del cemento intergranular. En los estados incipientes el cemento de segunda generación se disuelve, y en estados más avanzados llega a perderse el de primera generación. Como consecuencia se origina una elevada porosidad intergranular e intragranular (poros móldicos) que conduce con frecuencia a la descohesión de la calcarenita. En ocasiones se ha detectado una importante precipitación de cemento calcítico secundario en muestras con un estado de alteración muy avanzado del interior del Templo (SJCS5 y SJC30). Se tratan de trozos de calcarenita desprendidos de las esculturas policromadas del retablo, que contienen sales en su seno. Las calcarenitas correspondientes a piezas caídas del ábside exterior del templo no presentan, bajo el microscopio óptico, un grado de alteración muy avanzado (disolución de cemento), el cual cabría esperar dado que se tratan de trozos desprendidos. Pero se ha constatado, tanto en muestra de mano como por observación microscópica, el desarrollo de un importante sistema de fracturas preferentemente subparalelas a la superficie exterior, y que sin duda son las responsables de la rotura del material.

Las calcarenitas de la cantera "La Escribana", en especial los subtipos E-1 y E-2, han sido las más utilizadas con fines constructivos y ornamentales en la Iglesia de San Jerónimo, tanto en el exterior como interior del edificio. El subtipo E-3 se ha identificado en el interior del Templo en los sillares situados bajo la balaustrada que rodea al altar, concretamente en la zona con orientación E (SJC27), y en el exterior, en los sillares de la primera cornisa de la fachada SE (SJC17). La variedad PAR (Parideras) se ha reconocido en un trozo desprendido del ábside exterior (SJA5), por lo que no se ha podido determinar de qué zona procede y si es material constructivo u ornamental.

En la Tabla 8.3 se presentan resumidos los datos sobre calcarenita proporcionados por el estudio óptico-petrográfico. Las muestras se han agrupado según su grado de alteración señalándose el subtipo de calcarenita de cantera corresponden (cuando ha sido posible). Los estadios de alteración

descritos en la Tabla 8.3. se pueden observar en la Figura 8.1. que corresponden a microfotografías de lámina delgada de muestras de calcarenita y travertino extraídas de la Iglesia de San Jerónimo.

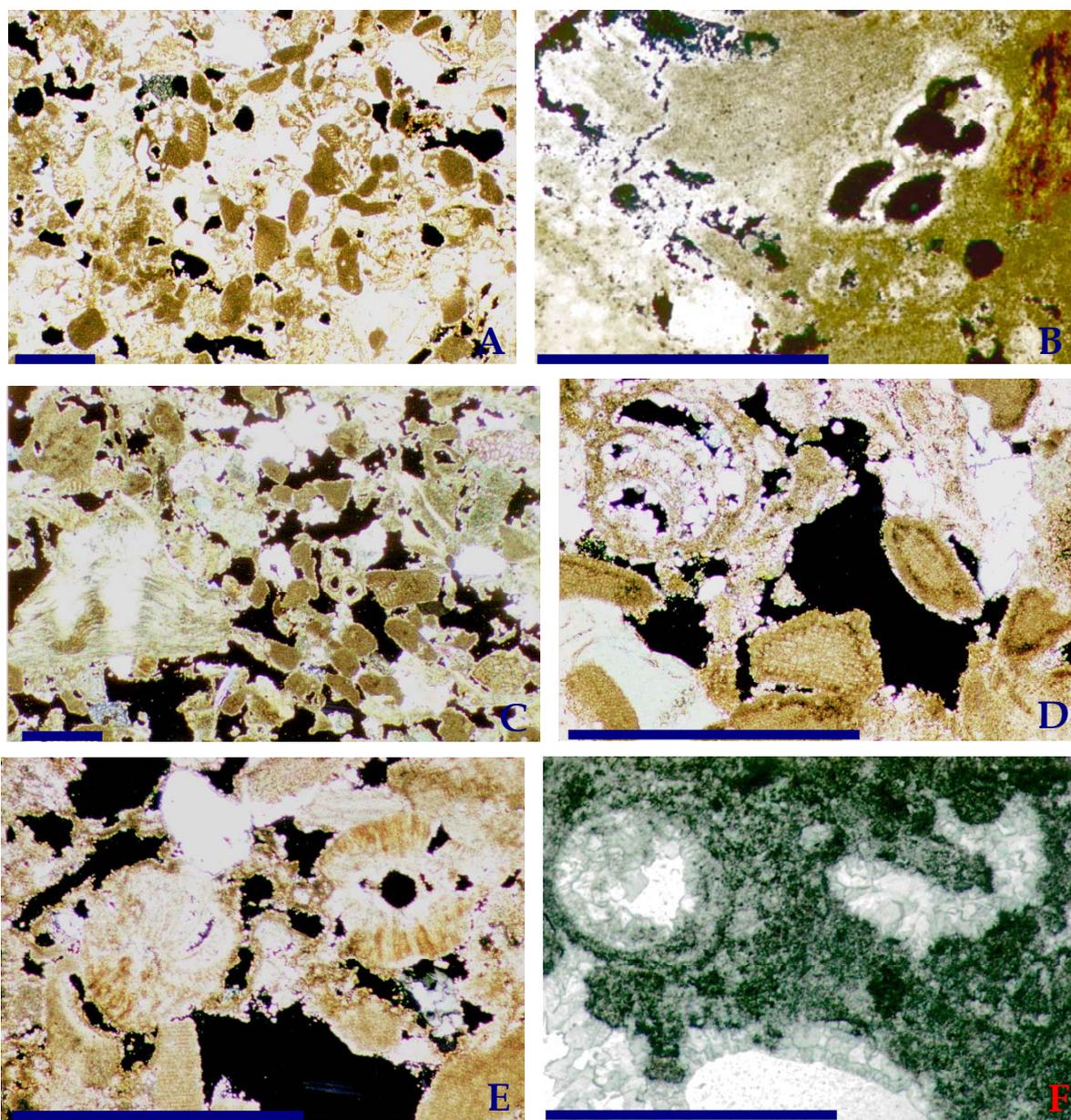


Figura 8.1. Microfotografías realizadas con luz transmitida y polarizadores #. A) Calcarenita de cantera sin alterar. (B) Calcarenita de la zona baja de la fachada SE (SJC18). Bajo grado de alteración. Detalle de serpúlidos. C) Calcarenita del cimborrio (SJC5). Grado medio de deterioro. D) Calcarenita del retablo (SJCS5). Avanzado estado de alteración por disolución del cemento y en cámaras de bivalvos (poros móldicos). Eflorescencias. E) Calcarenita cogida del pie de la escultura I (SJC30). Deterioro muy avanzado. Descohesión granular por disolución del cemento calcítico. F) Travertino de la fachada N (SJT1). Bien conservado. Grandes poros con paredes internas tapizadas con cristales de calcita de precipitación. Barra = 0.5 mm.

Tabla 8.3. Características petrográficas de calcarenitas alteradas de la Iglesia de San Jerónimo.

Alteración	Mineralogía	Textura	Muestra/Tipo				Ubicación
			E-1	E-2	E-3	PAR	
Incipiente	Cal : bioclastos y cemento (1ª y 2ª gen) Xn : Qtz, Fds, Arc.	Ligero aumento porosidad intergranular. Inicio disolución cemento 2ª gen.		SJC18			Zona baja fachada E
Media	Cal : bioclastos y cemento (1ª y 2ª gen). Xn: Qtz, Fds, Arc.	Mayor aumento porosidad intergranular. Disolución cemento 2ª gen. Inicio disolución cemento 1ªgen Desarrollo fracturas.	SJC5	SJC15 SJC16			Cimborrio NW Cimborrio E 1ª cornisa fachada SE
Avanzada	Cal :bioclastos y cemento (1ª gen) Xn: Qtz, Fds, Arc.	Elevado aumento porosidad inter- e intra-granular (poros móldicos) por pérdida cemento y disolución cámaras de bioclastos. Descohesión. Precipitación calcita 2ª. Eflorescencias	SJCS5 SJC30 SJC6 SJC8			SJC27	Escultura I 1ª cornisa fachada SE Habitación E
Muy avanzada	Cal: bioclastos y cemento (1ª gen. o casi ausente)	Clastos muy fracturados. Disminución porosidad por precipitación yeso	SJC29 SJA8 SJA7			SJA5	Sillar retablo W Desprendidas ábside exterior

Cal = calcita; Xn = xenoclastos; Qtz = cuarzo; Fds = feldespatos; Arc = arcillas; gen = generación.

El estudio mediante SEM ha mostrado las formas y materiales de alteración descritos en el apartado de microscopía óptica. En todas las calcarenitas estudiadas se aprecia que los procesos de disolución han afectado al cemento calcítico y a las cámaras de los bioclastos, originando una elevada porosidad de origen secundario. Se puede observar en los cristales de calcita la generación de escalones de disolución y la incipiente creación de microporos (Figura 8.2A.). Con frecuencia los poros aparecen tapizados por calcita de precipitación secundaria (Figura 8.2B.). Además se detecta la existencia de sales de NaCl que rellenan fisuras, o en el peor de los casos las han generado (Figuras 8.2C y 8.2D), identificándose también en el interior de algunos cristales de calcita.

8.1.2 Composición química

Se presentan en este apartado los datos del contenido en elementos químicos mayoritarios, minoritarios y traza de las calcarenitas de la Iglesia de San Jerónimo. Así mismo, se incluyen algunos datos de composición química de calcarenitas procedentes de las canteras históricas (La Escribana y Las Parideras). Estos valores ya se han analizado y presentado en trabajos precedentes (Sebastián Pardo et al., 1992; Rodríguez Navarro, 1994), y se han referenciado en esta Trabajo (Cap. 5.), por tal motivo no se han efectuado análisis químicos adicionales. La disponibilidad de estos datos posibilita la caracterización química de las calcarenitas de cantera, permitiendo establecer correlaciones con los contenidos químicos de muestras del monumento, por lo general alteradas, aunque también las hay inalteradas. De este modo se puede conocer cuáles son los cambios químicos sufridos por las rocas desde su puesta en obra hasta la actualidad.

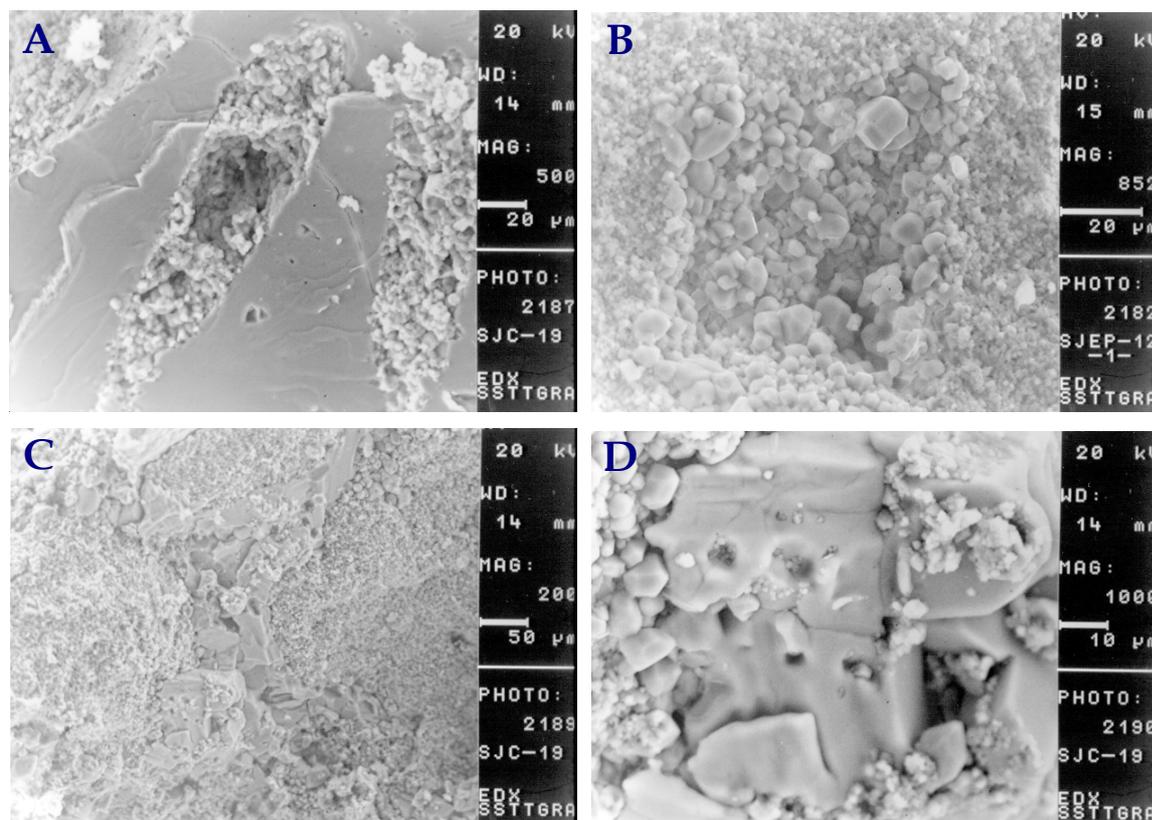


Figura 8.2. Microfotografías realizadas con microscopía electrónica de barrido. A) Cristal de calcita con incipiente creación de microporos y escalones de disolución. B) Agregado de cristales de calcita de precipitación que tapizan la pared interna de un poro. C) Aspecto general de una calcarenita con una fisura sellada por cristales de halita. D) Detalle de un cristal de halita.

En las Tablas 8.4 y 8.5 se presentan los valores de concentración de elementos mayoritarios y minoritarios (expresados en % del óxido del elemento analizado) y de elementos traza (expresados en ppm) de las calcarenitas de cantera, las procedentes del monumento, así como de los travertinos. En primer lugar se advierte que algunos de los análisis no presentan valores "de cierre" próximos a 100%. Ello se debe a que no se ha determinado el contenido en S (% de SO_3), que en muestras con yeso o costra sulfatada puede ser considerable.

Los valores de CaO en muestras del monumento son elevados, variando entre 48.6% y 54.6%, lo cual es lógico ya que se trata de rocas constituidas casi exclusivamente por calcita. Estos valores son ligeramente más bajos que en las muestras inalteradas de cantera. Por contra, los cambios son más acusados en los contenidos en SiO_2 y Al_2O_3 , siendo éstos más elevados en las muestras del monumento, especialmente en aquellas de la zona externa y que presentan un grado de alteración medio-alto. Se trata de muestras en las que *de visu* se aprecia disolución del material carbonatado, lo que conlleva un enriquecimiento en elementos poco móviles tales como Si y Al (SJC1, SJC3, SJC11 y SJC14). La muestra SJC17 constituye una excepción, pues los valores de estos elementos son inferiores a los detectados en cantera. Ello se debe a que se trata de una muestra cogida de una costra incipiente, en la que lo normal es que tales elementos experimenten un descenso en su concentración.

Tabla 8.4. Análisis químico de elementos mayoritarios y minoritarios (en %) de calcarenitas procedentes de la Iglesia de San Jerónimo, de cantera* y travertinos.

#	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	PC	SUM
SJC1	4.01	0.97	52.4	0.79	0.38	0.35	0.52	0.08	40.0	99.3
SJC3	4.51	0.99	48.7	0.55	0.17	0.06	0.65	0.13	37.9	93.8
SJC11	4.57	0.99	49.3	0.61	0.12	0.06	0.65	0.11	35.4	92.0
SJC14	5.22	0.31	48.6	0.61	0.20	0.05	0.64	0.11	36.2	93.2
SJC17	0.31	0.16	52.7	0.50	0.12	0.48	0.77	0.11	45.3	100.1
SJC18	1.12	0.20	53.0	0.42	0.18	1.48	0.20	0.07	44.2	99.5
SJC25	1.03	0.17	53.3	1.03	0.15	0.13	0.11	0.07	43.3	99.3
SJC27	1.04	0.25	53.5	0.94	0.03	0.13	0.25	0.07	44.0	100.2
SJC30	2.95	0.72	50.9	1.28	0.26	0.11	0.56	0.08	39.8	96.8
SJC34	0.44	0.12	54.6	0.22	0.04	0.30	0.22	0.07	44.4	100.2
SJC37	1.08	0.22	54.0	1.08	0.15	0.09	0.14	0.08	42.7	99.6
SJC39	0.17	0.07	54.6	0.32	0.05	0.40	0.15	0.09	44.7	100.2
SJCS2	4.10	1.21	50.9	0.73	0.17	0.32	0.58	0.09	40.3	98.4
SJA4	3.88	0.95	52.6	0.47	0.11	0.06	0.47	0.08	41.6	100.3
SJA5	0.43	0.11	57.0	0.34	0.03	0.13	0.16	0.05	42.1	100.3
SJC5	0.81	0.20	53.9	0.42	0.10	0.16	0.16	0.01	44.5	100.4
SJC2	4.61	0.87	52.3	0.53	0.12	0.12	0.20	0.15	41.5	100.5
SJC7	4.46	0.97	52.0	0.57	0.23	0.11	0.38	0.09	40.5	99.4
SJC4	3.67	0.69	45.7	5.64	0.09	0.16	0.45	0.05	43.5	100.3
ESC15*	1.79	0.35	54.8	0.46	0.06	0.08	0.87	0.07	41.8	99.8
ESC16*	0.46	0.79	54.1	0.99	0.11	0.07	0.38	0.07	40.6	97.7
SJT1	14.0	2.05	43.9	2.15	0.38	0.17	0.86	0.08	39.9	100.2
SJT2	1.93	0.44	51.4	1.16	0.10	0.09	0.21	0.59	28.0	95.9

Los cambios más drásticos se detectan en las concentraciones de Mg. Los valores de Mg en calcarenitas de cantera y del exterior de la Iglesia de San Jerónimo son bastante similares, aunque ligeramente superiores en ésta última. Sin embargo, las concentraciones son más elevadas en el interior del Templo, alcanzando valores entre 1.03% y 1.28% de MgO (SJC25, SJC30 y SJC37). Estas calcarenitas se encuentran afectadas por el desarrollo de sales, que están constituidas por sulfato magnésico (apartado 8.3). Es precisamente la presencia de este tipo de sal soluble en el seno de las calcarenitas la responsable del elevado contenido en MgO. En las calcarenitas muestreadas en la primera cornisa del ábside (SJC3, SJC11, SJC14 y SJC17) el mayor porcentaje de Mg puede deberse a la adhesión de partículas de dolomita, que arrastradas por el viento proceden de los terrenos circundantes. La presencia de un mayor contenido de Mg en la muestra SJC1 (0.79% de MgO) debe relacionarse con su ubicación en el exterior del ábside, que se corresponde en el interior de la Iglesia con la habitación W, afectada de forma masiva por la formación de sales de sulfato magnésico.

Los valores de K₂O y Na₂O son ligeramente superiores en el monumento que en la cantera. Se comprueba que las concentraciones de K y Na son mayores en las calcarenitas que se han muestreado en la zona baja del edificio. Concretamente la muestra SJC1 contiene un 0.38% de K₂O y un 0.35% de Na₂O. Por su parte, la muestra SJC18 cogida de la zona exterior de la Iglesia que se corresponde con la habitación E en el interior contiene 1.48% de Na₂O, que evidencia la existencia de cloruro sódico soluble en su seno. Las concentraciones de Fe₂O₃ son ligeramente superiores en el exterior del edificio respecto a los valores de cantera, y por contra, los valores del interior de la Iglesia son inferiores a los de cantera.

Tabla 8.5. Análisis químico de elementos traza de las calcarenitas de la Iglesia de San Jerónimo, de cantera* y travertinos. Datos en ppm.

#	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Br	Cs	Pb	Sr	Zr	Ba
SJC1	1.33	13	15	3.2	4	185	22.3	4	5.3	46	607	85	<10
SJC3	1.13	9	12	3.5	3	7.3	31.2	4.5	4.2	29	590	81	42
SJC11	1.11	10	13	2.5	2	6.6	17.6	3.8	3.2	27	1220	142	54
SJC14	1.46	14	16	3.8	4	8.4	33.7	3.3	6.1	20	1230	150	40
SJC17	0.28	5	11	2	4	4.0	1.3	4.3	<0.5	<2	444	65	<10
SJC18	0.35	4	8	2.3	1	6.3	1.0	5.9	0.5	4	381	59	<10
SJC25	0.42	4	9.4	1.7	1	11.4	1.8	5.7	0.6	124	468	65	<10
SJC27	0.49	6	13	1.7	<1	6.7	3.9	5.6	0.6	336	500	67	<10
SJC30	0.89	7	11	3	2	4.5	30.5	4.8	1.7	23	1050	124	18
SJC34	0.22	2	8	1.8	<1	1.5	<0.5	3	<0.5	<2	291	49	<10
SJC37	0.48	4	7.9	2.5	<1	3.9	24.6	4.4	0.6	35	522	68	<10
SJC39	0.18	2	7.9	1.8	2	2.1	<0.05	4.3	<0.5	2	316	52	<10
SJCS2	1.39	18	17	3.1	8	8.0	6.0	4.9	6.3	16	1370	157	27
SJA4	1.21	10	18	3.1	3	7.4	45.3	3.5	5	32	545	77	<10
SJA5	0.23	2	9.4	1.5	1	2.8	<0.5	4	<0.5	<2	317	50	<10
SJC5	0.20	10	4	2	4	3.5	8.8	3	<1	<2	312	<10	17
SJC2	1.10	18	13	3	6	5.2	32.2	2	3	<2	438	<10	28
SJC7	1.10	20	13	3	7	6.9	36.3	2	3	<2	495	<10	17
SJC4	0.60	19	11	3	5	4.0	14.1	4	<1	<2	406	<10	<10
ESC15*	0.60	12	10	3	7	3.4	60.6	3	1	<2	457	<10	32
ESC16*	1.00	23	11	3	8	4.3	46.0	2	3	<2	452	<10	36
SJT1	1.90	27	12	4	7	6.4	30.2	11	1	12	317	27	69
SJT2	0.40	10	4	3	5	8.5	49.0	14	<1	78	343	<10	43

Respecto a las variaciones que experimentan las concentraciones de elementos traza en las calcarenitas del monumento respecto a las de cantera, llama la atención que elementos de transición tales como V, Ni, Cr, Co, Cu y Zn no se enriquezcan en las muestras del edificio, con algunas excepciones. Este aumento sería de esperar por causa de la contaminación atmosférica, pero paradójicamente incluso las proporciones de Ni son menores en las calcarenitas de la Iglesia. No así las cantidades de Zr que aumentan de forma moderada tanto en el exterior como interior del Templo, con valores que alcanzan hasta 157 ppm (SJCS2). El comportamiento del Pb es más razonable. Las concentraciones más bajas se han analizado en las calcarenitas de cantera, siendo las proporciones en el exterior del edificio relativamente bajas, comprendidas entre menos de 2 ppm y 46 ppm. En el interior de la Iglesia las concentraciones son puntualmente más elevadas, por ejemplo se han analizado 124 ppm en la muestra SJC25 y 336 ppm en SJC27, que se podría justificar (como se expondrá en el Cap. 9) por la contaminación de pigmentos inorgánicos elaborados con tal elemento.

En general, las muestras del edificio no presentan grandes variaciones en el contenido en Sr respecto al detectado en las calcarenitas de cantera. No así, dos muestras del exterior de la Iglesia (SJC11 y SJC14) contienen de 1220 ppm a 1230 ppm de Sr y en otras dos del interior (SJC30 y SJCS2) se han analizado 1050 ppm y 1370 ppm. Existen diversos trabajos que han tratado acerca de la distribución de este elemento (Harris & Matthews, 1968; Kinsman, 1969; Holland et al., 1984), sugiriendo que los valores habituales de concentración de Sr en sedimentos y rocas carbonatadas oscilan entre 200 ppm y 700 ppm. En las calcarenitas de la Catedral de Granada se ha constatado un incremento en la concentración de Sr conforme aumenta el grado de alteración de la calcarenita (Rodríguez Navarro, 1994), fenómeno que no se confirma en las calcarenitas de la Iglesia de San Jerónimo.

8.1.3 Análisis del sistema poroso

Mediante porosimetría de inyección de mercurio se han ensayado un total de 13 muestras, 11 del monumento y 2 de cantera; SJC40 se ha cogido del exterior del edificio, SJC31 corresponde a una calcarenita del interior de la Iglesia sin evidencias externas de alteración, y las 9 restantes, también del interior, se encuentran afectadas por cristalización de sales en diverso grado (SJC25, SJC28, SJC29, SJC30, SJC30s, SJC37, SJCS1, SJCS2 y SJCS5). Finalmente 2 calcarenitas son de cantera (ESC1 y ESC2) del tipo E-1. El objetivo propuesto con la aplicación de esta técnica de análisis porosimétrico es tipificar las calcarenitas ensayadas desde el punto de vista de su grado de conservación. Es bastante arriesgado obtener otro tipo de conclusión debido a varios hechos:

- la heterogeneidad textural intrínseca del material,
- se desconoce el subtipo de calcarenita a que corresponden las muestras ensayadas,
- el ensayo se ha efectuado en calcarenitas afectadas por sales que ejercen sobre ellas diferente acción, disruptiva o cementante (Rossi-Manaresi & Tucci, 1990), con el consiguiente aumento o disminución del tamaño de los poros, y por último,
- se desconoce el tiempo de actuación de las sales en las calcarenitas.

Los resultados obtenidos con este ensayo se presentan en la Tabla 8.6 y en la Figura 8.3. Los valores tabulados corresponden a la distribución porcentual de rango de poro, porosidad total de la muestra y área superficial de la misma. Los rangos de poro establecidos han sido 5, comprendidos entre: 100 y 10 μm , 10 y 1 μm , 1 y 0.1 μm , 0.1 y 0.01 μm , y <0.01 μm . Ha de tenerse en cuenta que lo que se determina realmente no es el tamaño del poro, sino el tamaño de la parte más estrecha de los espacios abiertos de los poros; o dicho de otra manera, el radio de los conductos o canales de acceso a los poros más ensanchados. En los gráficos se han proyectado los valores del volumen acumulado de mercurio intruido (% volumen acumulado) y los respectivos valores del volumen relativo de mercurio intruido (% volumen absoluto), éstos últimos representados en forma de histograma. Una correcta lectura de los histogramas debe evitar realizar interpretaciones erróneas de la configuración del sistema poroso, e.g. distribución unimodal o bimodal de tamaño de poro, falsamente inducida debido a la escala logarítmica del eje de abscisas. En cada gráfico también se indica la porosidad total de cada muestra.

Como se comprueba en la Tabla 8.6, la porosidad total de las calcarenitas es bastante dispar. En general es elevada considerándose rocas muy porosas, pero existen valores extremos excepcionalmente altos de hasta 45.07%, y otros bajos de un 10.44%. La escasa homogeneidad de la cantidad de huecos puede atribuirse a cualquiera de los hechos anteriormente mencionados. No obstante, se han ensayado dos muestras similares, SJC30 y SJC30s, ésta última con desarrollo de sales en su seno. La porosidad total en SJC30s ha disminuido un 8.1% debido al efecto cementante de las sales. La distribución del porcentaje de poros en la muestra SJC30s (con eflorescencias visibles) respecto a SJC30 permite comprobar el aumento del volumen de poros de tamaños cada vez más pequeños, que podría justificarse por el sellado con sales de los huecos más grandes. En las calcarenitas de cantera el mayor volumen de poros se concentra en el rango de radio de poros entre 100 y 10 μm (macroporos). En las calcarenitas del monumento el porcentaje de huecos se distribuye de forma más heterogénea, predominando en unas muestras los macroporos y en otras los microporos.

No obstante el grado de alteración de las calcarenitas del monumento, los resultados indican que algunas muestras poseen una porosidad total inferior a los que, hasta el momento, se han determinado para el material de cantera, hecho que podría resultar contradictorio. A la vista de esta diversidad de valores calculados para el material de cantera (Rodríguez Navarro, 1994; Durán Suárez, 1996), incluidos los obtenidos en esta Memoria, parece necesario asumir la heterogeneidad porosimétrica de este material, y que los valores medios de porosidad total propuestos para sus litotipos sólo tienen una validez relativa.

Tabla 8.6. Distribución porcentual de rango de poro, porosidad total (P.T.) y superficie específica (s.s.) en calcarenitas procedentes de la Iglesia de San Jerónimo y de cantera.

	Rango de radio de poro (μm)					P.T (%)	s.s (m^2/g)
	100-10	10-1	1-0.1	0.1-0.01	<0.01		
<i>San Jerónimo</i>							
SJC25	22	25	40	11	2	10.4	0.93
SJC28	50	29.5	15	5.5	0	17.6	0.61
SJC29	22	30	21.5	25	1.5	25.0	2.58
SJC30	52	22	15	11	0	28.2	0.88
SJC30s	42	32	18	7.5	0.5	23.7	0.65
SJC31	46	29.5	10	13	1.5	23.1	1.02
SJC37	50	26	12	9	3	12.2	1.76
SJC40	50	28.5	13.5	7.5	0.5	45.1	1.18
SJCs1	4	26	61.5	7.5	1	31.5	1.73
SJCs2	11	30	37.5	20.5	1	17.2	1.19
SJCs5	45	24	23.5	7	0.5	27.0	0.85
<i>Canteras</i>							
Esc1	60	16	11	12	1	23.3	0.85
Esc2	51	20	13	16	0	26.2	1.03

En las gráficas de la Figura 8.3 se puede comprobar la variación del volumen de poros respecto al radio de acceso de poro. La presencia de fuertes pendientes en las curvas de % de Hg acumulado informan acerca de la mayor concentración de volumen de huecos en un rango de poros determinado. Se comprueba en todos los casos que existe una distribución unimodal de rango de poro, con máximos en general en el rango 100-10 μm , y sólo en tres muestras en el rango 1-0.1 μm . Parecen lógicas las diferentes configuraciones del sistema poroso resultante para las calcarenitas del monumento, puesto que hay que tener en cuenta su distinto grado y tipo de alteración, así como la dificultad de adscripción cierta a un determinado litotipo en las muy alteradas.

8.2 MORTEROS Y LADRILLOS

Un mortero puede definirse como una mezcla de ligantes inorgánicos (cal, yeso, cemento), áridos finos y agua. En ocasiones puede contener aditivos inorgánicos y orgánicos que mejoran sus propiedades. Todo ello en proporciones tales que la mezcla sea trabajable cuando esté fresca, con propiedades físico mecánicas aceptables y que tenga cierta durabilidad al endurecerse (RILEM, 1982). La función principal del mortero es la de rellenar los huecos que quedan entre los ladrillos o piedras, consiguiendo una buena adherencia o trabazón con dichos elementos, o actuar como capa de revestimiento de los muros, presentando en este caso una doble función: estética y protectora.

Los morteros pueden clasificarse según diversos criterios: de acuerdo con su función, o atendiendo a la naturaleza del ligante o aglomerante (Soriano, 1996). Según sus funciones los morteros pueden ser:

- morteros de fábrica: que se utilizan para unir los diferentes elementos o piezas que forman una fábrica. Estos morteros han de tener buenas características resistentes, de adherencia e impermeabilización;

- morteros de revestimiento: son morteros que protegen la fábrica a la vez que le confieren un mejor acabado. Su composición varía según su uso y que el revestimiento esté en espacios interiores o exteriores, y,
- morteros de decoración: se emplean para acabados de los paramentos con fines ornamentales, y pueden utilizarse en el exterior o interior de los edificios. En general son morteros a base de yeso, pudiendo citarse: escayola, "mármol jaspeado", papier-maché, cartón-piedra, moldes de yeso, esgrafiado...

De acuerdo con la naturaleza del aglomerante, los morteros históricos pueden clasificarse en morteros de barro, de yeso, morteros de cal, morteros bastardos y morteros con aglomerantes orgánicos. La caracterización de morteros antiguos presenta grandes complicaciones debido, fundamentalmente, a problemas de muestreo, utilización de métodos de análisis destructivos, y a la dificultad de aplicar *in situ* métodos no destructivos.

En esta Trabajo se ha realizado una primera clasificación de los morteros muestreados en la Iglesia de San Jerónimo atendiendo a su función, por lo que se ha distinguido entre morteros de unión, que corresponden a los morteros de fábrica, y los morteros de revestimiento, incluyendo en estos últimos los morteros de decoración. Cada uno de estos morteros tiene una composición diferente dependiendo de su uso concreto y diferente ubicación en la Iglesia, por lo que en segundo lugar se han clasificado de acuerdo con la naturaleza de su ligante o aglomerante.

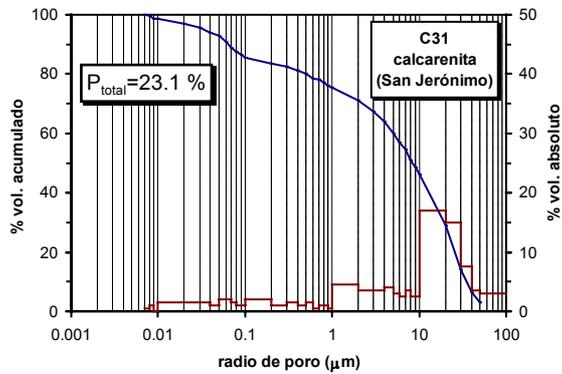
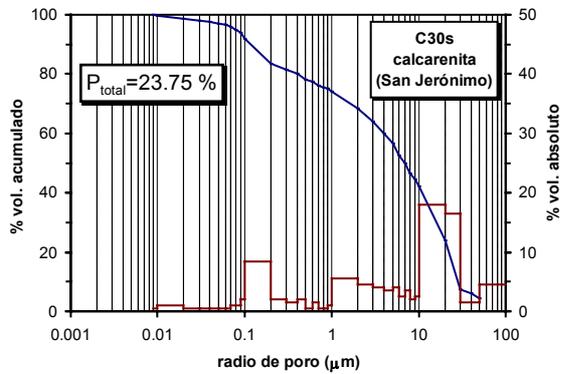
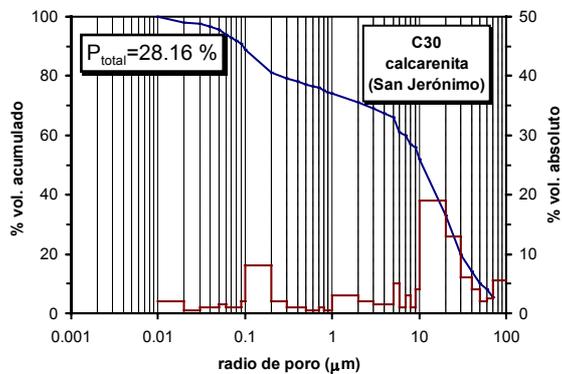
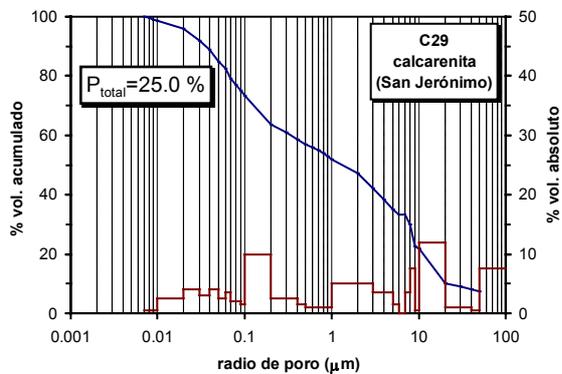
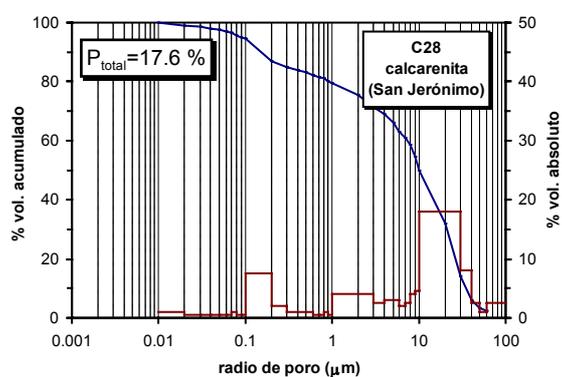
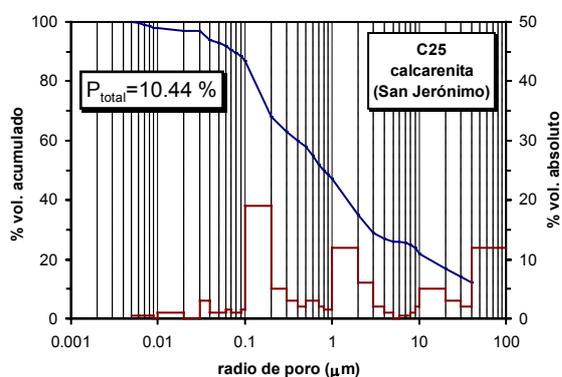
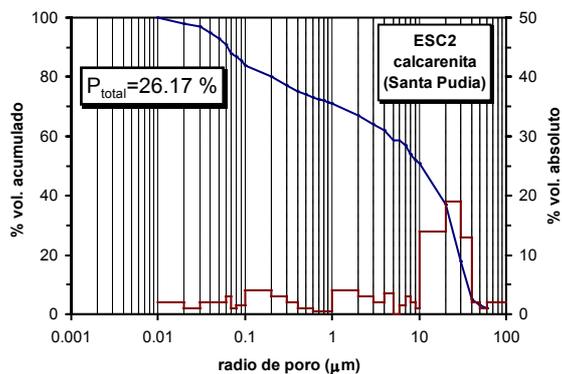
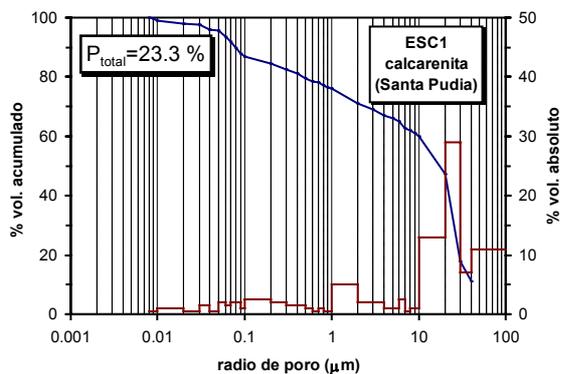
En relación a los morteros de revestimiento, suele existir en el campo de la restauración y la arquitectura moderna cierta confusión en la nomenclatura utilizada (Ashurst & Ashurst, 1988; Furlan, 1990). Ello es consecuencia de la sorprendente evolución que en este siglo, y especialmente en los últimos treinta años, han experimentado las técnicas de fabricación de morteros como acabados de fachadas. Así, es frecuente encontrar términos como enlucido, revoco, estuco, escayola, etc. En esta Memoria los revestimientos de mayor espesor, textura grosera, por lo general de color gris oscuro y cuya función principal es de protección del muro, se han llamado revocos. Los morteros de menor grosor que aparecen sobre los anteriores y con textura más fina, se han denominado enlucidos. Los enlucidos tienen una clara función estética y presentan distintos colores: gris claro y oscuro, beige, marrón, rojizos, etc.

8.2.1 Análisis mineralógico y textural

En general, la composición mineralógica de los morteros antiguos es bastante sencilla y similar a la de las rocas detríticas naturales. Mediante difracción de rayos-X, microscopía óptico-petrográfica y microscopía electrónica de barrido se pueden identificar las fases minerales presentes en un mortero, tipo de ligante y áridos, relaciones texturales entre ambos, y morfología del sistema poroso. Pero en este tipo de materiales tienen mayor interés las proporciones relativas de los minerales y qué función desempeñan (ligante, árido, mineral de alteración). De modo que únicamente con métodos que permiten la visualización se puede establecer el papel de cada uno de los minerales presentes en la muestra.

Morteros del exterior de la Iglesia y ladrillos

En las Tabla 8.7 se presenta la **composición mineralógica** por XRD semicuantitativa de los morteros de revestimiento y morteros de unión del exterior de la Iglesia de San Jerónimo, y en la Tabla 8.8 la composición de los ladrillos del exterior e interior del edificio. Se ha considerado conveniente incluir el color de la muestra *de visu*, dado que puede guardar alguna relación con la mineralogía.



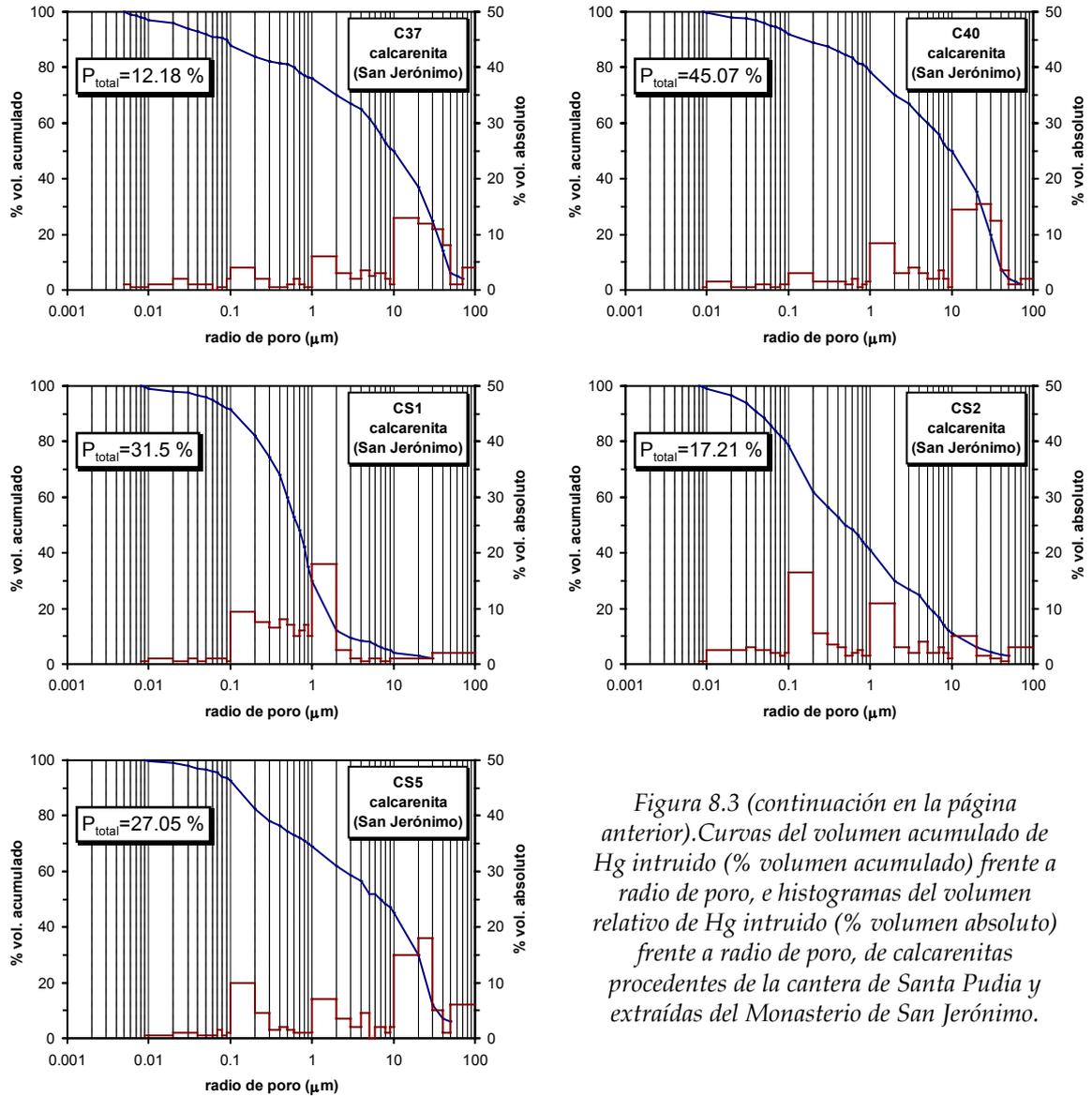


Figura 8.3 (continuación en la página anterior). Curvas del volumen acumulado de Hg intruido (% volumen acumulado) frente a radio de poro, e histogramas del volumen relativo de Hg intruido (% volumen absoluto) frente a radio de poro, de calcarenitas procedentes de la cantera de Santa Pudía y extraídas del Monasterio de San Jerónimo.

- Los morteros de revestimiento del exterior del edificio se han muestreado entre las juntas de los bloques de calcarenita. En concreto, aparecen recubriendo a los morteros de unión o fábrica. No existe homogeneidad en la composición mineralógica de los mismos, aunque es de destacar que todos contienen dolomita en proporciones que oscilan entre un 11% y un 28%, y feldspatos desde cantidades traza hasta un 6%. Por otra parte, se puede establecer una correspondencia entre la mineralogía y el color observado en la muestra de mano. Así, se han identificado morteros de color beige de cal y arena (SJM1, SJM2 y SJM8), donde la cal actúa como ligante. En SJM1 se han detectado indicios de yeso, cuya presencia debe asignarse al estado de deterioro que evidencia la muestra. En el mortero de color rojizo (SJM3) la proporción de filosilicatos es bastante elevada, alcanzando un 24%.

Tabla 8.7. Composición mineralógica (en %) determinada mediante XRD de los morteros del exterior de la Iglesia de San Jerónimo.

	Cal	Dol	Qtz	Fds	Fil	Gp
<i>Morteros de revestimiento</i>						
SJM1 (beige)	83	11	6	T	T	T
SJM2 (beige)	31	28	35	6	T	-
SJM3 (rojizo)	13	26	27	<5	24	-
SJM8 (beige)	54	18	20	<5	6	-
<i>Morteros de unión (gris claro)</i>						
SJM4	54	10	32	<5	<5	-
SJM5	64	23	9	<5	<5	-
SJM6	96	<5	-	-	-	-
SJM7	55	<5	39	<5	<5	-
SJM9	71	20	9	<5	<5	-
SJM10	60	<5	30	<5	<5	-
SJM11	72	7	15	5	<5	-
SJM12	93	<5	6	<5	T	-
SJM13	56	<5	40	<5	T	-
SJM14	65	10	23	<5	T	T
SJM15	68	12	18	<5	T	T
SJM16	70	8	20	<5	T	-
SJM20	25	25	41	<5	T	-
SJM26	80	12	7	<5	-	-
SJM80	55	23	17	5	T	-

T = cantidades traza.

- Los morteros de unión analizados, tanto los de las partes bajas del edificio como los de las zonas altas, están constituidos por un aglomerante de color blanco grisáceo y áridos de 0.5 cm de tamaño medio y color gris y/o blanco. En todos los morteros la calcita aparece como mineral mayoritario, asignándosele el papel de ligante. La muestra SJM20 constituye la excepción, pues el cuarzo es el principal componente. La observación macroscópica sugiere que no se trata de un mortero de naturaleza distinta al resto de los estudiados en este grupo, por lo que esta diferencia se asigna a la intervención del azar, de modo que el número de áridos presentes en esta muestra ha sido mayor. De forma semejante a los morteros de revestimiento, estos morteros de unión presentan en su composición mineralógica proporciones variables de dolomita, que oscilan entre cantidades inferiores a un 5% y nunca superiores a un 25%. Otros minerales identificados en cantidades traza son los feldespatos, los filosilicatos y el yeso. Los feldespatos corresponden casi con seguridad a los áridos, ya que *de visu* se han podido identificar micaesquistos. Lo mismo se puede afirmar acerca de los filosilicatos, que pueden corresponder a las micas de estos restos de rocas metamórficas, pues por el color de los morteros se descarta la posibilidad de que se hayan adicionado cantidades de arcillas a la pasta del mortero. Respecto al yeso, se trata sin duda de un producto de alteración, pues los morteros estudiados presentan en mayor o menor medida cierto grado de deterioro.

Por lo que respecta a los **ladrillos** muestreados en las zonas bajas del exterior e interior de la Iglesia, hay que aclarar que se tratan de restos de piezas añadidas a la fábrica de forma aislada. Sus datos se presentan en esta Memoria porque en algunos casos los ladrillos se encuentran afectados por el desarrollo de sales. En la Tabla 8.8 se presentan los resultados de XRD de los seis ladrillos analizados. Como era de esperar no existe una "mineralogía tipo" en estos ladrillos. Aunque las

referencias bibliográficas aseguran que proceden del cementerio musulmán *Saad ben Malic*, situado en la Puerta de Elvira y en vías de desaparición a principios del s. XVI (Gómez-Moreno, 1892), se desconoce cual era su ubicación exacta y la variedad de piezas existentes. En cualquier caso, se puede afirmar que los ladrillos del exterior del edificio corresponden al tipo de pastas calcáreas, con escasos filosilicatos y feldespatos. En los ladrillos de color rojo están ausentes las fases de alta temperatura, excepto en SJL-2 y SJL-4 en las que se han identificado indicios de wollanstonita. Por contra, el ladrillo de color amarillo es rico en silicatos de alta temperatura (wollanstonita y diópsido), así como en feldespatos. En cuanto al ladrillo rojo del interior de la Iglesia (SJL6), constituye un caso único en el que no existe calcita y sí proporciones elevadas de cuarzo, feldespatos y fases de alta temperatura.

Tabla 8.8. Composición mineralógica (expresada en %) de los ladrillos de la Iglesia de San Jerónimo.

#	Cal	Qtz	Fil	Fds	Hem	Wo+Di	Wo+Hd
SJL-1 (R)	22	61	5	9	<5	-	-
SJL-2 (R)	16	74	<5	<5	<5	-	<5
SJL-3 (R)	32	56	5	<5	<5	-	-
SJL-4 (R)	29	59	5	<5	T	-	T
SJL-5 (A)	18	38	-	19	-	25	-
SJL-6 (R)*	-	53	-	27	5	15	-

Wo = Wollanstonita; Di = Diópsido; Hd = Hedembergita; T = cantidades traza; R = rojo; A = amarillo. * Interior de la Iglesia.

No es objeto del presente Trabajo caracterizar los escasos ladrillos encontrados en la fábrica de la Iglesia de San Jerónimo, pues la proporción en la que aparecen es poco representativa en relación al resto de los materiales empleados en la construcción del edificio, y sólo puntualmente están afectados por el desarrollo de sales. Por tal motivo la difracción de rayos X constituye la única técnica con que se han estudiado. Siendo consciente de la limitación que ello supone, la información que suministra esta técnica es suficiente para cubrir uno de los objetivos propuestos. Es decir, si el desarrollo de formaciones salinas es independiente o no de la naturaleza del sustrato sobre el que aparecen.

En cuanto a los datos proporcionados por el **estudio óptico-petrográfico**, han sido dos los morteros del exterior estudiados (SJM1 y SJM2), dado la dificultad para elaborar láminas delgadas debido a su escasa consistencia. Corresponden a morteros de revestimiento de cal y arena, pero con ciertas diferencias desde un punto de vista morfológico y textural. En los dos morteros el ligante es la calcita con textura micrítica fundamentalmente, de modo que al microscopio se observa una masa de tamaño de grano muy fino que engloba a los áridos. En algunas zonas de la pasta se ha detectado la existencia de nódulos de cal subredondeados de pequeño tamaño y agrupados, sin cristalinidad y frecuentemente surcados por delgadas fisuras (Fig. 8.4A). En otros lugares se distinguen grumos de cal de mayor tamaño que los mencionados nódulos, en los que la cristalinidad es escasa y desigualmente repartida en el grano. En la pasta también se han identificado restos fósiles tales como algas rojas, foraminíferos bentónicos y fragmentos de equinodermos (Fig. 8.4B).

Por lo que respecta a los áridos, son de naturaleza, tamaño y morfología muy diferente. En el caso de la muestra SJM1 existe menos variación de áridos, son más escasos y de tamaño más pequeño (máximo 600 μm). Como consecuencia de la baja proporción de árido se ha producido un fenómeno de contracción de la pasta del mortero, con la consiguiente formación de microfisuras (intragranulares e intergranulares). Respecto a la naturaleza de los áridos se han identificado fragmentos de rocas metamórficas como mármoles dolomíticos y cuarcitas. Además hay agregados policristalinos de calcita y/o dolomita, cuarzo fracturado y con extinción ondulante, feldespatos (Na-Ca), óxidos de

hierro y arcillas. Estas arcillas si bien pueden catalogarse como árido fino, poseen algún poder aglomerante. En SJM2 la proporción de áridos es aproximadamente del 50% (muy superior a la de SJM1), apreciándose una gradación en su tamaño desde varios milímetros (2-3 mm) de espesor hasta cientos de micras. Ello confiere una mejor resistencia al mortero. En esta muestra además se han identificado restos de micaesquistos grafitosos con granates y micas.

La porosidad detectada en estos morteros es escasa y de tipo fisural, principalmente intergranular. En SJM1 se han encontrado restos vegetales, sin duda adicionados para conferir durabilidad al mortero. Por otra parte se ha detectado en la superficie de este mortero al menos dos capas, de unas 70 μm cada una, compuestas por una mezcla de yeso y arcillas (Figura 8.4). Estas películas superficiales se consideran enlucidos.

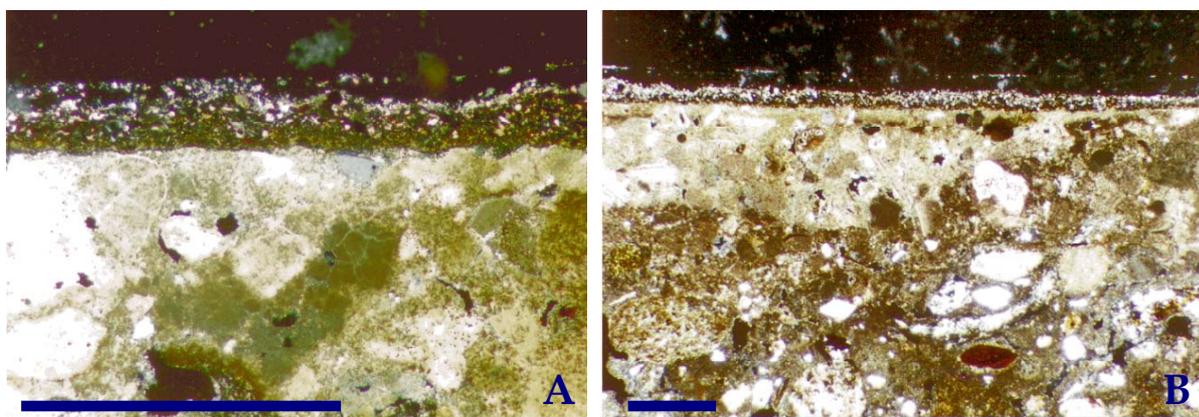


Figura. 8.4. Microfotografías realizadas con luz transmitida y polarizadores #. Muestra SJM1. A) Nódulos de cal de pequeño tamaño, subredondeados, sin cristalinidad y surcados por finas fisuras. B) Detalle de restos fósiles en la pasta del revestimiento. En ambas láminas se aprecia el enlucido superficial. Barra = 0-5 mm.

Morteros del interior de la Iglesia

Composición mineralógica

En las Tablas 8.9 y 8.10 se presentan los resultados del análisis mineralógico semicuantitativo de los morteros de revestimiento y morteros de unión del interior de la Iglesia. Una primera ojeada a la composición de los revestimientos pone de manifiesto la disparidad de los resultados obtenidos mediante XRD. Llegado a este punto es necesario aclarar que, en las diversas dependencias muestreadas del interior del Templo, se constata la aplicación numerosa y desordenada de revestimientos de distinto color, grosor, textura y acabado, a lo que hay que añadir que la mayoría de las veces aparecen superpuestos. Por tanto, es cuanto menos complicado realizar una sistematización simple de los diferentes morteros identificados en esta Memoria. Baste como ejemplo mencionar que en la habitación E se han contado en una sola pared hasta 5 revocos y/o enlucidos de diversa naturaleza. No obstante, el estudio detallado de la Tabla 8.9 permite establecer diferencias de composición que guardan relación con la función específica del mortero y su coloración.

Los **morteros de revestimiento** identificados se han agrupado en cuatro clases.

- Dos morteros de anhidrita (fase mineral más abundante) y yeso (SJM28B, y SJM37). Son de color beige claro y se han utilizado como enlucido aplicado directamente sobre la calcarenita (SJM28B), o sobre otro enlucido también elaborado con yeso (SJM37). Los dos revestimientos mencionados se encuentran cubiertos por otro enlucido de diferente naturaleza.

Tabla 8.9. Composición mineralógica (expresada en %) de los morteros de revestimiento del interior de la Iglesia de San Jerónimo, determinada mediante XRD.

#	Cal	Dol	Qtz	Gp	Anh	Bs	Fil	Fds	Otros
SJM17	30	-	21	68	<5	-	<5	<5	
SJM18	70	9	20	-	-	-	<5		
SJM20	18	-	11	30	18	-	21	<5	
SJM26	45	21	33	-	-	-	<5		
SJM27G	70	9	9	-	<5	-	9	<5	
SJM27B	35	16	43	<5	<5	-	-	<5	
SJM28B	-	-	-	29	71	-	-	-	
SJM28G	60	27	12	-	-	-	-	<5	
SJM29	41	9	49	-	-	-	<5	<5	
SJM30	68	21	10	-	-	-	-	<5	
SJM31	58	30	9	2	<5	-	-	-	
SJM32	19	5	71	-	<5	-	<5	<5	
SJM33B	9	-	3	85	-	-	-	<5	Celestina
SJM33G	89	6	5	-	-	-	-	-	
SJM35B	11	-	-	80	7	-	-	<5	
SJM35G	67	-	31	-	-	-	<5	<5	
SJM36	46	35	19	-	-	-	-	-	
SJM37	-	-	-	37	63	-	-	-	
SJM38	19	-	<5	71	7	-	<5	-	
SJM39	89	<5	-	<5	<5	-	-	-	Magnesita
SJM40	11	10	-	79	-	-	-	-	
SJM41	11	-	<5	83	-	-	-	<5	
SJM42	100	-	-	-	-	-	-	-	
SJM46	52	-	-	48	-	-	-	-	
SJM47	53	-	-	31	11	-	-	5	
SJM48	34	17	49	-	-	-	<5	-	
SJM49	45	19	34	-	-	<5	-	<5	Huntita
SJM51	6	-	4	25	-	5	59	<5	
SJM55	100	-	-	-	-	-	-	-	
SJM57	99	-	<5	-	-	-	-	-	
SJM59	36	-	<5	8	35	-	10	6	Magnesita
SJM65	50	6	41	<5	-	-	<5	<5	
SJM66	60	<5	37	-	-	-	-	<5	
SJM67	29	-	9	13	8	10	26	<5	
SJM73	-	-	13	31	8	8	31	9	
SJM74	49	29	13	<5	-	-	6	<5	
SJM75	63	18	8	8	-	-	-	-	Magnesita
SJM76	54	-	-	37	-	-	-	9	Ox. de Fe
SJM77	67	10	15	8	-	-	-	-	
SJM81	23	-	10	62	-	-	-	5	
SJM82	36	-	4	60	-	-	-	-	
SJM83	70	-	5	22	-	-	<5	<5	
SJM84	20	-	5	75	-	-	-	-	

Cal: calcita; Dol: dolomita; Qtz: cuarzo; Gp: yeso; Anh: anhidrita; Bs: basanita; Fil: filosilicatos; Fds: feldespatos.

- Morteros de yeso y cal, en los que casi siempre el yeso es el componente principal y actúa como ligante. La calcita está presente en proporciones que varían desde un 9% (SJM33B) hasta un 70% (SJM83). Es frecuente la presencia de anhidrita (SJM17, SJM20, SJM38, SJM47 y SJM58), filosilicatos, que en el caso de la muestra SJM20 constituyen la segunda fase mineral más abundante con un 21%, y los feldespatos en cantidades traza. En la muestra SJM33B se ha

detectado celestina, cuya presencia no es de extrañar pues es un mineral frecuentemente asociado a la existencia de yeso. Estos morteros se han aplicado sobre la calcarenita, pero están ocultos por la aplicación de un enlucido final. Presentan una coloración que gradúa del beige al rojizo. Dentro de estos revestimientos de yeso y cal hay una muestra que puede considerarse una excepción. Se trata de la SJM59, en la que la anhidrita representa el 35% del total de la composición mineralógica de la muestra, siendo esta proporción similar a la de la calcita. Hay que mencionar que el soporte de estos morteros es una calcarenita que presenta numerosas incisiones realizadas de forma regular en su superficie, sobre la que se ha aplicado además una capa de pintura de color rojo. Es sabido que la realización de este tipo de llagas en una roca favorece la adhesión de los revocos que se aplican sobre ella, pero se desconoce cuál puede ser el significado o intención de haber coloreado la piedra.

- Morteros de cal y arena. Todos ellos son de color gris (con diversas tonalidades), y se han aplicado como revestimiento final de la pared. La calidad y grosor de su acabado es distinto, por lo que se ha distinguido entre revocos (groseros) y enlucidos (finos). La mineralogía de estos morteros es muy semejante, aunque la proporción en la que aparecen sus componentes no es en absoluto homogénea. La calcita suele ser la fase mineral más abundante (34%-89%) y su función corresponde a la de aglomerante del mortero. Otros minerales identificados son el cuarzo y la dolomita, añadidos como árido en todas las muestras, excepto en SJM35G en la que no se ha identificado este último mineral.
- Por último, se han considerado morteros excepcionales a aquellos que muestran una particular composición mineralógica, al alejarse de lo que podría denominarse "normalidad". Así, la muestra SJM32 es un enlucido gris compuesto principalmente por cuarzo, SJM67 es un revoco rojizo que contiene hasta un 26% de filosilicatos, y SJM73 corresponde a un revoco gris elaborado con yeso (31%), filosilicatos (31%), cuarzo (13%), anhidrita y basanita (hemihidrita). Otro mineral identificado mediante difracción de rayos X es la magnesita (SJM39, SJM59 y SJM75). Otros dos morteros son exclusivamente de cal (SJM42, y SJM55) y presentan una coloración beige bastante semejante al de la calcarenita que recubren. Por otro lado, SJM39 corresponde a un enlucido gris de cal con escasa cantidad de cuarzo.

Respecto a **los morteros de unión** del interior de la Iglesia, se comprueba que existen morteros de yeso (SJM68 y SJM71), con algo de cuarzo y feldespatos, en los que se ha detectado anhidrita y óxidos de hierro; y morteros de cal y arena, donde la calcita actúa como fase ligante del mortero y la arena está constituida por cuarzo y dolomita. Las proporciones de estos dos minerales son tan oscilantes que pueden estar presentes en cantidades traza, o alcanzar hasta un 73% de dolomita, caso de la muestra SJM72, en la que además se ha identificado magnesita. Otros minerales presentes son los filosilicatos y/o feldespatos. La muestra SJM45 no puede incluirse en ninguno de estos dos grupos de morteros, pues se ha elaborado con cuarzo (66%) y filosilicatos (20%), como tampoco la muestra SJM34, constituida por yeso (78%) y feldespatos (21%).

Una de las diferencias más significativas en cuanto a la composición de los morteros del exterior e interior del Monasterio, es la ausencia sistemática de yeso en los morteros de unión y revestimiento en la zona externa del edificio. Debido a que el yeso resiste bastante mal a la intemperie, su principal aplicación en la construcción es en el revestimiento de paramentos interiores, empleándose para el pulido o alisado de los muros, o última capa de los enlucidos de paredes y techos.

Otra observación que se puede apuntar es que, la variedad en la composición mineralógica de los revestimientos del interior de la Iglesia se debe, principalmente, a que corresponde a morteros que se aplicaron en diferentes intervenciones históricas. El examen visual macroscópico ha permitido confirmar este hecho. Por ejemplo, en determinadas zonas del altar se comprueba que el estuco más profundo es el de yeso de color ocre, y encima se ha aplicado el mortero de revestimiento de cal y arena de color gris.

Tabla 8.10. Composición mineralógica (expresada en %) de los morteros de unión del interior de la Iglesia de San Jerónimo, determinada mediante XRD.

#	Cal	Dol	Qtz	Gp	Fil	Fds	Otros
SJM21	38	9	43	-	8	<5	-
SJM34	1	-	-	78	-	21	-
SJM44	49	34	9	-	5	<5	-
SJM45	<5	<5	66	-	20	7	-
SJM50	71	16	12	-	-	<5	-
SJM53	50	21	18	-	8	<5	-
SJM60	41	9	31	-	14	5	-
SJM61	30	34	33	-	T	<5	-
SJM62	99	-	<5	-	-	-	-
SJM63	62	12	9	-	16	<5	-
SJM64	65	35	T	-	-	-	-
SJM68	-	-	<5	89	-	-	Anh (T), Hem (T)
SJM71	-	-	8	68	-	5	Anh (10%), Hem (T)
SJM72	15	73	<5	-	-	-	Mgs (10%), Hem (T)

Cal: calcita; Dol: dolomita; Qtz: cuarzo; Gp: yeso; Fil: filosilicatos; Fds: feldespatos; Anh: anhidrita, Hem: hematites, Mgs: magnesita.

Características texturales determinadas con MOP

Se han seleccionado 9 muestras: SJM30 es un enlucido gris; SJM27, SJM33, SJM36, SJM49, SJM74 y SJM78 son revocos grises, y SJM54 y SJM58 corresponden a revocos de color beige. Dos han sido los morteros de unión estudiados, SJM62 y SJM71. Por lo que se refiere a los **morteros de revestimiento** del interior del Templo se pueden agrupar en dos clases con tipología diferente: los morteros de cal y arena de color gris, y los morteros de yeso y cal de tonalidad beige (color en muestra de mano).

Los morteros de cal y arena son similares en composición y textura al mortero de revestimiento SJM2 del exterior de la Iglesia. El ligante es de calcita con textura micrítica y a veces microesparítica. En la pasta se han identificado igualmente pequeños nódulos de cal subredondeados y exentos de cristalinidad, y otros grumos de cal, por lo general de mayor tamaño y escasa cristalinidad (Figura 8.5A). Otros minerales presentes en la pasta y que poseen algún poder aglomerante son las arcillas, que en algunos casos se consideran árido fino. Los áridos son de naturaleza variada y de morfología y dimensión diferente. Se han distinguido fragmentos de rocas metamórficas como cuarcitas (muy grafitosas en SJM78), micaesquistos con granates (SJM74), y trozos de mármol (probablemente dolomítico dada la cantidad de dolomita detectada mediante XRD). Otros áridos son de cuarzo, agregados policristalinos de carbonato (calcita y/o dolomita), hematites y otros óxi-hidróxidos de hierro. En algunas muestras se ha identificado chamota (fragmento de pieza cerámica) (SJM36, Fig. 8.5B), restos fósiles (SJM74), o desarrollo de perfectos cristales de yeso en "punta de flecha" debajo de la superficie (SJM78, Fig. 8.5C). Los áridos presentan distribución granulométrica, oscilando su tamaño de grano desde poco menos de 100 μm hasta 6 mm. En cuanto a las morfologías, son dispares identificándose formas subredondeadas, angulosas y/o tabulares (Figura 8.5D). La relación árido-pasta es elevada, pudiendo establecerse como media una proporción añadida de desgrasante (árido) del 40%, aunque debe señalarse que no existe una dosificación rigurosa en los diferentes morteros estudiados. Por lo que respecta a la porosidad, no es muy elevada. Se observan poros angulosos o irregulares de diferente tamaño, estimándose un tamaño medio de 50 a 100 μm , además de porosidad fisural en algunas muestras (SJM36).

Los morteros de yeso y cal aparecen bajo el microscopio óptico como una masa de color oscuro de baja cristalinidad y escasos áridos. El ligante, de tamaño de grano inferior a 10 μm , está compuesto por yeso y calcita en proporciones similares, según ha puesto de manifiesto la XRD. Se han

encontrado restos fósiles tales como algas rojas y foraminíferos bentónicos (Figura 8.5E). Los áridos añadidos al mortero se encuentran en una proporción inferior al 5%, y no superan 1 mm de tamaño.

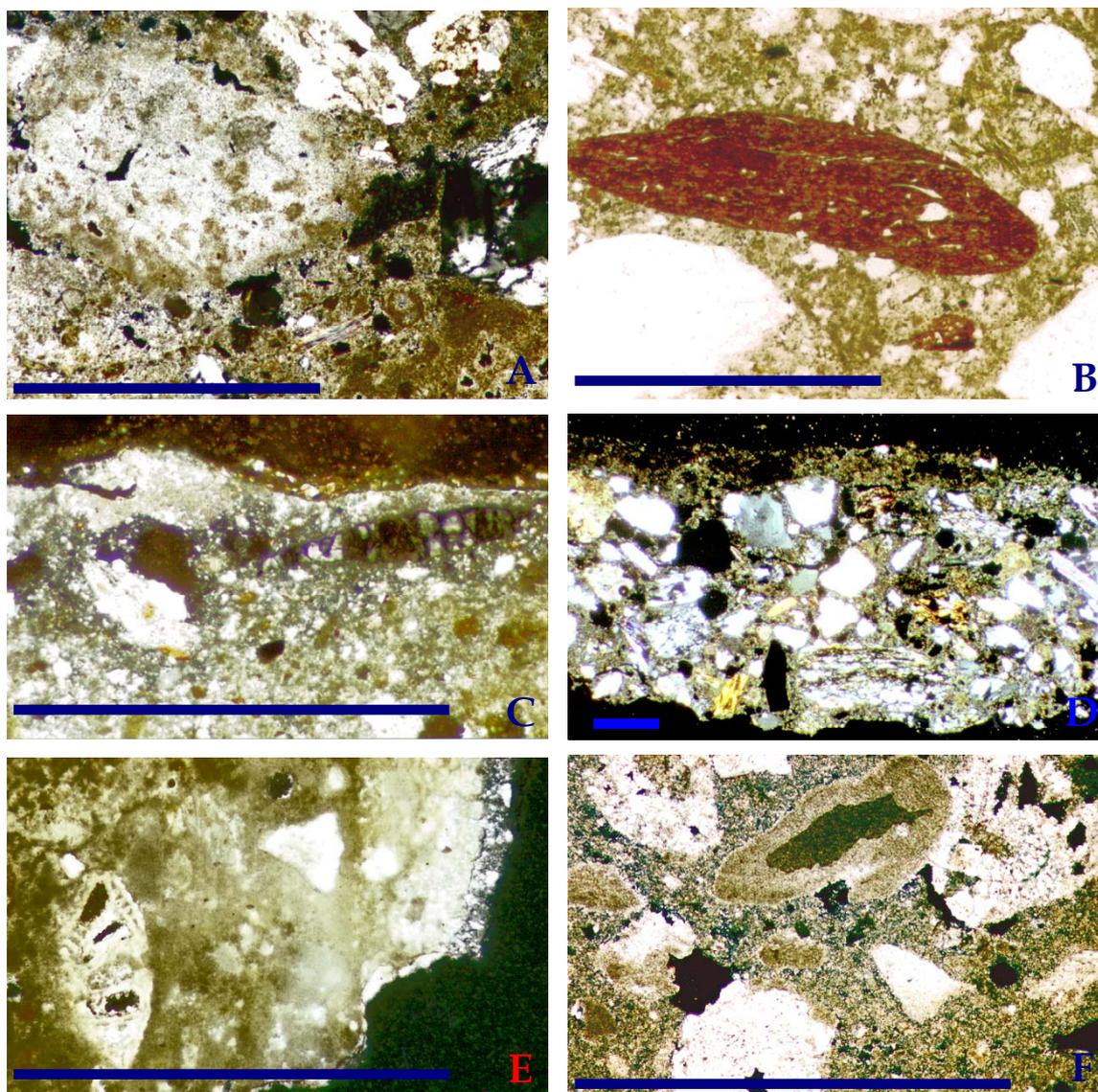


Figura. 8.5. Microfotografías realizadas con luz transmitida. A) Grumos de cal de escasa cristalinidad y gran tamaño en la pasta del revestimiento SJM30 (polarizadores #). B) Fragmento de chamota (pieza cerámica) en el revestimiento SJM36 (1 polarizador). C) Precipitación de yeso secundario (cristales en "punta de flecha") bajo la superficie del revoco SJM78 (polarizadores #). D) Detalle del enlucido de basanita en la superficie del revoco SJM49. Elevada cantidad de áridos con morfologías variadas en la pasta (polarizadores #). E) Presencia de foraminífero bentónico en la pasta del revoco SJM58. Nótese la cristalización de eflorescencias de yeso en superficie (polarizadores #). F) Nódulos de cal con zonación concéntrica de distinta cristalinidad en el mortero de unión SJM62 (polarizadores #). Barra = 0.5 mm.

Se han identificado fragmentos de cuarcitas ricas en óxidos de hierro, micaesquistos, agregados policristalinos de calcita, cuarzo y óxidos de hierro. La porosidad es bastante baja y de poros

subredondeados e irregulares de diferentes tamaños (alrededor de 300 μm), detectándose en la cal del ligante fisuras radiales. En el mortero SJM54 se ha encontrado una fractura vertical con claros indicios de disolución, y en su superficie la aplicación de una película de óxidos de hierro. En SJM58 se ha identificado en superficie la existencia de una capa de cristales de yeso en forma de eflorescencia (Figura 8.5E).

Los dos **morteros de unión** estudiados son diferentes desde un punto de vista composicional y textural. Esta diferencia parece guardar relación con el hecho de que dichos morteros unen distintos materiales, tales son bloques de calcarenita (SJM62) y losas de mármol (SJM71).

- SJM62 es un mortero de cal, en el que el ligante y la mayoría de los áridos son de calcita. Bajo el microscopio se aprecia que mucha de la cal que constituye el aglomerante aparece en forma de nódulos subredondeados, algunos de ellos con zonación concéntrica de cristalinidad (Figura 8.5F). Además se han identificado restos fósiles como algas rojas, briozoos y foraminíferos bentónicos (*Discocyclinas*), y monocristales de calcita. Otros áridos presentes en proporciones muy bajas son de cuarzo y feldspatos. La porosidad no es muy elevada. Existen poros intergranulares de geometría irregular y poros intragranulares identificados en los grumos de cal y en los fragmentos de fósiles. En estos casos se aprecia que las paredes de los huecos aparecen tapizadas por cristales de calcita secundaria. Otro tipo de porosidad es la fisural, abundante en este mortero, e identificada en el ligante y en los grumos de cal.
- SJM71 es un mortero de yeso al que se ha añadido escaso desgrasante (<5%), tal como cuarzo, agregados policristalinos de calcita, cuarcitas, micaesquistos grafitosos, óxidos de hierro y chamota. La dimensión máxima de estos áridos no supera 1 μm . En cambio, el tamaño de las micas es tan pequeño que actúan como aglomerante. El yeso posee diferente tamaño de grano, desde menos de 10 μm hasta 90 μm , por lo que se considera tiene función de ligante. De forma aislada se han identificado en el mortero nódulos de entramado cristalino que se distinguen texturalmente de la pasta de yeso. La porosidad es elevada (de poros subredondeados de unas 90-100 μm), siendo muy abundantes las microfisuras que comunican estos poros. Dichas fisuras se han originado principalmente por la disolución del yeso.

Microscopía electrónica de barrido

Se han analizado mediante SEM revestimientos de diferente tipología del interior de la Iglesia, utilizando para su estudio pequeños fragmentos de los mismos y láminas delgado pulidas. En los enlucidos elaborados a base de cal, y los de cal y yeso, el principal fenómeno de alteración se debe a la disolución del ligante calcáreo, que incrementa la porosidad y posibilita la posterior formación de yeso. La superficie de estos enlucidos aparece tapizada por una masa de cristalitos tabulares de yeso de aproximadamente 5 μm de tamaño (Figura 8.6A). En otros casos se detecta exclusivamente en estos enlucidos la formación de sales cloruradas (halita y silvita) (Figura 8.6B).

En los revestimientos en los que se han identificado dos capas de distinta tonalidad y grosor (revoco y enlucido), se ha prestado especial interés en identificar la naturaleza de los componentes, así como la textura y relación espacial entre ambas capas. De nuevo se pone de manifiesto (como se ha comprobado mediante XRD y MOP) que no ha existido una elaboración sistemática de los revestimientos, incluso en aquellos con idéntica función. Este hecho no es de extrañar pues se trata de materiales antiguos en los que los procesos de mezcla no solían ser perfectos. Así, las dos muestras estudiadas presentan características similares *de visu* y se han extraído de dos elementos decorativos idénticos. El análisis en profundidad con el SEM ha permitido poner de manifiesto las siguientes diferencias:

- En la muestra SJM27 la primera capa corresponde a un mortero de cal y arena (cuarzo principalmente). Encima se ha detectado el resto de una película de color blanco de carbonato

de plomo (pigmento denominado *blanco de plomo*), sobre la que se ha aplicado una capa roja elaborada con una mezcla de *blanco de plomo* más óxido de hierro rojizo. Por último aparece un enlucido grisáceo de cal y arena, en cuya superficie se han encontrado igualmente restos de policromía, identificándose óxido de hierro y sulfato de bario (Fig. 8.7A).

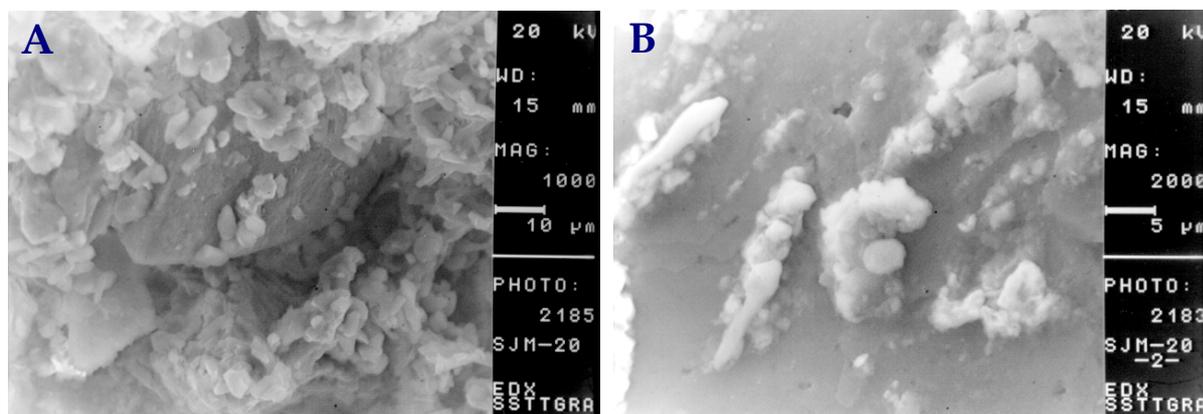


Figura 8.6. Microfotografías realizadas con SEM. Muestra SJM20. A) Cristales tabulares de yeso en la superficie del enlucido. B) Desarrollo de sales de halita.

- En la muestra SJM33, el revoco o capa más profunda de color crema, es de yeso con impurezas de celestina. A continuación se aprecia una capa más delgada elaborada con una mezcla de yeso y cal, identificándose también celestina, carbonato cálcico magnésico y arcillas. Encima aparece un enlucido de cal con áridos de cuarzo, esquistos, mármol y óxidos de hierro. Por último se ha aplicado una película pictórica. Entre este paquete de capas y la calcarenita se han detectado subeflorescencias de epsomita (Fig. 8.7B).

8.2.2 Composición química

Como ya han puesto de manifiesto los resultados anteriores, los morteros de la Iglesia de San Jerónimo presentan una composición mineralógica ciertamente heterogénea. Esta característica también se refleja en la composición química de los diversos morteros, por lo que en principio puede parecer poco representativa de los mismos. El intrínseco carácter heterogéneo de estos materiales se ve coadyuvado por la diferente naturaleza y cantidad de áridos añadidos a la pasta. Como se ha comprobado mediante el estudio mineralógico realizado con microscopía óptica, se han identificado fragmentos de rocas metamórficas tales como micaesquistos, cuarcitas, mármoles, etc.

En las Tablas 8.11 y 8.12 se presentan, respectivamente, las concentraciones de elementos químicos mayoritarios, minoritarios y trazas de los morteros analizados. En las muestras que corresponden a morteros con contenido en yeso (SJM38, SJM41, SJM47, SJM51, SJM74, SJM81 y SJM82) los valores "de cierre" aparecen alejados del 100%. Ello se debe a que no se ha determinado el contenido en S (% de SO_3). El interés en determinar el contenido en elementos minoritarios y/o trazas en morteros y hormigones estriba básicamente en su utilidad a la hora de agruparlos y clasificarlos. En cambio su uso es escaso para establecer el nivel de deterioro experimentado, ya que no se pueden establecer las variaciones que han sufrido estos materiales desde su puesta en obra, al no existir elementos de referencia con qué compararlos. Por otra parte hay que considerar, como ya se ha comentado, que los contenidos químicos se encuentran muy influenciados por la heterogeneidad de estos materiales, además de por los posibles procesos de contaminación que pueden haber sufrido desde su ubicación

en el edificio hasta la actualidad. Por ello el estudio se ha centrado en establecer las posibles variaciones químicas existentes atendiendo a criterios tales como, ubicación de los morteros en el Templo (zona interna o externa, niveles superiores o inferiores), tipo y función del mortero, afinidad química con materiales geológicos del entorno de Granada, etc. Se han analizado 40 elementos, de los que sólo se han consignado en la Tabla 8.12 los que se encuentran por encima de su límite de detección y permiten establecer diferencias entre los distintos morteros.

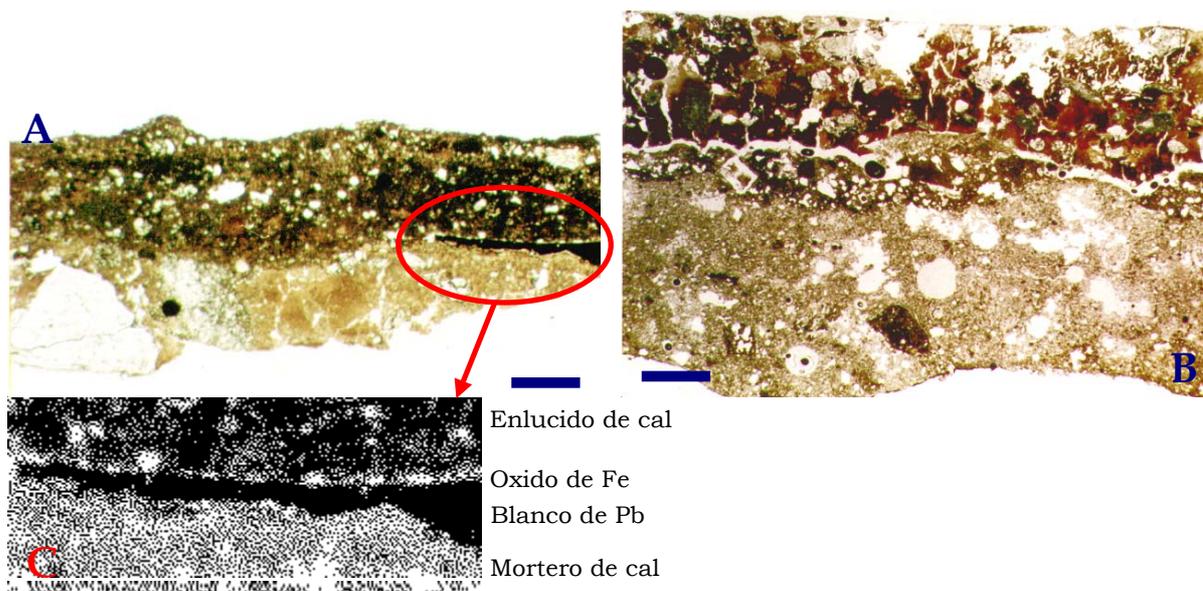


Figura 8.7. Microfotografías realizadas con luz transmitida y un polarizador correspondientes a morteros de revestimiento del interior de la Iglesia (habitación W). A) Muestra SJM27. De abajo hacia arriba se han detectado un mortero de cal y arena, un resto de policromía, otro enlucido de cal y arena y en superficie una policromía. Se constata así la existencia de un repinte. B) Muestra SJM33. En el mismo orden que el anterior se han identificado un revoco de yeso, otro de yeso y cal, encima un enlucido de cal, y por último una policromía. C) Detalle de las capas pictóricas que componen la policromía.

En todas las muestras los valores de CaO son elevados, variando entre 21.9% y 46.7%. Ello se debe a que los morteros estudiados son de yeso, yeso y cal o cal y arena. En estos últimos lógicamente el contenido en SiO₂ es superior (e.g. SJM2, SJM3, SJM13, SJM29, SJM50, etc). Respecto a las concentraciones de MgO, los resultados son congruentes con los datos obtenidos mediante XRD, comprobándose que los valores más elevados se dan en los morteros de cal en los que se identificó dolomita. Tales valores oscilan entre 1.22% y 8.49%. En los morteros de yeso el contenido en MgO es significativamente inferior, oscilando entre 0.28% y 2.10%. Independientemente del tipo de mortero, los valores más elevados de MgO se detectan en las muestras en las que mediante XRD se analizó una elevada proporción de filosilicatos, tales son SJM51 y SJM3. Los contenidos en Na₂O son ligeramente superiores en los morteros del interior de la Iglesia, comprobándose que los valores son mayores en los morteros con desarrollo de subeflorescencias y/o eflorescencias de sodio, o situados muy próximos a las mismas. Es de destacar la muestra SJM47 con un 1.44% de Na₂O.

En los morteros del exterior del edificio no se han detectado sales *de visu*, por lo que los valores de Na₂O se atribuyen al sodio de los áridos. Similar distribución presenta el K₂O. Los valores de P₂O₅ son ligeramente superiores en los morteros del exterior del edificio, especialmente en las muestras de la

primera cornisa de la fachada SE de la Iglesia (ábside), con valores comprendidos entre 0.11% y 0.18%. Estos contenidos elevados en fósforo no son de extrañar, pues en los niveles superiores de la parte externa de la Iglesia la cantidad de excrementos de aves es excesiva, llegando incluso a dificultar el paso por las escaleras de acceso a los distintos niveles. Estos restos pueden contener hasta un 0.5-1.5% de ácido fosfórico, que la percolación continuada de agua de lluvia puede arrastrar e introducir en los bloques de calcarenita de los niveles inferiores. Se ha determinado el contenido en Ca, Mg, Na y K de los excrementos de aves recogidos del cimborrio. Los resultados son 0.234% de Ca, 0.094% de Mg, 0.007% de Na y 0.124% de K.

Tabla 8.11. Análisis químico de elementos mayoritarios y minoritarios (en %) de morteros de la Iglesia de San Jerónimo.

#	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	PC	SUMA
SJM1	8.8	1.72	44.5	1.22	0.28	0.20	0.82	0.80	0.18	38.4	96.3
SJM2	37.6	4.18	22.2	6.39	1.26	0.39	1.70	0.22	0.06	23.8	97.9
SJM3	37	4.45	21.9	8.02	0.73	0.30	2.34	0.25	0.07	25.3	100.5
SJM6	29.8	4.63	25.2	4.38	0.59	0.72	2.41	0.35	0.10	28.8	97.1
SJM8	9.0	1.08	46.1	2.14	<0.1	<0.1	0.38	0.98	0.07	40.8	99.7
SJM9	31.6	4.68	28.4	3.77	0.62	0.52	2.37	0.28	0.07	27.2	99.6
SJM11	25.5	3.52	33.4	4.48	0.49	0.31	1.77	0.20	0.12	30.8	100.7
SJM12	8.5	1.29	46.7	1.85	0.23	0.25	0.71	0.73	0.15	38.6	98.5
SJM13	26.8	4.18	31.1	5.74	0.59	0.29	2.80	0.24	0.11	27.2	99.2
SJM14	31.6	3.98	27.9	4.48	0.55	0.44	1.95	0.23	0.08	27.2	98.5
SJM16	36	4.43	27.0	3.59	0.61	0.29	2.27	0.24	0.09	25.8	100.4
SJM28G	29.9	4.76	24.8	5.36	0.91	0.78	2.41	0.28	0.06	31.0	100.0
SJM29	30.1	4.32	22.9	8.49	0.71	0.53	2.35	0.25	0.06	29.9	99.7
SJM31	29.1	4.18	27.0	5.50	0.74	0.46	2.23	0.23	0.05	26.2	95.7
SJM36	35.7	5.48	24.6	3.11	0.64	0.63	2.62	0.29	0.08	27.0	100.0
SJM38	7.7	2.45	32.8	0.28	0.71	0.57	1.17	0.14	0.02	25.1	70.9
SJM41	7.8	2.90	36.0	0.40	0.34	0.37	1.36	0.2	0.07	18.9	68.4
SJM47	7.1	2.07	27.8	1.44	1.01	1.44	1.09	0.08	0.03	30.3	72.4
SJM49	31.7	4.98	23.6	6.26	0.41	0.89	2.47	0.35	0.10	28.6	99.4
SJM50	38.8	4.94	22.7	4.18	1.00	0.49	2.40	0.29	0.07	25.5	100.0
SJM51	8.6	3.63	27.5	2.10	1.22	0.50	1.50	0.13	0.03	17.4	70.7
SJM74	13.8	4.10	31.0	4.62	0.96	0.54	1.75	0.24	0.08	21.9	74.5
SJM81	5.8	2.09	31.0	0.61	0.62	0.10	0.82	0.10	0.03	25.6	63.1
SJM82	8.3	2.76	31.6	1.17	0.96	0.22	1.20	0.11	0.03	31.0	72.0

En la zona baja del interior del altar existe un importante desarrollo de eflorescencias (especialmente abundantes en el período estival), tanto en los bloques de calcarenita como en los morteros. A pesar de encontrarse éstos contiguos a las calcarenitas, algunos no presentan sales en su superficie, aunque es evidente la existencia de sales solubles en su seno. Este es el motivo por el que se ha considerado interesante analizar el contenido en Na soluble en tres morteros. Los datos se recogen en la Tabla 8.13. Se comprueba que los valores son dispares (0.27, 1.21 y 6.23), pero en cualquier caso superiores a los que cabría esperar en un mortero sin alterar, lo que corrobora la existencia de sales solubles de sodio en su seno.

En los morteros es de destacar la fuerte oscilación de los valores de Sr. Estos son más homogéneos en los morteros del exterior de la Iglesia, variando las concentraciones entre 294 ppm y 824 ppm. En el interior se comprueba sistemáticamente que los valores más altos aparecen en los morteros de cal y arena, y los más bajos en los morteros de yeso. Constituye la excepción la muestra SJM74, que siendo un mortero de cal y arena posee una concentración de Sr de 0.32 ppm (la observación macroscópica pone de manifiesto que se trata de un mortero de restauración).

En cuanto al Pb, presenta una pauta de comportamiento inversa a la que cabría esperar. Los valores más bajos se han analizado en los morteros del exterior de la Iglesia, zona que por estar expuesta a la contaminación atmosférica debería poseer mayores concentraciones de este elemento. En el interior de la Iglesia los valores son bastante dispares, y es difícil establecer conexiones según los criterios anteriormente expuestos. En general, los morteros elaborados con yeso son los que contienen una cantidad de plomo más baja, excepto SJM51 con 1193.45 ppm que es la muestra con la proporción de Pb más elevada. Respecto al resto de los elementos registrados en la Tabla 8.12, únicamente se puede anotar que las concentraciones de Co, Ni y Zn son ligeramente más abundantes en el exterior del edificio, cuya causa se justifica por la contaminación atmosférica.

Tabla 8.12. Análisis químico de elementos traza (en ppm) de morteros de la Iglesia de San Jerónimo.

#	Rb	Sr	Ba	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
SJM1	12	545	86	1.9	28	13	3	5	12.4	39.7	78
SJM2	30	337	146	4	41	23	5	13	7.9	30.6	36
SJM3	25	412	124	6	46	27	6	14	9	78.3	12
SJM6	22	824	75	4.8	67	33	7	26	10.8	28.5	9
SJM8				1.1	31	11	2	12	11.1	11.9	96
SJM9	21	294	76	5	51	21	6	18	8.9	30.9	3
SJM11	23	304	46	3.7	45	18	4	18	11.1	33.4	22
SJM12	14	449	<10	1.5	35	12	3	14	9.8	38.9	29
SJM13	26	318	90	5.3	76	33	5	19	15.2	52.9	28
SJM14	27	350	76	4	51	21	5	20	13.7	45.2	29
SJM16	30	322	107	4.3	57	22	5	23	11.6	38.2	14
SJM28G	15.8	1542.6	38.8	2.2	35.4	24.4	3.0	0	6.9	27.9	57.8
SJM29	16.1	1529.3	36.2	2.0	33.2	53.9	2.9	0	7.6	24.8	23.6
SJM31	14.2	1593.6	39.7	1.7	30.5	22.3	2.5	0	6.8	21.0	26.9
SJM36	20.0	2111.4	63.5	3.4	72.7	47.3	3.3	0	11.0	24.6	36.6
SJM38	12.2	0.4	33.2	0.6	13.7	13.1	1.3	0	5.1	11.0	6.2
SJM41	14.1	1.5	33.4	0.6	18.6	14.5	1.8	0	3.9	14.0	7.8
SJM47	11.5	1.8	52.5	0.3	12.3	11.2	1.7	0	25.7	1.6	264.3
SJM49	17.0	855.5	38.9	2.3	34.3	20.6	3.3	0	21.8	31.7	300.9
SJM50	18.6	12.2	55.6	2.4	39.2	87.4	3.4	0	8.5	31.2	13
SJM51	20.7	3.1	46.1	1.4	29.2	19.8	2.4	0	11.4	19.6	1193.4
SJM74	18.6	0.3	42.1	1.3	26.4	18.5	2.4	0	21.4	19.3	672.2
SJM81	9.7	2.5	22.2	0.2	12.5	14.9	1.2	0	3.3	10.7	8.1
SJM82	11.7	2.1	38.7	0.7	17.6	14.2	2.1	0	6.7	12.5	7.8

Tabla 8.13. Contenido en % de Na de la solución salina que impregna el mortero.

#	% Na soluble en el mortero
SJM-47	1.21
SJM-48	6.23
SJM-51	0.27

8.2.3 Análisis del sistema poroso

Trabajar con rocas naturales permite establecer comparaciones químicas, mineralógicas, texturales, mecánicas, etc., de la roca del monumento con la roca original de la cantera, que *a priori* no se considera modificada o degradada. En cambio, como se ha podido comprobar a lo largo de este Trabajo, el caso de los materiales artificiales antiguos es bien diferente. En su estudio no es posible

disponer de un elemento de referencia intacto, es decir, representativo del material en su estado original. Por tanto, la aproximación más acertada es considerar los morteros aparentemente no alterados como los más próximos a su situación original. Por este motivo hay que extremar las precauciones, y considerar el margen de error que conlleva esta suposición. El problema que se plantea en el caso concreto de la Iglesia de San Jerónimo es doble. Por una parte, y como se ha demostrado mediante las técnicas analíticas ya expuestas, existe una gran variedad y superposición espacial de tipos de morteros, y por lo general, dentro de un mismo tipo no suele existir homogeneidad composicional y textural. Por otra parte, hay cierto tipo de morteros en los que sistemáticamente no se detectan signos de alteración, pero, los que aparecen degradados, lo están en toda su extensión. En consecuencia, resulta cuanto menos difícil obtener muestras intactas y alteradas para una misma clase de mortero.

La porosimetría de inyección de mercurio proporciona unos datos que son imprescindibles para conocer el sistema poroso de los materiales pétreos en general, naturales y artificiales. En este último caso hay que considerar que la configuración del sistema poroso en un mortero está determinado por una serie de factores relacionados con su forma de elaboración, como granulometría del árido utilizado, técnica de fabricación de la pasta, etc., y por supuesto, por los procesos de alteración que ha experimentado desde su puesta en obra. Estas características suponen un problema adicional en los morteros de la Iglesia de San Jerónimo, pues la heterogeneidad textural de los mismos se refleja en su configuración porosimétrica. Por todo lo comentado, el objetivo principal de la aplicación de esta técnica de análisis porosimétrico es establecer, en la medida de lo posible, las características del sistema poroso de los morteros según sean éstos de yeso o cal y arena.

Se han ensayado 15 morteros: SJM34 es de unión elaborado con yeso y el resto corresponden a morteros de revestimiento, de los cuales 6 son de yeso (SJM34, SJM35, SJM37, SJM40, SJM81, SJM82 y SJM84) y los otros 8 de cal y arena (SJM27, SJM27B, SJM28, SJM29, SJM30, SJM33, SJM36 y SJM49). Los resultados se presentan en la Tabla 8.14 y en la Figura 8.11. En la tabla se consignan los valores porcentuales de distribución de rango de poro, los valores de porosidad total de la muestra, y el área superficial específica. Han sido 5 los rangos de poro establecidos: entre 100 y 10 μm , 10 y 1 μm , 1 y 0.1 μm , 0.1 y 0.01 μm y <0.01 μm . En los gráficos se ha proyectado el volumen de mercurio intruido (% volumen acumulado), y los respectivos valores del volumen relativo de mercurio intruido (% volumen absoluto) frente a los rangos de poros.

En la Tabla 8.14 se comprueba en primer lugar la elevada porosidad total de todas las muestras ensayadas, de modo que estos morteros se clasifican como material muy poroso. Por otra parte, existe una fuerte dispersión de los valores, detectándose diferencias de porosidad de aproximadamente un 18% en los morteros de cal y un 35% en los de yeso. En ambos casos predomina la microporosidad, especialmente en los morteros de yeso, motivo por el que los valores del área superficial son tan elevados. Las porosidades más altas se detectan en los morteros de yeso, donde el volumen de huecos llega a ser especialmente elevado, tal es el caso de la muestra SJM84 con una porosidad total de 68.1%. En los morteros de cal y arena el mayor volumen de poros se concentra en el rango 1-0.1 μm , siendo la distribución porcentual del volumen menos homogénea en los morteros de yeso.

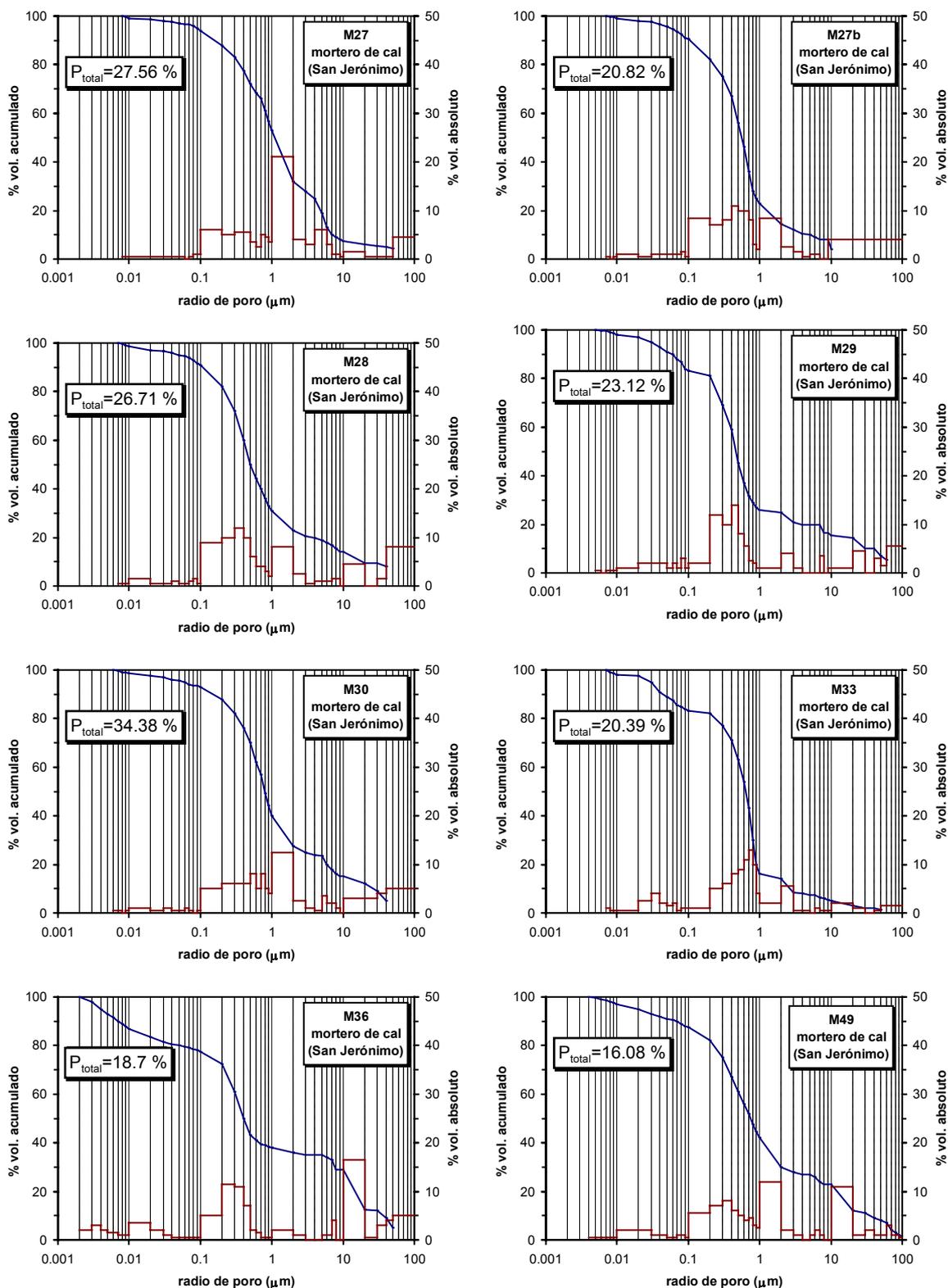
Se han analizado dos muestras del mismo mortero de cal, pero una de ellas con desarrollo evidente de eflorescencias en su seno (SJM27 y SJM27B). Se comprueba que la porosidad disminuye en un 6.7% en el mortero con formación de sales (SJM27B), variando además su distribución porcentual de rango de poro, pues aumenta la cantidad de huecos de menor tamaño. Ello puede justificarse aduciendo que los poros comprendidos en rangos superiores se han rellenado con dichas sales, por lo que han visto reducido su tamaño. En los morteros de yeso sin evidencia externa de alteración la porosidad total oscila entre 42.6% y 68.1%, siendo ligeramente inferior en algunos de los alterados y con desarrollo de sales en su seno (32.8%-33.5%). Ello sugiere que la presencia de sales ha contribuido en esta disminución, al cementar muchos de los poros del mortero.

En los gráficos de la Figura 8.11 se observa la escasa homogeneidad de las curvas e histogramas de los distintos morteros. No obstante, a grandes rasgos se puede establecer una similitud entre los gráficos pertenecientes a los morteros de cal y arena, y por otra parte, los gráficos correspondientes a los morteros elaborados con yeso.

Tabla 8.14. Distribución porcentual de rango de poro, porosidad total (P.T.) y superficie específica (s.s.) en morteros procedentes de la Iglesia de San Jerónimo.

	Rango de radio de poro (μm)					P.T (%)	s.s (m^2/g)
	100-10	10-1	1-0.1	0.1-0.01	<0.01		
<i>de cal:</i>							
SJM27	7.5	45.5	41	5	1	27.6	1.22
SJM27B	4	19	67.5	8.5	1	20.8	1.20
SJM28	14	17	60	7.5	1.5	26.7	1.41
SJM29	15.5	10.5	57	15	2	23.1	2.42
SJM30	15	25	53	5.5	1.5	34.4	1.76
SJM33	5	11	67	15	2	20.4	6.23
SJM36	29	9	39.5	9.5	13	18.7	5.90
SJM49	23	19	45.5	9.5	3	16.1	1.58
<i>de yeso:</i>							
SJM34	15	53.5	9	18.5	4	32.8	5.49
SJM35	4	56	21.5	16	2.5	46.2	8.51
SJM37	0	26	53	18	3	41.6	8.72
SJM40	8.5	58	15.5	16.5	1.5	47.7	6.24
SJM81	14.5	17	47.5	19.5	1.5	48.5	6.93
SJM82	13	21	46	17.5	2.5	33.5	7.58
SJM84	10	23	36	27.5	3.5	68.1	8.77

En los morteros de cal se aprecia en las curvas una fuerte pendiente en el rango de poro 1-0.1 μm que indica un mayor volumen de poros en dicho intervalo, dato que coincide con los valores consignados en la Tabla 8.14. Una excepción la constituye la muestra SJM36 con mayor proporción de microporos, y una clara distribución bimodal del sistema poroso, con máximos en los rangos de poro 100-10 μm y 1-0.1 μm , que se reflejan en el gráfico en los dos cambios de pendiente de la curva. En los morteros de yeso las curvas de los gráficos no son tan semejantes entre sí como las correspondientes a los morteros de cal. En los primeros las pendientes se producen en los rangos de poro 100-10 μm ó 10-1 μm , que informan acerca de la distribución unimodal del volumen de poros. La única distribución bimodal se ha detectado en el mortero SJM34, con máximos de huecos en el intervalo 10-1 μm y 0.1-0.01 μm .



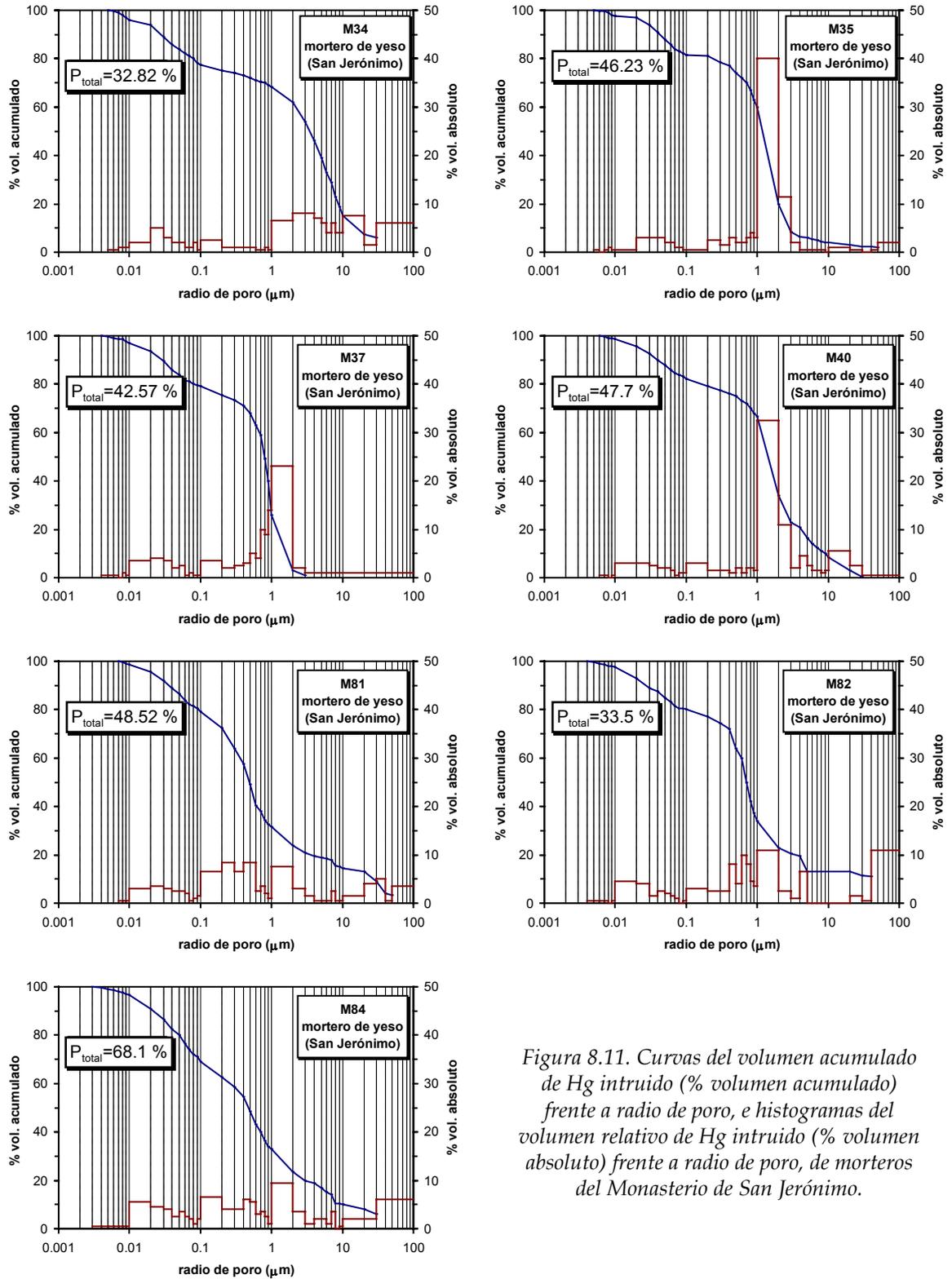


Figura 8.11. Curvas del volumen acumulado de Hg intruido (% volumen acumulado) frente a radio de poro, e histogramas del volumen relativo de Hg intruido (% volumen absoluto) frente a radio de poro, de morteros del Monasterio de San Jerónimo.

8.3 POLICROMÍA DE ESCULTURAS Y PINTURA MURAL

El estudio composicional y estructural de la policromía de algunas esculturas de piedra y pinturas murales de la Iglesia de San Jerónimo tiene un triple interés:

- de tipo histórico, en lo que al conocimiento de las técnicas y materiales empleados por los diversos autores se refiere,
- conservativo, pues informa sobre el estado material de la obra, aportando los datos necesarios para acometer una restauración, y,
- por lo que concierne a esta Trabajo, los resultados obtenidos permitirán conocer los mecanismos del desarrollo de las sales en estos materiales, y sus interacciones mutuas: naturaleza de los materiales pictóricos - tipo de sal depositadas - formas de deterioros.

A la hora de abordar el estudio composicional y estructural de una pintura, uno de los primeros problemas que se plantea es el muestreo. Este debe cumplir una serie de requisitos:

- el número de muestras extraídas debe ser mínimo,
- sus dimensiones tienen que ser también mínimas,
- el muestreo debe comportar el menor daño al contenido expresivo de la obra,
- la muestra ha de tener la máxima representatividad posible del problema objeto de estudio, y,
- la muestra debe poder ser estudiada mediante diversas técnicas antes de su posible destrucción.

El primer paso seguido en la Iglesia ha sido un examen visual minucioso de la superficie de la policromía de las esculturas y las pinturas murales. En el muestreo se ha prestado especial interés a características tales como: la gama de colores empleada por el/los artista/s y los signos de alteración que presentan las obras, destacando las variaciones cromáticas, fisuras, hinchamientos, desarrollo de eflorescencias y subeflorescencias, etc. Tras estas consideraciones se han analizado 21 muestras de pintura, de las cuales 19 se han elaborado en forma de estratigrafías pictóricas. Todas las muestras seleccionadas presentan en mayor o menor medida signos de alteración. De las esculturas policromadas situadas en la parte superior del retablo se han extraído 6 muestras (SJEP3, SJEP6, SJEP7, SJEP13, SJEP15 y SJEP17). El resto se han tomado de diversas pinturas murales: 7 se han muestreado de las paredes de las hornacinas donde se ubican las esculturas y otros elementos arquitectónicos (SJEP1, SJEP2, SJEP5, SJEP8 a SJEP11); las otras 8 pertenecen a las pinturas murales de las habitaciones laterales del altar (SJEP22, SJEP23, SJEP24, SJEP27, SJEP30, SJEP32 a SJEP34). Hay que aclarar que en la descripción de las diversas capas presentes en las muestras pictóricas sin elaborar, así como en las estratigrafías, se comienza siempre desde la zona más interna hasta la superficie. Así, la última capa pictórica descrita corresponde a la que tiene la muestra en superficie.

En primer lugar se presentan los resultados de las esculturas policromadas, y a continuación los de la pintura mural de los elementos arquitectónicos y decorativos donde se ubican las esculturas. Por último se exponen los resultados de las pinturas murales de la zona baja de la Iglesia.

8.3.1 Estudio composicional y estructural

Una vez extraídas las muestras se ha procedido a su examen mediante lupa binocular. Esta técnica se ha utilizado como criterio de selección de las muestras que habían de someterse al proceso analítico. Así, de las 35 muestras extraídas se han elegido 21 para su análisis composicional y estructural. A su vez, la lupa permite conocer globalmente la estructura técnica y el estado material de la obra, con más detalle de la que permite una simple observación visual.

En las esculturas se han muestreado 5 colores: gris, amarillo, rojo, azul claro y azul oscuro. En todas las muestras se observa en primer lugar la existencia de una capa de preparación de color grisáceo, sobre la que se han aplicado de una a varias capas de imprimación rojiza, o ninguna (SJEP7, azul claro). Sobre éstas aparece la capa pictórica final en SJEP13 (gris), SJEP15 (amarillo) y SJEP17 (rojo). En SJEP3 sobre la imprimación vuelve a identificarse la capa blanquecina, y por último la capa pictórica azul oscuro. En SJEP6 se aprecian alternativamente tres capas blancas y dos rojizas, siendo rojo el color en superficie.

En los elementos arquitectónicos y decorativos de las zonas adyacentes a las esculturas son cuatro los colores predominantes: gris, ocre, violáceo y dorado. Para obtener el color gris se aplicó una única capa grisácea (SJEP5 y SJEP11). En el color ocre se detecta una sola capa de tonalidad gris amarillenta (SJEP8 y SJEP10), o una preparación gris y una capa pictórica amarillenta (SJEP9). Las muestras de dorado y violáceo tienen una disposición de capas diferente a las hasta ahora estudiadas. En la violácea (SJEP1) se identifica una alternancia de capas blancas y rojizas, apareciendo en superficie una lámina metálica negruzca. En el dorado (SJEP2), las capas detectadas son una grisácea, una rojiza, otra grisácea y una película dorada. En general se comprueba que en todas las muestras estudiadas de la zona superior del ábside, con las dos excepciones últimas, la naturaleza y disposición de las capas pictóricas es similar.

En la zona baja del Templo se han muestreado sólo 4 colores de las pinturas murales que decoran las habitaciones laterales del altar: gris claro y oscuro, verde, y rojo muy oscuro. Las muestras pertenecientes a la habitación W son muy similares (SJEP27, SJEP30 y SJEP32). Sobre la calcarenita se aplicó una capa grisácea. En las muestras de la habitación E se identifica también la capa gris y en superficie una capa gris metálica (SJEP22), verdosa (SJEP23) o roja muy oscura (SJEP24).

Por lo que respecta al estudio composicional, mediante microscopía óptica polarizada y microscopía electrónica de barrido se han analizado en esta Trabajo únicamente los pigmentos inorgánicos. Los espectros de la composición (EDX) obtenidos mediante SEM se adjuntan en el Anexo II. Hay que señalar que el color natural que presenta una determinada capa se corresponde con el que tiene en la imagen de luz reflejada con analizador si el pigmento es opaco (debido a las reflexiones internas del componente mineral), y con luz transmitida sin analizador si la capa es transparente o traslúcida. El color natural es el que se menciona en la descripción de estas pinturas.

Policromía de las esculturas en biocalcarenita

Se han identificado una sucesión de capas empezando por la capa de preparación exenta de color, varias capas de imprimación coloreadas y las capas pictóricas. Entre éstas dos se identifican otras tantas capas blancas.

- La capa de preparación, con un espesor que varía entre 100 μm y 300 μm , está constituida por yeso, detectándose además pequeñas cantidades de celestina. Los cristales de yeso tienen tamaños que oscilan entre menos de 10 μm y hasta 65 μm , con hábito frecuentemente en "punta de flecha". Son numerosos los fenómenos de disolución que originan un aumento de la porosidad de la capa. También se detecta yeso secundario o de recristalización. El yeso se ha mezclado con abundante cola, responsable de la fuerte opacidad observada en las imágenes de LT-A. Los poros y microfisuras son abundantes, produciéndose despegues en la propia capa y respecto a las superiores.
- Sobre la capa de preparación se han identificado de una a varias capas de imprimación coloreadas en diversos tonos tostados, desde rojizos a amarillentos. El espesor total oscila entre 120 μm y 230 μm . Se han elaborado a partir de arcillas ricas en hierro, identificándose además óxidos de hierro, carbonato cálcico, yeso, cuarzo y carbonato de plomo (pigmento conocido como *blanco de plomo*). Se ha detectado así mismo sulfato de hierro. El tamaño de grano de los

pigmentos es grande, de hasta 230 μm (SJEP17). Estos colores elaborados a partir de una arcilla rica en hierro se denominan *Tierras*, y presentan colores que gradan del amarillo al rojo. En las esculturas se han empleado principalmente la *Tierra de Siena natural* y la *Tierra de Siena tostada*, y el ocre rojo y amarillo, además de tonalidades naranjas. En estas capas suelen ser frecuentes los poros de diversos tamaños (10 μm -100 μm), las fisuras y los despegues entre ellas y respecto a las capas superior e inferior.

- El color gris se ha conseguido aplicando sobre la imprimación una capa de yeso con abundantes impurezas de cuarzo y óxidos de hierro (SJEP13).
- El color amarillo se ha obtenido aplicando encima de la imprimación dos capas de yeso de un grosor total de 200 μm . En la capa superior el yeso se mezcló con carbonato de calcio, carbonato de plomo, y óxidos de hierro responsables del color amarillo (SJEP15). Se detectan despegues y poros inducidos por la disolución del yeso.
- Se han muestreado dos tonalidades de rojo (carnaciones), ambas extraídas de los pies de dos esculturas. En SJEP6 la carnación es rosa claro, debido a que se aplicó una capa roja sobre una blanca de yeso (Fig. 8.12A). En SJEP17 el color de la carne es rojo fuerte. Se consiguió aplicando dos capas rojas sobre la imprimación también rojiza (Fig. 8.12B). Ambas carnaciones están elaboradas con *blanco de plomo* que actúa como diluyente de los pigmentos coloreados que se añaden para imitar el color de la carne. En SJEP6 el único pigmento identificado es *rojo minio* (óxido de plomo), y en SJEP17 se detectan abundantes rojos de óxido de hierro, así como azules y negros, que debido a su naturaleza orgánica no se han analizado.
- En la elaboración del color azul se empleó un silicato de cobalto, pigmento denominado *azul de esmalte* (espectro nº1). Para obtener el azul claro se aplicó una capa de 45 μm de espesor sobre la capa de preparación de yeso (Fig. 8.13A y 8.13B). El grosor de la capa de color azul oscuro es el doble y se aplicó sobre las capas de imprimación rojizas (Fig. 8.14A y 8.14B).

Pintura mural

Por lo que respecta a las pinturas murales que cubren los elementos arquitectónicos y decorativos adyacentes a las esculturas, los colores analizados han sido :

- El color gris, elaborado con yeso (SJEP5 y SJEP11), se aplicó sobre la calcarenita en una capa de 140 μm de grosor medio. El tamaño de los granos del yeso oscila entre menos de 10 μm hasta cristales con hábito en "punta de flecha" de 120x30 μm . Además de yeso se han identificado óxidos de hierro, y en las zonas más alteradas sulfato de hierro (espectro nº2), producto de la reacción entre el yeso y los óxidos de hierro. Los fenómenos de disolución del yeso han favorecido las microfisuras y despegues. En la muestra SJEP11 calcarenita presenta incisiones y pintura roja similares a las detectadas en la parte inferior del Templo.
- El color ocre, con un grado de alteración tal, que además de contener numerosas sales, algunos de los elementos analizados son el producto de alteración de los componentes minerales originales de la pintura. El color se obtuvo de dos formas: una, aplicando sobre la calcarenita una capa compuesta principalmente por yeso y óxidos de hierro; otra, aplicando primero una capa de yeso y encima una de yeso con abundantes óxidos de hierro. En el primer caso, la capa tiene un espesor de unas 200 μm apreciándose con MOP una pasta o matriz elaborada con yeso y grumos de cal surcados por fisuras. Además se detectan áridos de dolomita, cuarzo, algunas micas y óxidos de hierro, responsables estos últimos de la coloración amarillenta. Las dimensiones y morfologías de los minerales descritos son bastante variadas. Un análisis minucioso mediante SEM en la muestra SJEP8 (muy alterada) ha confirmado la presencia de diversas sales y productos de alteración. Así, se han identificado sales de sulfato de sodio

(espectro nº3) con morfologías aciculares, masas informes de halita, carbonato sódico (espectro nº4), mezclas de estas sales, y cristales de sulfato de hierro.

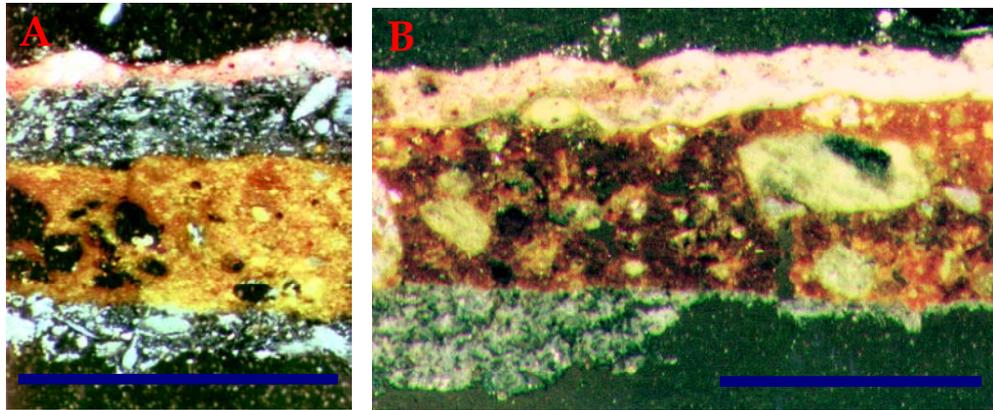


Figura. 8.12. Microfotografías realizadas con luz transmitida y polarizadores cruzados.
 A) Carnación obtenida por aplicación de una capa roja sobre fondo blanco (SJEP-6).
 B) Carnación elaborada por superposición de una capa blanquecina sobre una imprimación rojiza (SJEP-17). La barra equivale a 0.5 mm.

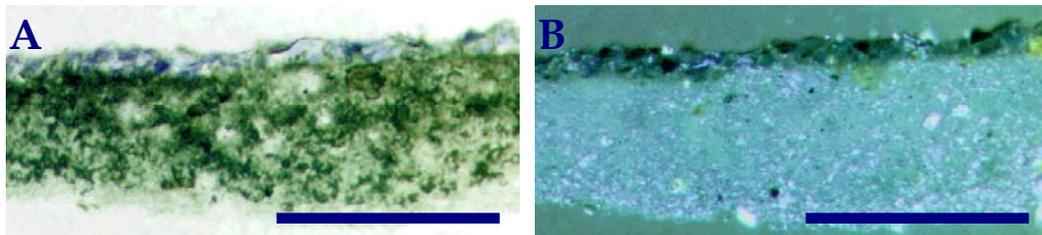


Figura. 8.13. Microfotografías realizadas con luz transmitida. Policromía azul claro (SJEP-7).
 Aplicación de "azul de esmalte" sobre preparación de yeso. A) Un polarizador. B) Polarizadores #.
 La barra equivale a 0.5 mm.

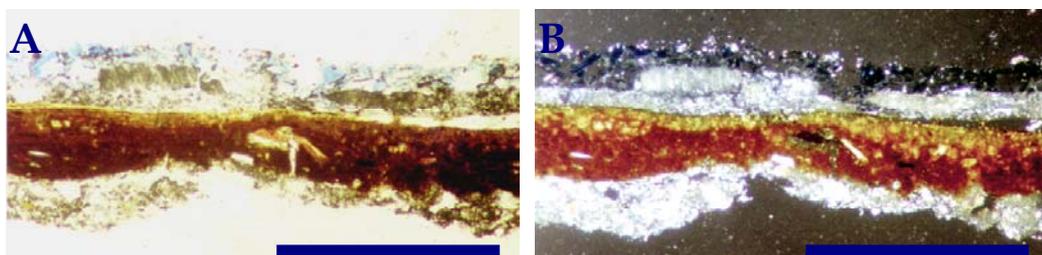


Figura 8.14. Microfotografías realizadas con luz transmitida. Policromía azul oscuro (SJEP-3).
 Aplicación de doble capa "azul de esmalte" sobre imprimación rojiza. A) Un polarizador.
 B) Polarizadores #. La barra equivale a 0.5 mm.

En el segundo caso, la preparación de yeso, de espesor máximo 800 μm , contiene además micas y óxidos de hierro. Los cristales de yeso presentan con frecuencia hábito en "punta de flecha" y alcanzan tamaños de hasta 45 μm . Los poros son escasos pero pueden aparecer conectados formando microfisuras. El aglutinante es abundante. La capa superior coloreada (150 μm) es de yeso, óxidos de hierro, algo de calcita y micas, cuya alteración da lugar a la formación compuestos tales como sulfatos de hierro y sulfatos de sodio.

- En la muestra correspondiente al color violáceo se ha detectado la capa de preparación de yeso, la imprimación rojiza de *Tierra de Siena tostada*, de nuevo una capa de yeso sobre la que se aplicó otra *Tierra de Siena tostada*. Por último, contiene una lámina de estaño (espectro n°5) de 65 μm , tan alterada física y químicamente que aparece formando cazoletas y con una tonalidad muy oscura a causa de la oxidación del estaño (Fig. 8.15A y 8.15B). Las capas de yeso tienen grandes cristales en "punta de flecha" y abundantes poros originados por la disolución del mismo, disolución que causa los desprendimientos que se observan en esta muestra.

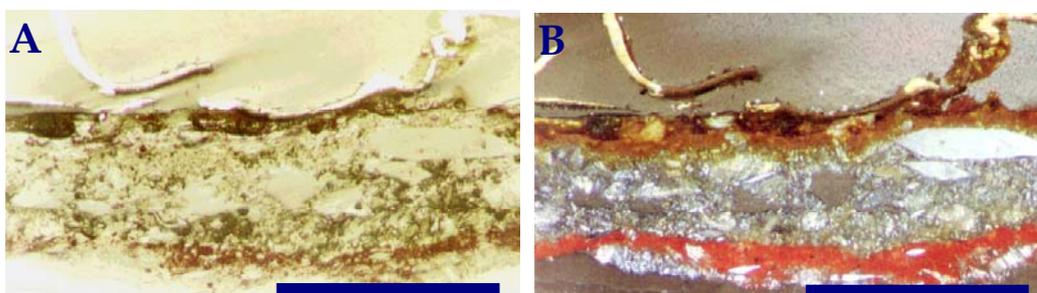


Figura 8.15. Microfotografías realizadas con luz reflejada. Muestra SJEP-1. A) Lámina de estaño en superficie, aplicada sobre imprimación rojiza (un polarizador). B) De abajo hacia arriba se observa una primera imprimación de Tierra de Siena Tostada, una capa de yeso, otra capa de Tierra de Siena Tostada y encima una lámina de estaño (polarizadores #). Barra = 0.5 mm.

- En la elaboración del dorado, primero se aplicó una capa de yeso, a continuación un *bol rojo* (arcillas ricas en hierro) y encima tres capas de una mezcla de yeso con carbonato cálcico. Existen escasos poros pero de gran tamaño (unas 185 μm) y no se detectan despegues. Por último se aplicó una lámina delgada (5 μm) de oro (espectro n°6). En su mayor parte el oro se ha perdido, apreciándose sobre él depósitos de partículas de suciedad (Fig. 8.16A y 8.16B).

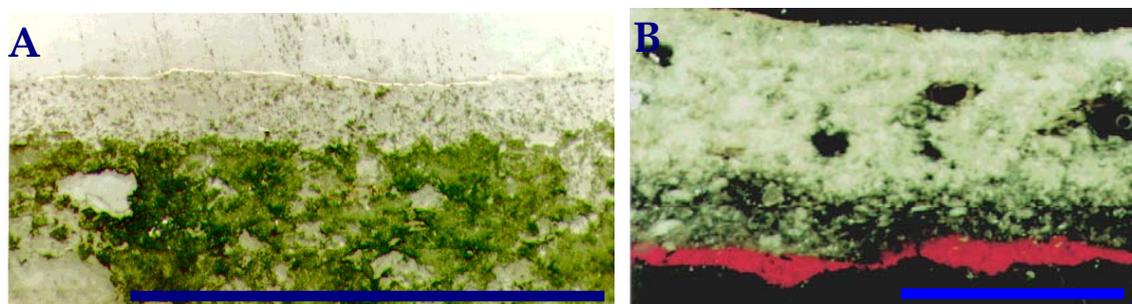


Figura 8.16. Microfotografías realizadas con luz reflejada. Muestra SJEP-2. A) Delgada película de oro en superficie (un polarizador). B) De abajo hacia arriba se identifica un bol rojo y una capa de yeso sobre la que se ha aplicado el oro (dorado "al mixtión") (polarizadores #). La barra equivale a 0.5 mm.

En la zona baja de la Iglesia se han muestreado las pinturas murales de las habitaciones laterales del altar, y el acceso a ellas. De la **habitación W** sólo se ha muestreado un color que es el gris. Para su obtención se aplicó sobre el revestimiento de cal y arena, una capa constituida por yeso, algo de calcita, cuarzo, y escasos pigmentos azules de *azul de ultramar* (azul de lapislázuli) y rojos de óxidos de hierro. Los cristales de yeso suelen ser de tamaño de grano bastante homogéneo, pequeños (poco más de 10 μm) y aciculares (Fig. 8.17A). El espesor aproximado de la capa es de 235 μm .

En la **habitación E** se han muestreado los colores gris oscuro, verde, y rojo oscuro. El gris se obtuvo aplicando sobre la calcarenita una delgada capa de carbonato cálcico con algo de yeso y arcillas, seguida de una capa rojiza de arcillas ricas en hierro y carbonato cálcico. Por último, aparecen de una a tres láminas de estaño desprendidas del sustrato y formando cazoletas. En la capa de arcillas se han detectado sulfatos de hierro como producto de alteración.

Para la obtención del color verde se aplicó sobre la calcarenita una delgada capa de carbonato cálcico y encima la capa pictórica. Mediante MOP se observa que la capa pictórica está constituida por grumos amarillentos y verdosos, presentando un elevado grado de alteración (Fig. 8.17B). El análisis efectuado ha revelado la existencia de cloruro de plomo, carbonato de plomo, grumos verdosos compuestos por Cr, Pb y Cl, y otros amarillentos constituidos por Cr, Pb y Ca. La lectura de los espectros ha sido complicada. El avanzado grado de alteración que presenta esta capa pictórica dificulta establecer qué pigmento o pigmentos fueron los originalmente empleados. Se estima que el pigmento utilizado fue el *amarillo de cromo*, que es un cromato de plomo que se vuelve verdoso con el tiempo. En la microfotografía realizada con SEM (Fig. 8.18) se puede ver la capa de carbonato cálcico sobre la que se ha aplicado la capa pictórica amarillenta. La alteración química es tan avanzada que ha originado cristales aciculares de cloruro de plomo (espectro nº7). La masa de cristalitos está compuesta por Cl, Cr y Pb (espectro nº8), que es un producto de reacción entre el cloro procedente de las sales de halita (tan abundantes en esta zona), y el pigmento *amarillo de cromo*.

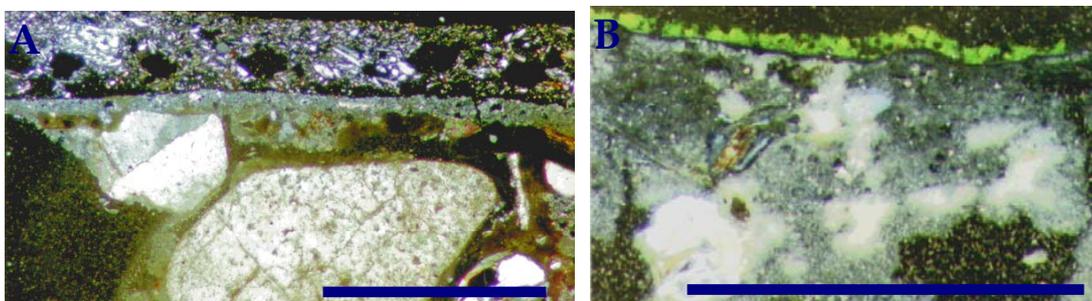


Figura 8.17. A) Microfotografía realizada con luz transmitida y polarizadores # Policromía gris sobre revestimiento de cal y arena (SJEP27). B) Microfotografía de luz reflejada y polarizadores # Policromía verdosa ("*amarillo de cromo*") aplicada sobre fondo de cal (SJEP23). Barra = 0.5 mm.

El color rojo se consiguió aplicando sobre la calcarenita dos capas elaboradas con yeso. La primera es más gruesa (unas 300 μm) y contiene arcillas. Los cristales de yeso suelen presentar hábito en "punta de flecha" y alcanzar grandes tamaños (140x45 μm). Los poros son subredondeados, numerosos, de unas 20-25 μm , y la mayoría están sellados por yeso secundario. La segunda capa sólo contiene yeso muy bien molido. En superficie las capas pictóricas son dos, están desprendidas del sustrato y aparecen en escamas. La más profunda es blanquecina y está constituida por *blanco de plomo*, detectándose cloruro de plomo como producto de alteración. La superficial es de color rojo oscuro compuesta por *blanco de plomo* con pigmentos rojos de óxido de hierro. También se ha detectado cloruro de plomo, además de partículas de suciedad que oscurecen el color superficial.

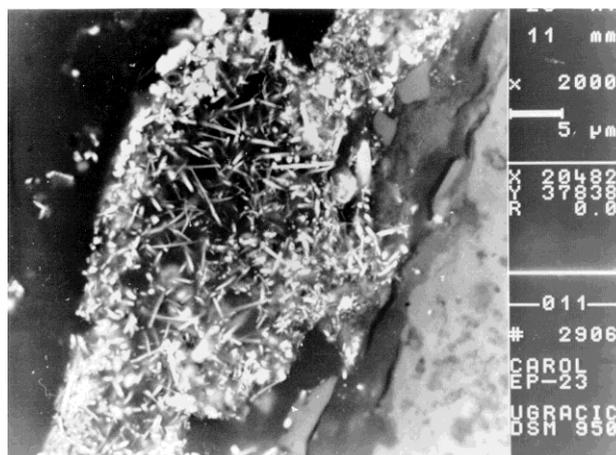


Figura 8.18. Microfotografía realizada con S.E.M. Detalle de crecimiento de cristales aciculares de cloruro de plomo como producto de la reacción entre el pigmento "amarillo de cromo" y las sales de halita (NaCl).

El análisis al SEM de muestras pictóricas procedentes de la zona de acceso a las habitaciones, ha puesto de manifiesto la existencia de carbonato de plomo, lo que confirma que el cloruro de plomo analizado en las calcarenitas soporte de estas pinturas proviene del pigmento *blanco de plomo*.

8.4 SALES

En este capítulo se presentan en primer lugar los resultados sobre la naturaleza y composición de las formaciones salinas de la Iglesia de San Jerónimo, y a continuación los resultados correspondientes a las sales muestreadas en el Hospital de San Juan de Dios y en la Iglesia del Perpetuo Socorro.

8.4.1 Estudio composicional y textural

En primer lugar se procedió a un examen visual minucioso de las sales *in situ*, con objeto de identificar diferentes formas cristalinas y de agregación según su lugar de aparición en los monumentos citados, e.g. zonas soleadas o sombrías, tipo de sustrato, zonas bajas o elevadas de los edificios, etc. Otro aspecto que se tuvo muy en cuenta durante el muestreo fue la altura de formación de las sales, puesto que su hábito y composición puede variar dependiendo de este parámetro (Arnold et al., 1990).

En la **Iglesia de San Jerónimo** las sales aparecen principalmente como agregados de cristales formando costras cristalinas u opacas en la zona baja con orientación E, y como agregados masivos pulverulentos con distinto grado de cristalinidad (opacas, traslúcidas y muy cristalinas) en la zona W baja del Templo y en el retablo. A continuación se realizó un primer reconocimiento del hábito de los cristales mediante lupa binocular, para identificar y separar cristales con un hábito "particular". La textura y composición se ha estudiado con más detalle mediante SEM y análisis de regresión múltiple. Se ha comprobado que las sales que crecen sobre o bajo calcarenita generalmente son pulverulentas y traslúcidas, en oposición a las eflorescencias masivas más cristalinas que se desarrollan en el suelo (entre baldosas), morteros y calizas grises, que es donde se identifican los hábitos más variados.

Con objeto de que la exposición de los resultados sea lo más clara y concisa posible, se presenta en primer lugar los resultados de la composición mineralógica de las sales (Tabla 8.15), indicándose la

forma de agregación cristalina dominante de la sal visualizada mediante lupa binocular. A continuación se presenta la composición química de algunas de las sales seleccionadas en la Iglesia de San Jerónimo.

Excepto en la habitación E y zona E del altar, en las que sólo se desarrolla halita (NaCl), las sales predominantes en el interior de la Iglesia de San Jerónimo son los sulfatos, epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y hexahidrita ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) fundamentalmente, y en menor medida yeso. La proporción de hexahidrita es menor en las zonas bajas del Templo mientras que en el retablo la cantidad de epsomita y hexahidrita es similar. Otros tipos de sales sólo han sido detectados de forma esporádica y en baja o muy baja proporción; básicamente son nitratita, carbonatos, bicarbonatos y sulfatos de sodio con distinto grado de hidratación. La zona de composición salina más uniforme resultó ser la zona W del retablo, donde únicamente se han identificado sulfatos de magnesio y calcio. En general las sales aparecen en forma de subeflorescencias, por lo que su efecto destructivo es mayor al generar presiones de cristalización bajo el sustrato.

Se aprecia que existe una cierta relación entre la composición mineralógica de las sales y la forma de agregación cristalina con que aparecen en el monumento. Así, los sulfatos de magnesio y el yeso se presentan como masas pulverulentas de cristalitos generalmente de baja cristalinidad (opacos o traslúcidos); los nitratos de sodio y/o potasio lo hacen como agregados masivos de sales muy cristalinas; y por último la halita cristaliza con las formas anteriores, pero principalmente formando costras desde opacas a muy cristalinas (en función de su espesor) que pueden alcanzar hasta más de 3 cm.

En el Hospital de San Juan de Dios y en la Iglesia del Perpetuo Socorro la composición de las sales es más variada (Tabla 8.16). En el **Hospital de San Juan de Dios** sólo se ha detectado formación de sales en el segundo patio, aflorando siempre como masas pulverulentas con diferente cristalinidad. Predominan las eflorescencias de yeso traslúcidas y las sales de nitrato potásico más cristalinas. En el primer patio no hay evidencias de desarrollo de sales, consecuencia de las sucesivas y recientes restauraciones de las pinturas murales que lo cubren (finales del siglo XX). No obstante, en el zócalo de azulejos valencianos aparecen puntualmente sales originadas por la utilización de cemento Portland en la unión de azulejos degradados. El estado de conservación de éstos, su caracterización, así como el de las eflorescencias desarrolladas, ha sido estudiado por Sánchez Navas et al. (1992).

En la **Iglesia del Perpetuo Socorro** los sillares de calcarenita del zócalo del edificio, restaurados hasta una altura de 2.5-3 m, se han cubierto por un revoco que imita la calcarenita. Las sales aparecen entre los sillares y dicho revoco, o directamente sobre éste último. La composición de las sales muestreadas es diferente dependiendo de su orientación en la Iglesia, observándose igualmente cierta relación entre su composición y la agregación de sus cristales. Así, en la zona E predominan las eflorescencias fibrosas cristalinas de nitratita muy adheridas al sustrato; en la pared N abundan las masas granulares traslúcidas de hexahidrita y halita, aunque ésta también cristaliza como acículas formando agregados radiales, duras, muy cristalinas y difíciles de desprender del sillar. En la zona W (altar) predominan los agregados pulverulentos cristalinos de níter, y en el paramento S los agregados masivos o granulares traslúcidos de hexahidrita, halita y yeso.

Tabla 8.15. Composición mineralógica de las sales del interior de la Iglesia de San Jerónimo (X: mayoritarios; x: minoritarios; *: traza. Hl: Halita, Ep: Epsomita, Hex: Hexahidrita, Gp: Yeso. Otras sales : Sid: Siderita, Ther: Termonatrita, Then: Tenardita, Nat: Natrón, Nac: Nacolita, Nt: Niter, Nit: Nitratita, Dol: Dolomita, Mgs: Magnesita.

Habitación E	Estado de agregación	Hl	Ep	Hex	Gp	Otras sales	
SJS7	costra opaca	X					
SJ10	pulverulenta opaca	X					
SJS11	pulverulenta traslúcida	x					
SJS12	idem y costra cristalina	x					
SJS30	pulverulenta traslúcida	X					
SJS31	idem y costra cristalina	X					
SJS57	pulverulenta opaca			X			
SJS58	idem			X	X		
SJS60	idem traslúcida			X	*		
SJS61	idem opaca			x	X		
SJS62	idem traslúcida			X	x		
SJS63	idem			X			Sid.
SJS64	idem			X	X		
SJS65	idem			X	X		Ther., Then.
SJS66	idem	X					
SJS67	costra cristalina	X					
SJS70	idem	X					
SJS71	pulverulenta cristalina	X					
SJS72	idem	X					
SJS73	costra opaca	X					
SJS85	pulverulenta traslúcida	X					
SJS86	idem, cristalina	X					
SJS90	pulverulenta opaca		X	*	*		
SJS113	pulverulenta y costra cristalina	X					
SJS114	costra opaca	X					
SJS115	idem	X					
SJS116	pulverulenta cristalina	X					
SJS117	idem	X					

Habitación W	Estado de agregación	Ep	Hx	Gp	Nit	Nt	Otras sales
SJS13	pulverulenta traslúcida	*	X	x			
SJS14	idem cristalina		X	*			Nat.
SJS15	idem		X	*			
SJS16	costra traslúcida		X	*			
SJS32	pulverulenta cristalina		X	*			
SJS33	idem traslúcida		X	*			
SJS33c	pulverulenta cristalina	*	X	*			
SJS82	costra cristalina		X	*	*	*	Nac., Ther.
SJS83	idem				X		
SJS84	pulverulenta cristalina	*	X	*			
SJS87	idem			*	X	x	Ther.
SJS104	idem				X	*	
SJS105	idem				X	*	
SJS106	idem		X	*			
SJS107	idem				X	*	
SJS108	idem		X	*			
SJS119	idem				X	*	

Tabla 8.15 (continuación). Composición mineralógica de las sales del interior de la Iglesia de San Jerónimo (X: mayoritarios; x: minoritarios; *: traza.

Altar E	Estado de agregación	HI			
SJS19	costra opaca	X			
SJS74	pulverulenta traslúcida	X			
SJS75	costra opaca	X			
SJS76	pulverulenta traslúcida	X			
SJS111	costra opaca	X			
SJS112	pulverulenta traslúcida	X			
SJS118	costra opaca	X			

Altar W	Estado de agregación	Ep	Hx	Gp	Otras sales
SJS17	pulverulenta cristalina		X	*	
SJS18	idem traslúcida		X	*	
SJS77	idem cristalina		X	x	
SJS78	idem opaca		X	*	
SJS79	idem		X	*	
SJS80	idem traslúcida		X	*	Ther.
SJS81	idem cristalina		X	*	Nt.
SJS88	idem traslúcida	x	X	*	Nit.
SJS89	idem	x	X	x	
SJS109	idem opaca		X		
SJS110	idem		X	X	Nt., Ther.

Retablo E	Estado de agregación	Ep	Hx	Gp	Otras sales
SJS5	pulverulenta traslúcida		X	*	
SJS6	idem		X	x	
SJS9	idem	X	x	x	
SJS36	idem	X	*	*	
SJS37	idem	X	X	x	
SJS38	idem	X	X	x	
SJS39	idem	X	x	*	
SJS40	idem	X	x	*	
SJS41	idem	X	x	*	
SJS42	idem	X	X	*	
SJS43	idem	X	x		
SJS44	idem	*	*	X	Ther.
SJS45	idem	*	X	*	
SJS46	idem	x	x	*	Nac.
SJS47	idem	x	x		
SJS48	idem	*	X		
SJS49	idem	X	x		Dol., Mgs.
SJS50	idem	X	x	x	Dol., Mgs.
SJS51	idem	x	x	X	
SJS52	idem	x	X		
SJS53	idem	x	X	*	
SJS100	idem		X		Nt., Tr.
SJS103	idem		X		

Tabla 8.15 (continuación). Composición mineralógica de las sales del interior de la Iglesia de San Jerónimo. X: mayoritarios; x: minoritarios; *: traza. Hl: Halita, Ep: Epsomita, Hex: Hexahidrita, Gp: Yeso. Otras sales: Sid: Siderita, Ther: Termonatrita, Then: Tenardita, Nat: Natrón, Nac: Nacolita, Nt: Niter, Nit: Nitratita, Dol: Dolomita, Mags: Magnesita.

Retablo W	Estado de agregación	Ep	Hx	Gp
SJS1	pulverulenta opaca		X	X
SJS2	Idem	x	X	X
SJS3	idem opaca	x	X	*
SJS4	idem	X		X
SJS8	idem cristalina			X
SJS20	idem traslúcida	*	X	
SJS21	idem	X	x	*
SJS22	idem	X	X	*
SJS23	idem	x	X	
SJS24	idem	X	x	*
SJS25	idem	X	x	*
SJS26	idem	x	X	X
SJS27	idem	x	X	X
SJS28	idem	X	x	
SJS29	idem	X	X	
SJS34	idem	X	X	
SJS35	idem	X	*	
SJS101	idem		X	
SJS102	idem		X	X

Tabla 8.16. Composición mineralógica de las sales muestreadas en el Hospital de San Juan de Dios y en la Iglesia del Perpetuo Socorro. X: mayoritarios; x: minoritarios; *: traza. Gp: Yeso, Nit: Nitratita, Nt: Níter, Ant: Antarticita, Then: Tenardita, Aph: Aftitalita, Nac: Nacolita, Tr: Trona, Hl: Halita, Hex: Hexahidrita, Ther: Termonatrita.

Hospital San Juan de Dios

	Estado de agregación	Gp	Nit	Nt	Ant	Then	Otras sales
JDE1	pulverulenta traslúcida	X	x	x	*	*	Ther., Aph., Nac., Tr.
JDE2	Idem	X		*	*	*	
JDE3	idem cristalina	x		X	*	*	Arc., Tr.
JDE4	Idem	x		X	*		Ther., Nac., Then.
JDE5	Idem	*	*	X			

Iglesia del Perpetuo Socorro

	Estado de agregación	Gp	Nit	Nt	Hal	Hex	Otras sales
PSE1	eflor. dura cristalina		X	x		x	Nac., Ther., Arc.
PSE2	pulverulenta traslúcida			x		x	Arc., Ther., Nac.
PSE3	Idem	*		*		X	Nac.
PSE4	Idem		*	*		X	Ther.
PSE5	Idem		*		X		Tr.
PSE6	Idem		x		X		Tr.
PSE7	eflor. dura cristalina			x	X		
PSE8	pulverulenta cristalina	*		X		x	Nac.
PSE9	idem traslúcida	X				*	Then.
PSE10	idem	*	*			X	Ant.
PSE11	idem	*	*		*	X	

La composición química de las sales de la Iglesia de San Jerónimo se muestra en la Tabla 8.17. Los resultados se presentan en forma de tanto por ciento de miliequivalentes (% meq), para facilitar el balance entre contenido en aniones y cationes. El objeto de haber realizado un análisis químico de la totalidad de la sal muestreada es detectar la existencia de elementos químicos que, debido a su baja proporción en la sal, no son identificados mediante XRD como fases minerales. Su presencia puede sugerir que las sales no son monocomposicionales, y por otro lado, que en las muestras en las que se encuentran estos elementos pueden existir en baja proporción cristales en cuya composición intervengan los citados elementos, y que seguramente poseen un hábito distinto al de la masa salina.

La proporción de Na^+ es más abundante en las sales compuestas por halita y nitratita, así como el ión Cl^- y el ión NO_3^- respectivamente. En la halita el Na^+ oscila entre 0.94-1.6% meq y el Cl^- entre 1-2% meq. En la nitratita se ha detectado un 0.81% meq de Na^+ y un 0.72% meq. de NO_3^- . En algunas muestras de la zona baja de la Iglesia (SJE67, SJE83, SJE17, SJE18 y SJE78) se ha encontrado cierta cantidad de K^+ (0.2-0.7% meq) y NO_3^- (0.2-0.4% meq) que sugiere la existencia de sales de nitrato potásico. Mediante SEM se ha comprobado que en estas muestras existen cristales con diversos hábitos y distintos a los identificados con XRD. La cantidad de Ca^{2+} debe relacionarse principalmente con la presencia de yeso (no se han analizado los carbonatos y los bicarbonatos de los que el Ca puede formar parte). En las sales en las que existe yeso los valores de Ca^{2+} detectados oscilan entre 0.04-0.5% meq. La proporción de Mg^{2+} en las sales compuestas por epsomita y hexahidrita varía entre 0.31-1.64% meq, y la cantidad de ión SO_4^{2-} entre 0.45-1.25% meq.

En la Tabla 8.18 se presentan los hábitos de las sales y sus estados de agregación en la Iglesia de San Jerónimo y en el Hospital de San Juan de Dios. Así mismo, se incluyen en dicha tabla las muestras en las que se han identificado los hábitos, y el resultado del análisis químico realizado con SEM. Hay que anotar que los análisis son puntuales, por lo que se ha considerado que las sales son de composición simple polifásica o dobles cuando se detectan más de dos elementos. Estos se presentan por orden de abundancia, habiéndose realizado varios análisis en algunos cristales. Los espectros EDX obtenidos con SEM se adjuntan en el Anexo II al final de este Trabajo.

La halita es el componente mayoritario de las eflorescencias de aspecto suelto, formadas por agregados masivos o granulares de cristales. Los agregados semejantes pero menos cristalinos (cristales traslúcidos u opacos) están compuestos principalmente por sulfatos de magnesio. En los capilares o cristales con hábito filiforme (*wiskers*) los elementos más abundantes son S, Ca, Cl y K, independientemente de que los cristales sean rectos, curvados o enrollados. Los triquitos o peinetas son agregados formados por una costra de la que crecen capilares o cristales como pelos (Fig. 8.19). El SEM ha detectado que tanto la masa cristalina que forma la costra como los capilares están compuestas por K y S, pero en diferente proporción. Esta proporción y la limitación del SEM para analizar N, C y O induce a pensar que la costra y los capilares tienen composiciones mineralógicas diferentes. También se han identificado agregados subparalelos de cristales aciculares; en este caso su composición varía según el lugar de extracción de la sal del edificio. Los agregados de la zona W están compuestos por S y Mg (corresponde a sulfato de magnesio); en las acículas de la zona E se han detectado K y S, y en los cristallitos granulares a ellas adosadas K, S y Na. En las formas lenticulares se ha encontrado K, y muy escasa proporción de S, por lo que considera que su composición corresponde a un nitrato de potasio, que estaría más acorde con el hábito identificado. El nitrato de potasio cristaliza en el sistema ortorrómbico, una de cuyas formas es la bipirámide romboidal

Únicamente se ha identificado una forma geométrica ideal, es decir, la forma cristalina de equilibrio de un cristal sin ningún tipo de deformación. Son cubos compuestos por Na y Cl que corresponden a halita. Las costras cristalinas y los *wiskers* son claros ejemplos de sales simples. En el resto de las sales los elementos químicos detectados dan idea de su carácter compuestos, incluso cuando únicamente se ha encontrado K y S, ya que las diferentes proporciones en que aparecen sugieren la existencia de nitrato y/o carbonato.

Tabla 8.17. Composición química en % meq (miliequivalentes) de las sales del interior de la Iglesia de San Jerónimo.

	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Habt. E							
SJE12	0.94	0.01	0.08		1.00	0.01	0.04
SJE60		0.01	0.50	0.36	0.03	<0.01	0.70
SJE61		0.01	0.50	0.49	<0.01	0.01	1.16
SJE62		0.01	0.14	0.92	<0.01	0.01	1.00
SJE63		0.03	0.02	0.82	<0.01	0.05	0.90
SJE64	0.02	0.01	0.08	0.43	<0.01	0.04	0.54
SJE65	0.02	0.02	0.14	0.77		0.02	0.82
SJE67	1.18	0.26			1.20	0.40	0.01
SJE73	1.60	<0.01			2.00	<0.01	<0.01
Habt. W							
SJE13		0.07	0.19	0.98	0.01	0.09	1.01
SJE14	0.08	0.02		0.31	0.03	0.12	0.45
SJE16		0.01	0.10	1.14	<0.01	0.01	1.02
SJE32	0.01	0.01	0.09	1.11	<0.01	0.01	1.11
SJE82	0.02	0.18	0.14	0.80	0.01	0.03	0.95
SJE83	0.81	0.20	0.09		0.10	0.72	0.10
SJE84	0.03	0.01	0.13	0.98	<0.01	0.05	1.03
Altar W							
SJE17	0.09	0.70	0.04	0.80	<0.01	0.20	0.51
SJE18	0.05	0.70	0.20	1.00	<0.01	0.25	0.92
SJE77	<0.01	0.01	0.38	0.71	<0.01	0.02	1.05
SJE78	<0.01	0.18	0.18	0.82	0.01	0.30	1.07
SJE79		0.01	0.13	0.68	0.01	0.10	0.82
SJE80	0.06	0.02	0.08	0.73	<0.01	0.09	0.70
SJE81		0.01	0.12	0.76	0.01	0.02	0.90
Retablo E							
SJE36		0.01	0.32	0.79	<0.01	<0.01	1.20
SJE37		0.02	0.30	0.87	<0.01	0.01	1.30
SJE38		0.06	0.47	0.56	<0.01	0.01	1.25
SJE39		0.03	0.21	0.83	<0.01	0.02	1.23
SJE40		0.01	0.06	0.96	0.01	<0.01	1.10
SJE42		0.01	0.30	1.64	<0.01	<0.01	0.86
SJE44	0.04	0.10	0.22	0.26	<0.01	0.01	0.73
SJE45		0.01	0.03	0.87	0.01	0.02	1.02
SJE48	<0.01	0.01	0.07	0.75	<0.01	0.02	0.80
SJE51	0.05	0.01	0.40	0.35	<0.01	0.08	1.21
SJE53	<0.01	0.02	0.27	0.48	0.01	0.02	0.73
Retablo W							
SJE20	<0.01	0.009	0.04	0.90	<0.01	0.01	0.90
SJE21	0.06	0.015	0.05	0.50	0.01	0.10	0.52
SJE22		0.02	0.15	0.37	0.01	<0.01	1.10
SJE24	0.03	<0.01	0.02	1.10	<0.01	0.04	1.03
SJE25		0.01	0.05	1.06	<0.01	<0.01	0.98
SJE26	0.006	0.08	0.14	0.58	0.02	<0.01	0.61
SJE28		<0.01	0.02	1.03	0.01	<0.01	1.03
SJE29		0.03	0.03	0.68	<0.01	0.01	1.11

Tabla 8.18. Hábito, estado de agregación y composición química (SEM) de los cristales. () = baja proporción.

Hábito y Estado agregación	Ubicación	Muestra	SEM
<i>Agregados pulverulentos de cristales hipidiomorfos (elevada cristalinidad)</i>			
	Habitación E	SJE11, 12, 30, 66, 67, 70, 71, 72, 73	Na, Cl, (K, Ca)
	Altar	SJE17, 18	
	Habitación W	SJE15	
<i>Agregados compactos de cristales hipidiomorfos (costra)</i>			
	Habitación E	SJE31	Na, Cl
<i>Agregados pulverulentos de cristales poco cristalinos</i>			
	Habitación E	SJE31 SJE63	Na, Cl, (K, Ca)
	Habitación W	SJE16, 32, 33, 82	
	Retablo E	SJE47	S, Mg, (K, Ca)
	Retablo W	SJE28	S, Mg, (Ca)
<i>Wisker curvo</i>			
	Habitación E	SJE31 SJE71, 90	Ca, Cl, S, K S, Ca, (Cl, Mg, K)
	Altar	SJE17, 80	
	Habitación W	SJE14, 32, 33, 82, 84, 87	
	Retablo W	SJE28 SJE24,25	S, Cl, Mg, Ca, Na, K Cl, S, K, Ca, Mg, Na
<i>Wisker recto</i>			
	Habitación E	SJE12, 30, 31, 63, 64, 65, 67, 70, 72, 73, 86, 90	Na, Cl
	Altar	SJE17, 18, 45, 74, 75, 76, 77, 80, 89	
	Habitación W	SJE13, 14, 15, 16, 32, 33, 82, 83, 84, 87	Cl, K, S, Ca, Na, (Mg) Cl, Mg, K, S, Na S, Cl, Ca, K, Na, Mg Cl, Mg, K, S, Na Cl, Ca, K, S, Mg, Na
	Retablo E	SJE25, 37	
Triquitos			
	Habitación E	SJE11, 30, 31, 66	Acículas: K, (S) Masa cristales: K, S
	Habitación W	SJE14,32	
<i>Agregados paralelos de cristales aciculares</i>			
	Habitación E	SJE11, 12, 30, 31, 66	Acículas: K, (S) Masa cristales: K, S, Na
	Altar	SJE17, 18, 78, 80, 81, 89	
	Habitación W	SJE14, 15, 16, 32, 33, 82, 84	S, Mg
	Retablo E	SJE41	
	Retablo W	SJE25, 26, 28	
	Hospital San Juan de Dios	JDE1, 2, 3, 4, 5	Acículas: K Masa cristales: K, S, Na
<i>Cubos</i>			
	Habitación E	SJE31	Na, Cl
<i>Habito lenticular</i>			
	Habitación E	SJE47	K, (S)

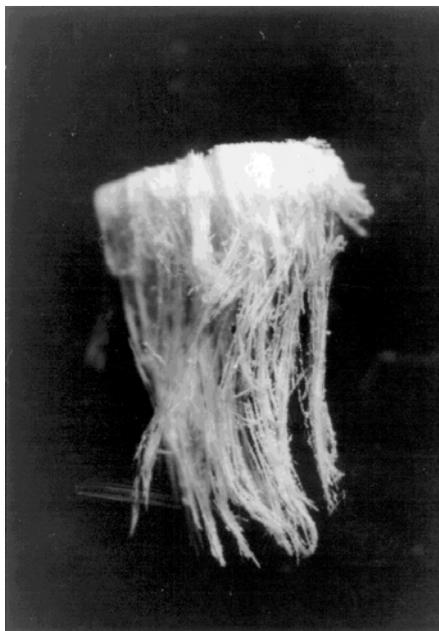


Figura. 8.19. Microfotografía realizada con lupa binocular. Triquito o peineta formado por una costra de la que crecen capilares o cristales como pelos (SJE31). El ancho de la fotografía es de 1.5 mm.

8.4.2 Determinación de las fases minerales

El problema que conlleva la determinación de fases minerales, y su posible cuantificación a partir de los análisis de SEM de las sales, es doble:

- por un lado, el clásico problema de una mezcla, es decir, de repartir los distintos componentes químicos de una mezcla entre fases. Este problema suele no tener una solución única, siendo mayor el número de posibilidades o combinaciones de fases en las proporciones convenientes que explican la mezcla, cuanto mayor es el número de fases que pueden contener esos elementos químicos,
- la segunda dificultad es específica de las sales, y se debe a que algunos de los aniones no se detectan en el análisis realizado por el SEM (e.g. CO_3^{2-} , NO_3^-).

El análisis estadístico descrito en el capítulo 2 se ha aplicado a la composición de los cristales que aparecen en la Tabla 8.18. El primer paso ha sido elegir el conjunto de fases minerales atendiendo a la composición química resultante. La forma de reducir el número de posibilidades (que vienen dadas por los dos problemas antes mencionados) se ha hecho en base a cuatro criterios:

- comprobar las compatibilidades de las fases presentes, considerando las distintas condiciones de cristalización (T y HR) en que aparecen en la naturaleza las diversas sales,
- los datos previos obtenidos por XRD son determinantes en la elección de las fases,

- los datos relativos a aniones no detectados mediante SEM se conocen por la cromatografía iónica, proporcionando una información imprescindible en la elección de las fases minerales, y por último,
- el mismo modelo estadístico proporciona un dato relativo a la validez de la elección de las fases. Concretamente el error cuadrático será mínimo o nulo en el caso de que la elección sea correcta o muy próxima.

En la Tabla 8.19 aparecen los resultados obtenidos para las muestras indicadas tras la aplicación del análisis de regresión múltiple seguido. En dicha Tabla se presenta la composición cuantitativa de las fases minerales con mayor probabilidad de aparecer, la validez de la composición en forma de error cuadrático medio y el hábito del cristal analizado. El margen de error considerado para el establecimiento de una solución óptima en términos de asociación de especies salinas es $\leq 10^{-1}$ (10%). Así mismo, cuando el error del análisis estadístico es $< 10^{-10}$ se ha optado por poner 0. Se indica también el nº del espectro (SEM) que ha permitido estos resultados, espectros que se recogen en el anexo II de este Trabajo.

Puesto que con el SEM no se puede saber si existen nitratos y/o carbonatos, y además el análisis de regresión múltiple no es capaz de diferenciarlos, se ha creído necesario añadir una columna de comentarios que justifican la presencia de uno u otro, en cuyo caso se indica la fase en la columna correspondiente. Observaciones adicionales hacen referencia a la existencia de otras fases, cuyos componentes tampoco son detectados con SEM, tal es el ión amonio.

Tabla 8.19. Composición mineralógica cuantitativa de las fases minerales de cristales con hábitos distintos. Determinación mediante análisis de regresión múltiple. El sulfato de magnesio es epsomita, el sulfato de calcio es yeso, y el sulfato de sodio es thenardita. A.Q. = Análisis Químico

Hábito y/o estado agregación	Muestra	Espectro	Fases (%)	Error	Comentario
<i>Costra</i>	SJE31	9	NaCl	0	
<i>Agregado pulverulento poco cristalino</i>	SJE31	10	NaCl = 83.7% NaNO ₃ = 13% Ca(NO ₃) ₂ = 3.2% KNO ₃ = 0.1%	0	Debe ser NO ₃ ⁻
	SJE47	11	MgSO ₄ = 78.2-81% MgCO ₃ = 15.5-15.8% NO ₃ ⁻ o SO ₄ ⁼ o CO ₃ ⁼ de K = 2% NO ₃ ⁻ o SO ₄ ⁼ o CO ₃ ⁼ de Ca = 1%	0	XRD = no identifica NO ₃ ⁻ pero sí magnesita
	SJE28	12	MgSO ₄ = 75.4-77.1% MgCO ₃ = 21.4-21.5% SO ₄ , NO ₃ ⁻ o CO ₃ ⁼ de Ca=1.7-2.6%	0	A.Q. = no detecta NO ₃ ⁻
<i>Wisker recto</i>	SJE31	16	NaCl=100%	0	
	SJE32	17	NaCl=41.3% MgSO ₄ =15% KNO ₃ =12.5% MgCO ₃ =20.3% NaNO ₃ =10.9%	0	A.Q. = detecta NO ₃ ⁻
		18	S ₇ (Cl,Ca,K,Mg,Na)	7.36	Sin solución óptima. Espectro sugiere existencia de sulfato amónico. A.Q = detecta NO ₃ ⁻
		19	NaCl=44.8% MgSO ₄ =10.7% KNO ₃ =16.1% MgCO ₃ =26.9% NaNO ₃ =2.2%	0	
	SJE16	20	NaCl=45% MgSO ₄ =11.3% KNO ₃ =1% MgCO ₃ =26.5% NaNO ₃ =1.7%	0	
SJE25	21	NaCl=58% MgSO ₄ =6% MgCO ₃ =3.6% NaNO ₃ =0.4% CaCO ₃ =18%	0		

Tabla 8.19. (Continuación) Composición mineralógica cuantitativa de las fases minerales de cristales con hábitos distintos. Determinación mediante análisis de regresión múltiple. El sulfato de magnesio es epsomita, el sulfato de calcio es yeso y el sulfato de sodio es thenardita. A.Q. = Análisis Químico.

Hábito y/o estado agregacion	Muestra	Espectro	Fases(%)	Error	Comentario
<i>Wisker curvo</i>	SJE31	13	Ca, Cl, S, K	11.19	Sin solución óptima. Debe existir cloruro de Ca
		14	S, Ca, Cl, Mg, K	2	
	SJE28	15	NaCl = 20.6% MgSO ₄ = 60.8% KNO ₃ = 3.7% MgCO ₃ = 4.5% NaNO ₃ = 0.6%	0	XRD = no identifica NO ₃ ⁻
<i>Triquito</i>	SJE31	22 (costra)	K ₂ SO ₄ = 75.7% KNO ₃ = 24.3%	0	XRD y A.Q. = detectan alta % de NO ₃ ⁻
		23 (acículas)	K ₂ SO ₄ = 17% KNO ₃ = 83%	0	
<i>Agregados Paralelos de Cristales Aciculares</i>	SJE31	24 (acículas)	K ₂ SO ₄ = 2.1% KNO ₃ = 97.8%	0	XRD y A.Q. = detectan alta % de NO ₃ ⁻ en cristales de hábito muy variado, sugiriendo que existe NO ₃ ⁻ y no CO ₃ ⁼ .
		25 (masa cristales)	K ₂ SO ₄ = 67% KNO ₃ = 11.4% NaNO ₃ = 21.6%	0	XRD = detecta sulfato amónico
			K ₂ SO ₄ = 77.4% KNO ₃ = 19.4% NaNO ₃ = 3.2%	0	
	SJE32	25	MgSO ₄ = 100%	0	
	JDE3	26 (acículas)	KNO ₃ = 100%	0	XRD = detecta Níter
27 (masa cristales)		K ₂ SO ₄ = 75.1% KNO ₃ = 21.7% NaNO ₃ = 3.2%	0		
<i>Cubos</i>	SJE31	9	NaCl = 100%	0	
<i>Habito Lenticular</i>	SJE47	28	K ₂ SO ₄ = 1.6% KNO ₃ = 98.4%	0	K ₂ CO ₃ es monoclinico y así no origina formas lenticulares.

9 DISCUSION Y CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan en primer lugar las conclusiones sobre los materiales estudiados que se han empleado en la construcción de la Iglesia de San Jerónimo. Estas conclusiones se relacionan con sus características composicionales, texturales y mecánicas, así como el modo de elaboración en el caso de los materiales artificiales (morteros y policromías), y la procedencia de las materias primas. A continuación se exponen las conclusiones generales considerando la interacción entre los materiales y su entorno (factores estructurales, ambientales, etc.). Así, se realiza una exposición de los fenómenos y causas que pueden haber originado las distintas formas de alteración, concediendo especial importancia a los fenómenos que originan el desarrollo de sales en áreas restringidas de la Iglesia de San Jerónimo.

9.1 CALCARENITAS

9.1.1 Composición

Por lo que respecta a su alteración superficial, el proceso predominante es la formación de yeso o costras sulfatadas, que da una idea del grado de deterioro de las calcarenitas. En la Iglesia de San Jerónimo no se ha detectado la formación de "costras negras", aunque sí estados incipientes de éstas, tales como depósitos de polvo y "costras grises". Por otra parte, y seguramente relacionado con este hecho, no se ha constatado un enriquecimiento en superficie de elementos como el Sr, Ba u otros de la serie de transición, tal y como algunos autores han puesto de manifiesto en los estudios realizados en costras en la Catedral de Granada (Rodríguez Navarro, 1994). Así mismo, las cantidades de Pb

detectadas son más elevadas en el interior de la Iglesia. En concreto, se han encontrado en calcarenitas policromadas de la zona inferior del Templo, en las que se identificó mediante SEM sales de cloruro de plomo. El plomo procede del pigmento con que se elaboró la pintura (*blanco de plomo*), y el ión cloruro proviene de la halita, muy abundante en esta zona.

9.1.2 Sistema poroso

Por lo que concierne a los datos de porosidad total obtenidos en las calcarenitas del monumento, son inferiores en algunos casos a los determinados por otros autores para los distintos tipos de calcarenita de cantera (Rodríguez Navarro, op. cit.; Durán Suárez, 1996). Este hecho, que en apariencia puede parecer contradictorio por el elevado grado de alteración que presentan algunas muestras del Monasterio, tiene su explicación. En primer lugar hay que asumir la heterogeneidad porosimétrica de la calcarenita, y por tanto, que los valores medios propuestos por los citados autores para sus litotipos ensayados sólo tienen una validez relativa. Por otro lado, y en lo que se refiere a la diversidad de configuraciones identificadas del sistema poroso, pueden haberse producido por el distinto grado y tipo de alteración sufrido por las calcarenitas muestreadas, sin olvidar que es difícil la adscripción de éstas a un tipo determinado de calcarenita de cantera.

En las calcarenitas del interior de la Iglesia, excepto algunos ejemplos en los que se ha diagnosticado desintegración por pulverización, la porosidad total detectada llega a alcanzar valores anormalmente elevados en algunas muestras (45.07%), y por contra, en otras es inferior a la porosidad medida para los diferentes tipos (10.44%). Además de las circunstancias anteriormente expuestas, hay que considerar el efecto que el desarrollo de sales ejerce sobre el sistema poroso. Mediante SEM se ha comprobado que algunas de estas sales tapizan las paredes de los poros, llegando en ocasiones a sellarlos, por lo que la porosidad total disminuye. En este punto entran en juego las "presiones de cristalización" ejercidas por las sales cuando se localizan en el seno de un material. En la Iglesia se ha comprobado que un mismo tipo de sal (hexahidrita y/o epsomita) desarrollada en idéntico sustrato (calcarenita) produce unas veces su desmoronamiento y otras parece compactar la roca, al rellenar sus huecos. Por las observaciones realizadas, éste sería un estado anterior a la pulverización de la roca.

En la variación de la configuración del sistema poroso de las calcarenitas del monumento (independientemente que sean del interior o exterior) han intervenido otros fenómenos puestos de manifiesto mediante el estudio microscópico (MOP y SEM). Así, la disolución del cemento calcítico en las calcarenitas del interior de la Iglesia se ha originado por el agua de ascenso capilar o la de infiltración por gravedad. Los procesos de disolución del cemento calcítico y cámaras de los bioclastos son más frecuentes y acusados en las calcarenitas del exterior del edificio, debido al ataque de soluciones ricas en CO₂. El fenómeno de disolución del cemento calcítico se traduce en un aumento de la porosidad y en la generación de microporos. Otro proceso a considerar es la formación de nuevas fases como el yeso y la precipitación de cemento calcítico secundario. Su origen se debe a la masiva disolución de CaCO₃ y posterior precipitación de carbonatos en el seno poroso de la calcarenita. El resultado es una disminución de la porosidad total de la roca que lleva aparejado un aumento relativo del volumen de microporos. Los microporos no se han originado en este caso por disolución de cemento, sino que son consecuencia de la reducción del tamaño de los macroporos.

9.1.3 Proceso de deterioro

Se ha comprobado mediante MOP y SEM que la descohesión de la calcarenita se origina principalmente por la disolución del cemento calcítico que ocasiona una pérdida de material por disgregación granular. Pero el principal proceso de deterioro que sufre la calcarenita en el exterior del edificio es de tipo mecánico, inducido por las oscilaciones térmicas que se originan en ella. Las variaciones térmicas pueden ocasionar fenómenos de expansión-contracción térmica en la calcarenita, que dependen esencialmente de la conductividad térmica de ésta, de los coeficientes de expansión de

los diferentes minerales que la constituyen, de su capacidad de absorción del calor, así como de las variaciones diarias de temperatura y su distribución (homogeneidad) en la roca (Lewin, 1989). La radiación solar es la responsable directa de los ciclos térmicos diarios o estacionales que provocan tales oscilaciones de temperatura en la calcarenita (y en el resto de materiales pétreos). La consecuencia es la generación de esfuerzos mecánicos que pueden ser de tal envergadura que ocasionan la rotura de la roca cuando se sobrepasa su límite de resistencia tensional.

En este sentido, y como ya se ha comentado en el capítulo de Materiales Pétreos (Cap. 5), diversos autores han puesto de manifiesto mediante los correspondientes ensayos físico-mecánicos, que esta calcarenita posee un comportamiento mecánico heterogéneo. En cualquier caso, a la luz de los valores obtenidos de rotura a la compresión (valor medio 9 ± 2 MPa), Módulo de Young (1879 ± 4 MPa), así como los de resistencia a la tracción indirecta (12.9 kg/cm²) y a la flexión (47.4 kg/cm²) confirman que se trata de una roca con poca resistencia mecánica y módulo elástico bajo, que hacen que sea especialmente susceptible a sufrir descohesión, pulverización, descamación, etc. (Sebastián Pardo et al., 1992 ; Durán Suárez, 1996).

El tipo de alteración que se origina a consecuencia de la ciclicidad de los fenómenos de expansión-contracción depende de la presencia o ausencia de agua (Galán, 1991), aunque autores como Wendler et al., (1990) confirman el concurso del agua, e incluso la presencia de sales, en el último caso mencionado de ausencia de agua. Así, se originan desplazados, descamaciones y ampollas en un material expuesto directamente al sol, el viento y el agua (por ejemplo de lluvia) y siempre que los ciclos de secado-mojado de dicho material sean rápidos. Las oscilaciones térmicas en una roca también pueden conllevar la alternancia de ciclos hielo/deshielo (gelifracción) en presencia de agua, uno de los medios más eficaces de fracturación mecánica. El paso de agua a hielo supone un incremento de volumen que lógicamente disminuye al pasar de nuevo a la fase líquida. La repetición de esta acción en el tiempo hace que paulatinamente descienda la resistencia mecánica del material pétreo frente a la compresión y la tracción, de modo que es muy probable que la roca se pulverice.

Otro hecho a tener en consideración es la existencia de sales en los poros de la roca, sales que también experimentan expansión térmica y que pueden jugar un papel determinante en la alteración física de la calcarenita (Winkler, 1973). Baste como ejemplo mencionar que la halita dilata mucho más que una calcita. Así, en un intervalo de temperatura de $0-60$ °C expande un 0.5% (Püehringer, 1983; Cooke & Smalley, 1986).

Se ha comprobado en el exterior de la Iglesia que las calcarenitas con evidencias de descohesión en forma de arenización y con creación de alvéolos se localizan en el basamento del edificio, donde existe de forma permanente agua que asciende del subsuelo por capilaridad, y que contiene sales en disolución. En cambio, en los niveles más altos del monumento, en pináculos y otros elementos arquitectónicos y decorativos, la descohesión de la calcarenita se manifiesta en forma de desplazados y descamación, especialmente en las fachadas S y W, donde el número de horas de insolación es mayor, y por tanto mayores las oscilaciones térmicas, así como el azote del viento.

9.2 REVESTIMIENTOS

En la Iglesia de San Jerónimo existe gran variedad de revestimientos en términos de composición, color, grosor, textura y acabado, aunque tengan similar función (revocos o enlucidos). Esta heterogeneidad se debe a dos hechos: por un lado, que las dosificaciones y modo de elaboración no fueron rigurosas; por otro, que los revestimientos corresponden a diferentes períodos de ejecución.

A pesar de la variedad de muestras que se han estudiado, su diferente ubicación en el Templo, y que algunos morteros corresponden a reposiciones, se pueden distinguir claramente dos tipos de revestimientos: los revestimientos de yeso y cal y los revestimientos de cal y arena, comprobándose

que las distintas muestras estudiadas presentan unas características relativamente semejantes. No se puede afirmar que los revestimientos originales correspondan a un tipo determinado, pues en algunos casos se constata que los originales son los de cal y arena, y en otros los elaborados a base de yeso.

9.2.1 Morteros de yeso y cal

Los morteros de yeso y cal están ausentes en el exterior de la Iglesia, y por el contrario son muy abundantes en su interior. Están compuestos principalmente por yeso: los revestimientos que actúan como soporte de la pintura mural en la habitación W, casi todos los revestimientos considerados no originales, el mortero de unión de las losas de mármol bajo la escalinata de acceso al altar, y los enlucidos de las hornacinas de las esculturas en la parte superior del ábside. Excepto en estos últimos, en todos los demás casos mencionados se ha identificado sistemáticamente anhidrita, y en contadas ocasiones basanita (hemihidrita).

La alta proporción de anhidrita (hasta un 71%) sugiere que el yeso empleado en la fabricación de algunos de los morteros se obtuvo por sobrecocción. Podría considerarse que parte de la anhidrita corresponde a la que se encuentra de forma natural en el yeso. De hecho, los niveles explotados de yeso de la Depresión de Granada son alabastros que contienen restos de anhidrita. No obstante, este hecho no justifica las grandes concentraciones detectadas en los morteros de San Jerónimo. Se considera que en gran medida la anhidrita de los morteros es "anhidrita insoluble" que se obtiene por calcinación entre 600° y 900°C. Si la anhidrita se hubiera obtenido por calentamiento del yeso a 170 °-250 °C, se habría formado anhidrita soluble que al ser muy inestable absorbe la humedad atmosférica y pasa rápidamente a basanita (Alvarez de Buergo et al., 1994).

Como apoyo a esta afirmación se puede añadir que:

- según se ha comprobado en las fuentes bibliográficas, este mineral no se emplea nunca en los yesos de acabado y decoración (Ashurst & Ashurst, 1988; Alvarez Galindo, 1995), como es el presente caso. Los yesos cocidos a más de 150°C presentan la propiedad de dilatarse con cierta facilidad, de modo que la existencia de anhidrita en los revestimientos ha podido favorecer el desprendimiento de éstos del sustrato, y,
- la anhidrita insoluble es una fase no ligante, su fraguado es extremadamente lento, y por tanto no facilita una buena adhesión al soporte. Por este motivo los morteros de anhidrita necesitan "aceleradores" para su fraguado (Komar, 1979).

Se concluye por tanto que, aunque es posible que en algunos morteros la presencia de anhidrita se deba a que se produjo una sobrecocción del yeso, o incluso que tal fase proceda de la propia materia prima utilizada, en aquellos morteros en que la proporción de anhidrita es muy elevada no pudo haber un "desliz" tan grande durante la cocción del yeso, en la que debieron superarse temperaturas especialmente elevadas (>900 °C). Por tanto, los citados morteros deben ser morteros de anhidrita elaborados *ex profeso* y que se introdujeron a partir del s. XVIII. La composición química de los morteros de yeso también ha permitido extraer algunas conclusiones. El bajo contenido en Sr encontrado sistemáticamente en los revestimientos de reposición sugiere que el área fuente de los yesos no se puede situar en las zonas cercanas a Escúzar o La Malahá, donde autores como De la Torre (1995) han detectado valores elevados de dicho elemento.

En los morteros de la zona alta del retablo se han encontrado restos fósiles (algas rojas y foraminíferos bentónicos) similares a los de las calcarenitas empleadas en la construcción. Parece lógico asumir que todos los morteros (sean de cal y arena o yeso y cal) que contienen restos fósiles del tipo encontrado en las calcarenitas de Santa Pudia, se han fabricado en un mismo período, y que además la caliza añadida como árido procede de las mencionadas canteras.

9.2.2 Morteros de cal y arena

Como ya se ha mencionado, los morteros de cal y arena tienen unas características composicionales relativamente uniformes. Las principales diferencias se establecen en base a su espesor y textura.

Tipo de cal

La cal utilizada fue aérea y magra (>5% de impurezas). La coexistencia de carbonato cálcico con abundantes grumos de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) confirman que la carbonatación de la cal no fue completa. Estos grumos de cal deficientemente recristalizados presentan al microscopio óptico tamaños relativamente grandes y zonaciones de cristalinidad. Otros nódulos identificados sugieren por sus características ópticas (menor tamaño, redondeados, agrupados, exentos de cristalinidad y surcados por microfisuras) que durante el apagado de la cal no se añadió la suficiente cantidad de agua como para evitar la coagulación de partículas que reducen significativamente la plasticidad (Ashurst et al., 1988), o que no se movió convenientemente la mezcla para no formar estos grumos. Los clásicos como Vitruvio, Plinio o Paladio aconsejaban que ...“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 procedentes de las partículas imperfectamente apagadas (caliche), lo que requiere para su extinción un largo tiempo” (en Gárate Rojas, 1993). Las microfisuras detectadas en los grumos pueden haberse producido por el aumento de volumen que experimenta la cal durante el proceso de apagado, y la posterior contracción durante el proceso de carbonatación. Por todas estas cuestiones se puede afirmar que el proceso de elaboración de la cal no fue excesivamente cuidado.

La identificación en los morteros de cal de restos fósiles semejantes a los encontrados en las calcarenitas de la Cantera de “La Escribana” (algas rojas, foraminíferos bentónicos y fragmentos de equinodermos), confirman que el árido carbonatado se obtuvo a partir de esta roca carbonatada. En este tipo de morteros sólo se han detectado pequeñas proporciones de yeso en algunos de los situados en el exterior del monumento, atribuible a procesos de alteración.

Tipo de árido y dosificación

El árido añadido en los morteros es muy parecido en la mayoría de los casos. Además de micas, se han identificado gran variedad de rocas metamórficas: micaesquistos grafitosos con granates, cuarcitas, mármoles dolomíticos, etc, lo que hace suponer que proceden de alguna formación detrítica de la Depresión de Granada. Es interesante resaltar que la cantidad de dolomita añadida llega a alcanzar en ocasiones proporciones elevadas (35%), identificándose también magnesita. Tales minerales son una fuente importante de Mg que favorecería la formación de sales de magnesio. Únicamente en los revestimientos de reposición se han encontrado restos de cerámica (chamota).

Respecto a la distribución granulométrica que presentan los áridos de los morteros estudiados, en general los tamaños gradan desde menos de 100 μm hasta 6 mm. Al actuar los granos finos como ligante de los más gruesos se favorece el buen empaquetamiento de las partículas y el aglomerante, formándose una masa densa resistente a la alteración. En algunos morteros la relación árido-pasta suele ser elevada, calculándose como media una proporción añadida de desgrasante del 40%, aunque debe señalarse que no existe una dosificación rigurosa en los diferentes morteros estudiados. En estos casos, el mortero, pobre en ligante, es de inferior calidad.

En cuanto a las morfologías, son dispares, encontrándose formas subredondeadas, angulosas y/o tabulares. Estas características de morfología y cantidad de árido confieren unas propiedades determinadas a los morteros. Algunos autores sugieren que los áridos angulosos son los más adecuados, ya que aunque los granos redondeados mejoran la trabajabilidad, disminuyen la resistencia del mortero. Por otro lado, las formas más angulosas necesitan mayor cantidad de aglomerante para aportar la lubricación necesaria para una adecuada trabajabilidad. La forma de los

granos debe ser homogénea evitándose las formas aplanadas o alargadas (Alvarez de Buergo et al., 1994). Los áridos de los revestimientos que se estudian en este Trabajo presentan morfologías bastante heterogéneas, siendo muy abundantes las formas alargadas (esquistos, cuarcitas, micas...). Ello, unido a la elevada proporción en que aparecen los áridos (mayor de la aconsejada), más que favorecer, resta trabajabilidad y plasticidad al mortero. Esta baja trabajabilidad ha podido ocasionar una mala adhesión de los revestimientos al muro de calcarenita, por lo que la fábrica no ofrece la máxima resistencia, sobretodo si hay presencia de agua.

Composición química

La composición de la cal permite establecer algunas similitudes y diferencias entre los morteros. Así, considerando su contenido en Sr, se concluye que se han empleado dos tipos de cal. Una cal con mayores contenidos en Sr utilizada en los revestimientos de reposición de las habitaciones laterales del altar, y una cal más pobre en Sr que se empleó en los morteros originales del exterior de la Iglesia. Por tanto, las canteras de donde se extrajo la cal son diferentes. Las concentraciones anormalmente elevadas de Pb analizadas en algunos morteros del interior de la Iglesia proceden del pigmento *blanco de plomo* que se empleó en las pinturas murales.

9.2.3 Proceso de deterioro

Las conclusiones que aquí se exponen se refieren a los revestimientos del interior de la Iglesia, que constituyen el material constructivo más afectados por los procesos de degradación, y los que han contribuido de forma decisiva en la formación y naturaleza de las sales desarrolladas en el interior del Templo.

El deterioro de los revestimientos de cal y arena es una patología natural, consecuencia de los esfuerzos que se originan en su seno por fluctuaciones de temperatura y variación de humedad en su interior, etc. Estos procesos, aunque sean suaves, si son repetitivos pueden ocasionar un debilitamiento de la cohesión interna y la adherencia del revestimiento a su soporte. Si además existen errores o negligencias en la fabricación y aplicación del mortero, se puede acelerar su alteración al intensificarse los esfuerzos en el interior de los materiales, y aumentar el contenido y transporte de sales. Las causas prematuras de la degradación de los revestimientos de cal y arena del interior de este monumento se relacionan con su escasa resistencia mecánica; incluso los morteros de mejor calidad poseen baja resistencia a la compresión y a la flexión (Cigni, 1987; Furlan, 1990). Considerando este dato, la elevada porosidad detectada en las muestras estudiadas, y la baja cohesión interna de estos morteros (debido a que su forma de fabricación no fue en la mayoría de los casos rigurosa ni adecuada), los hacen particularmente vulnerables a los esfuerzos mecánicos originados por las presiones de cristalización y/o hidratación de las sales.

El proceso de degradación podría ser el siguiente: el agua del subsuelo asciende por capilaridad y en su recorrido transporta sales absorbidas del terreno y las que contienen los materiales constructivos del edificio. Durante todo el año debe producirse una migración preferente de las soluciones salinas hacia el interior del Templo, debido a la fuerte evaporación que se origina hacia este lugar a causa de las particulares condiciones microclimáticas del interior de la Iglesia (HR entre 13.1-28.2% y T entre 26 y 30.7 °C en verano; HR entre 32-50.7 % y T entre 15.5-18.2 °C en invierno). Podría argumentarse que durante el verano las sales deberían aflorar en el exterior del edificio al ser la temperatura ambiental externa superior, pero hay que considerar que la baja HR reinante en el interior de la Iglesia debe contrarrestar, e incluso superar, el movimiento de los fluidos hacia afuera del edificio. En la interfase calcarenita-revestimiento las sales cristalizan masivamente debido principalmente a dos causas:

- 1) las zonas de unión y adherencia de materiales constructivos constituyen zonas de debilidad de las fábricas. En estos revestimientos son frecuentes los despegues de su sustrato como

consecuencia de una inadecuada elaboración de los mismos, así como de los esfuerzos de contracción y dilatación que sufren, facilitando que las sales procedentes de la calcarenita cristalicen en esta franja, y,

- 2) por otra parte, hay que considerar que las calcarenitas poseen una porosidad más elevada que los revestimientos de cal y arena, y cuando la sal alcanza la superficie del mortero se encuentra un material más impermeable. La sal cristaliza y ejerce fuertes presiones que contribuyen a aumentar los despegues. Si se considera además que algunos de los revestimientos se han cubierto por pinturas murales elaboradas al aceite, las presiones se acentúan pues los revestimientos se vuelven menos permeables. El grado de permeabilidad al vapor de agua de una pintura al aceite es de 3.2% (Ortega Andrade, 1989).

El deterioro de los revestimientos de yeso se debe a las características de su propia composición mineralógica. El yeso es un mineral altamente susceptible a absorber agua y humedad, lo que origina su disolución y la pérdida de adherencia al sustrato. Su elevada higroscopicidad es también la responsable de que en estos morteros no se desarrollen eflorescencias de forma masiva, sino que las sales estén presentes como fases solubles en su seno, motivo por el que el aspecto de este tipo de revestimientos es tan húmedo.

9.3 MORTEROS DE UNIÓN

En el exterior del monumento los morteros de unión son de cal y arena (morteros originales). En cambio, en el interior de la Iglesia la naturaleza del mortero de unión es diferente, dependiendo del tipo de material que ligue. Así, los morteros de yeso unen losas de mármol, y los morteros de cal y arena aparecen entre sillares de calcarenita. Estos últimos se consideran morteros originales.

9.3.1 Composición

En los morteros de cal y arena se ha identificado dolomita en cantidades que oscilan entre <5% y 25%, pudiendo aportar el Mg necesario para originar las sales de sulfato de magnesio detectadas en el interior de la Iglesia. La identificación en el ligante de restos fósiles como algas rojas, briozoos y foraminíferos bentónicos, confirman que se añadió árido carbonatado procedente de las calcarenitas de la Cantera de La Escribana. Las concentraciones analizadas de Sr en los morteros de unión del exterior e interior del edificio son similares, y coincidentes con las detectadas en los revestimientos del exterior de cal y arena considerados originales de la época de construcción (media de 485 ppm). Estos valores son del mismo orden de magnitud que los valores analizados en las calcarenitas del monumento.

Los morteros de yeso (no originales) contienen cierta cantidad de anhidrita (<10%), cuya presencia se justificaría por los mismos motivos aducidos en los revestimientos. Si además se considera la presencia de chamota, únicamente encontrada en los revestimientos de reposición del interior del Templo, se puede sugerir que este mortero de unión se fabricó en el mismo período que los revocos.

9.4 POLICROMÍA Y PINTURA MURAL

9.4.1 Policromía de las esculturas en biocalcarenita

La práctica de colorear la escultura en piedra estuvo muy difundida entre los pueblos primitivos, las civilizaciones extra-europeas y el mundo antiguo preclásico y clásico. Los materiales pétreos utilizados eran numerosos; desde rocas sedimentarias y metamórficas más o menos blandas como el alabastro, el travertino, la arenisca y el mármol, hasta rocas muy duras como el basalto, el pórfido, el

granito y la diorita. Se policromaba directamente sobre la superficie de la roca o, más frecuentemente, sobre una capa de preparación de yeso, utilizando colores vivos. En el s. IV se impone la escultura sin pintar o sólo parcialmente pintada, recuperándose en la Edad Media románica y proto-gótica el uso de policromar con vivos colores las esculturas. A partir del s. XIII hasta el s. XVI se pintan detalles de las esculturas (vestidos, fondos de bajorrelieves, etc) alternando con partes vistas de la piedra, y a partir del s.XVI cae totalmente en desuso esta práctica (Maltese et al.,1973).

Generalmente, la información disponible de las esculturas pétreas policromadas suele limitarse al aspecto plástico, al margen de su concepción unitaria plástico-cromática. Existen varios documentos en los que se menciona la importancia concedida a la policromía de las esculturas durante épocas enteras de la historia del arte. Prueba de ello es que se encargara el trabajo a pintores famosos, a veces mejor pagados que el propio escultor, y la existencia de gremios medievales con reglamentos en la mayoría de las ciudades europeas. Una fuente interesante de información es el "Libro de Mètiers" escrito en 1268 (Aubert, 1964) que recoge las severas normas que debían acatar los obreros (que trabajaban en las catedrales góticas) acerca de las piedras, esculturas y policromía que debía recubrirlas, operación absolutamente necesaria.

La falta de información sobre la policromía de la escultura es particularmente grave para la escultura monumental y los espacios exteriores que decoran monumentos arquitectónicos. Las restauraciones realizadas al final del siglo XX en las esculturas que decoran varias catedrales románicas y góticas de Centroeuropa han proporcionado una importante información acerca de los materiales y las técnicas de ejecución empleadas (Rossi Manaresi, 1987). Los tratados técnicos medievales (y también aquellos de otros períodos) y los recetarios, dicen poco o nada sobre los materiales y los métodos para policromar esculturas en piedra. Una investigación muy exhaustiva de esas fuentes de información, datables entre el nacer de la escultura románica y el período del gótico florido (finales del s.XI y finales del s. XIII) sólo proporcionan escasas referencias al respecto. El "Tratado de Eraclio" (en Merrifield, 1967) escrito posiblemente en el s.XIII, contiene concisas instrucciones para pintar la piedra: "cuando la piedra esté seca se prepara una base bien comprimida y pulida con *blanco de plomo* finamente molido con aceite, después se puede pintar con cada color mezclado con aceite". El mismo procedimiento se indica en el "Libro de Mètiers" (op. cit.) donde se establece que la estatua de piedra una vez terminada debe impregnarse con aceite de lino mezclado con *blanco de plomo* y después pintarse con varios colores. Contiene una precisión más: las esculturas siempre deben policromarse, y esta policromía tiene que aplicarse sobre una capa de imprimación. Cennino Cennini escribe hacia finales del s.XIV "El libro del arte" (Cennini, ed. 1988) en el que comenta el proceso de dorado. Para dorar la escultura (una vez seca) previamente hay que aplicar hasta cuatro capas de cola animal caliente (las últimas con aceite y huevo). Después se estuca con yeso, se aplica el yeso apagado para dorar, el bol y la lámina de oro. Matiza que la razón de aplicar el mordiente (imprimación) es que la piedra conserva siempre la humedad, y si llegase a afectar al yeso éste se alteraría. Del contexto se desprende que los colores se deben mezclar con aceite de lino. No se encuentran tratados con mayor precisión que éste. La falta de posteriores recetas para pintar puede probablemente significar una decadencia del gusto por policromías más completas.

En las policromías de las esculturas de la Iglesia de San Jerónimo, y en los elementos arquitectónicos donde están ubicadas, el autor (o autores) ha empleado una paleta de colores muy reducida: blanco de yeso para la preparación y *blanco de plomo* para las carnaciones; *Tierra de Siena natural* y *Tierra de Siena tostada* para las imprimaciones coloreadas; *azul de esmalte*, *ocre amarillo*, *rojo minio*, *oro* y *estaño* para las capas pictóricas. Las técnicas analíticas empleadas en este Trabajo no han permitido identificar las posibles capas aislantes de naturaleza orgánica que, de existir, protegiesen la piedra. Sí se ha constatado la aplicación de una preparación de yeso, encima varias capas de imprimación coloreadas con *Tierras*, y finalmente las capas pictóricas. Por el tipo de pigmentos utilizados éstos se han debido mezclar con aceite y, lógicamente, no hay capas de barniz. Se comprueba que el método de policromar las esculturas se atiene a las reglas impuestas por Cennini,

aunque nada se puede decir acerca de la condición más importante, que es la protección de la piedra con mordiente.

Respecto a las características de los pigmentos empleados, así como a la técnica de ejecución de la pintura, hay que mencionar varios hechos:

- Las *Tierras* empleadas para elaborar las imprimaciones precisan la máxima pureza, de lo contrario reducen la intensidad de su tono y resistencia. La identificación de carbonato cálcico, cuarzo y yeso en las imprimaciones estudiadas confirman que su proceso de elaboración no ha sido demasiado meticuloso. Por el tamaño de grano de los cristales también se pone de manifiesto que la trituración del pigmento no ha sido excesiva, especialmente en SJEP17, en la que se existen cristales de hasta 230 μm .
- El pigmento azul utilizado ha sido el *azul de esmalte*, pigmento artificial fabricado en el s. XVII, y que dejó de emplearse a mediados del s. XIX. Las dos tonalidades de azul se han obtenido jugando con el grosor y tamaño de los pigmentos de las capas y con el color del fondo (imprimación). Para el azul oscuro se ha empleado una imprimación rojiza, de uso propagado en los s. XVII y XVIII (Díaz-Martos, 1978), sobre la que se ha aplicado la capa azul de aproximadamente 80-100 μm de espesor, siendo el tamaño de los cristales de unas 30-50 μm . El color azul claro se ha conseguido aplicando una capa de menor grosor (40 μm como máximo) sobre una preparación blanca.
- En la pintura al temple (como es el presente caso) las bases y capas inferiores siempre tienen algún efecto sobre el resultado final de la pintura. De esta manera, al aplicar una ligera capa azul sobre una superficie blanca, la luz reflejada ha aportado brillo y luminosidad, siendo el color resultante un azul claro. Esta cualidad no se manifiesta en absoluto al pintar sobre la imprimación coloreada, y el color resultante ha sido un azul oscuro. Se comprueba así, el importante papel que desempeña el color de la capa de fondo en el efecto óptico final de cualquier pintura.
- Las dos carnaciones mates estudiadas se han elaborado empleando *blanco de plomo*. La diferente naturaleza de los pigmentos añadidos para aportar el color, y el color de la base de fondo son los responsables de la distinta tonalidad de la carnación.
- El método de dorado ha sido el "dorado con aceite" o "dorado al mixtión". El procedimiento habitual consiste en encolar la superficie en una capa lisa y fina, esperar hasta obtener el grado de sequedad y adherencia correcto, y aplicar el pan de oro (Mayer, 1988). En el presente caso, la lámina de oro se ha aplicado sobre una capa de yeso bien pulida y aplicada en varias manos. Además se han empleado en grandes superficies láminas de estaño ("falso oro") utilizadas para imitar al oro, y lógicamente más económicas (Matteini, 1989). Debido a que el Sn es muy sensible a los procesos de oxidación, debe protegerse con lacas o barnices. La ausencia de esta protección ha provocado en estas pinturas un oscurecimiento generalizado.

Por lo que respecta al estado de conservación de las esculturas y demás elementos adyacentes policromados, hay que decir que la presencia generalizada en todos ellos de una capa de preparación de yeso (en contacto con la calcarenita), así como las imprimaciones elaboradas con arcillas, han sido decisivas en el proceso de degradación. Estos materiales son extremadamente absorbentes de la humedad. Como consecuencia se producen fenómenos de disolución del yeso y alteración de las arcillas, que se constatan mediante MOP y SEM en todas las estratigrafías pictóricas. Los SO_4^{2-} libres en el medio se combinan con los aniones procedentes de los elementos que constituyen los pigmentos, y los aportados por el agua de infiltración. Por ello es tan frecuente encontrar sales en las que sistemáticamente intervienen los sulfatos. Estas se denominan *Sales de Tutton*, que constituyen una extensa serie de sulfatos monoclinicos isomorfos, siendo su composición general $\text{A}^+\text{2B}^{2+}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

donde $A^{+} = K^{+}, NH_4^{+}, Rb^{+}, Cs^{+}$, y $B^{2+} =$ cualquier catión divalente con radio aproximado 0.7\AA . Los sulfatos de magnesio con diferente grado de hidratación (6 ó 7 moléculas de agua) son los más detectados. El Mg puede proceder de las arcillas de las capas de imprimación, de la propia calcarenita, del mortero de unión y/o del agua de infiltración. En todas las capas pictóricas elaboradas con óxidos de hierro se ha constatado sistemáticamente la presencia de sulfatos de Fe, lo que da cuenta del elevado grado de alteración alcanzado en las pinturas.

9.4.2 Pintura mural

Para establecer las técnicas y materiales empleados en las habitaciones muestreadas de la zona inferior de la Iglesia, se hace necesario definir en primer lugar lo que se entiende por pintura mural. La pintura mural es un elemento integrante de la arquitectura y no puede ser concebida ni comprendida aislándola del ambiente, constitución lineal, espacios y colores de la construcción de que forma parte (Doerner, 1921; Mayer, 1988; Bontcé, 1989). Este arte era resuelto en la época de esplendor de la pintura italiana por dos métodos diferentes:

- El llamado *buon fresco*, que es el verdadero método (pintura al "fresco"), en el que los pigmentos se aplican sobre una capa de cal húmeda. No se recurre a retoques y, una vez seco, se obtiene una superficie vítrea y muy parecida a la que produce el barniz sobre los óleos. Si el clima o la humedad no descomponen y sueltan el mortero, no le afectan la luz ni el polvo o los agentes exteriores, el color lo conserva casi en forma permanente debido a la estabilidad de los pigmentos. La belleza óptica de la pintura al fresco no se supera con ninguna otra técnica de pintura mural ni llega siquiera a igualarse.
- El *secco fresco* ("fresco seco"), en el que la pintura se ejecuta en una superficie de argamasa seca. Los colores se mezclan con agua y una solución de caseína, prefiriendo algunos pintores modernos la cola o yema de huevo. En general, el término "secco" se utiliza para describir cualquier método de pintura mural en seco (en oposición al "fresco" o pintura sobre argamasa húmeda).

Entre los requisitos técnicos para una buena conservación de un mural, cabe destacar: que sus condiciones de exposición permanezcan constantes, ausencia de humedad en las paredes para evitar desprendimientos y eflorescencias, y, limpieza periódica de las paredes.

A pesar de que todas las fuentes bibliográficas consultadas apuntan sistemáticamente que las pinturas que recubren todas las paredes del Templo son pinturas al "fresco" (*buon fresco*) realizadas por Juan Medina entre 1723 y 1735 (Gómez Moreno-González, 1892; Gallego Burín, 1982; Colina Munguía, 1986), en este Trabajo se ha comprobado que el método de pintura mural empleado en las habitaciones muestreadas de la zona baja de la Iglesia de San Jerónimo ha sido el "fresco seco", observándose diversas técnicas. Así, en la habitación E la pintura se ha realizado al temple sobre una pared seca. Los pigmentos son muy escasos y aparecen englobados en la capa de yeso. En la habitación W se aprecian distintas formas de ejecución de la pintura:

- al temple propiamente dicho, aplicando sobre la preparación de yeso las capas pictóricas al óleo,
- superponiendo las capas pictóricas sobre varias capas de carbonato cálcico, y,
- pintando directamente sobre el revestimiento de cal.

Por su parte, esta variedad de técnicas al "fresco seco" empleadas sugieren que no fueron ejecutadas en la misma época, o al menos por el mismo autor. La identificación del pigmento *amarillo de cromo* ha permitido establecer que la ejecución de las obras en donde éste aparece es posterior a las fechas arriba mencionadas, pues este pigmento de origen artificial se comenzó a comercializar a partir

de 1797 según Mayer (Mayer, 1988) y a partir de 1818 según Matteini & Moles (Matteini & Moles, 1989).

El principal agente de deterioro de estas pinturas murales es el agua de ascensión capilar. En la habitación W la excesiva humedad de las paredes unido a la avidez del yeso por el agua es determinante. La dolomita presente en el revestimiento de cal y arena sobre el que se aplica la pintura reacciona con el yeso, y se produce la formación de subeflorescencias de sulfato de magnesio. La presión que ejercen las sales conduce en última instancia al desprendimiento de la policromía. En la habitación E el agua cargada de sales cloruradas reacciona con los pigmentos, principalmente los elaborados a base de plomo, originándose las sales de cloruro de plomo. Se concluye por tanto, que en la zona inferior del Templo la composición de las pinturas murales y su soporte influyen directamente en la naturaleza de las sales originadas.

9.5 SALES

Las sales constituyen el principal factor de deterioro del interior de la Iglesia de San Jerónimo. Su desarrollo se relaciona sistemáticamente con la existencia de humedad (en estado gaseoso o líquido). Por tanto, la presencia masiva de sales en el Templo testimonia que el aporte de agua ha sido y es lo suficientemente elevado, o su acción prolongada en el tiempo, como para haber originado una serie de formas de alteración (despegues y pérdida de capas pictóricas, desplazados y pulverización en materiales pétreos, etc) que en algunos casos han producido la ruina del soporte (e.g. pintura mural). Pero aún más, el modo en que se agregan los cristales de estas sales, su hábito, y el lugar donde aparecen en el sustrato (eflorescencias o subeflorescencias) proporcionan información acerca de la cantidad, forma de suministro y saturación de la solución salina, así como de las condiciones ambientales que la rodean.

Abordar el mecanismo de cristalización de sales constituye una tarea extraordinariamente complicada, dado que se trata de un sistema termodinámicamente abierto en el que intervienen multitud de parámetros. Por tal motivo las discusiones y conclusiones que aquí se presentan se hacen en términos empíricos. En primer lugar se discuten los posibles procesos que han originado los distintos hábitos y formas de agregación de las sales según las teorías de cristalización. Finalmente se da una explicación que justifica la ausencia de sales en el exterior del edificio y la presencia masiva en determinados lugares de su interior.

Existen varias teorías de cristalización que se pueden aplicar para explicar el crecimiento de cristales a partir de una solución, y que aparecen resumidas en Bennema (1974). Una de ellas es la teoría morfológica basada en que "un cristal desarrolla sus caras con la mínima energía superficial de acuerdo con su estructura cristalina". Así, si el medio es isótropo y la cristalización es baja se desarrolla la denominada *morfología estructural*, es decir, la morfología de equilibrio de la fase cristalina con el medio que lo origina. Pero en la realidad esta forma ideal se desarrolla pocas veces, además de que la mayoría de los medios son anisótropos, por lo que lo normal es que los cristales aparezcan con diferentes hábitos muy alejados de sus formas de equilibrio.

El hábito que presenta un cristal y su tendencia a agregarse en diferentes estados está controlado por factores internos (e.g. la estructura del cristal, defectos en la red, maclas...) y por factores externos. En el contexto de la restauración y conservación interesan especialmente los factores externos que gobiernan la cristalización. Una sal precipita a partir de una solución en un sustrato bajo determinadas condiciones ambientales, por tanto, la forma del cristal y su modo de agregación dependen de la composición e impurezas de la solución salina, su grado de sobresaturación, la forma y suministro de la solución que lo alimenta, la composición y estructura porosa del sustrato, la temperatura, humedad relativa del aire y sus oscilaciones (condiciones de evaporación), etc (Arnold et al., 1985b). Para que se produzca la cristalización es esencial un estado de sobresaturación en la

solución salina. En la Fig. 9.1 se representa el grado de sobresaturación de una solución (C/C_s) en relación a su temperatura. La cristalización sólo tiene lugar entre los estados de saturación y sobresaturación. Existen tres situaciones teóricas por las que se puede alcanzar este último estado, representadas en el gráfico por los siguientes caminos:

- de A a B, disminuyendo la temperatura de la solución y manteniendo constante su concentración,
- de A a C, aumentando rápidamente la concentración por evaporación permaneciendo la temperatura constante, y,
- de A a D, variando tanto la temperatura como la concentración, o cambiando el potencial químico de la solución al añadir por ejemplo otro anión o variando su pH.

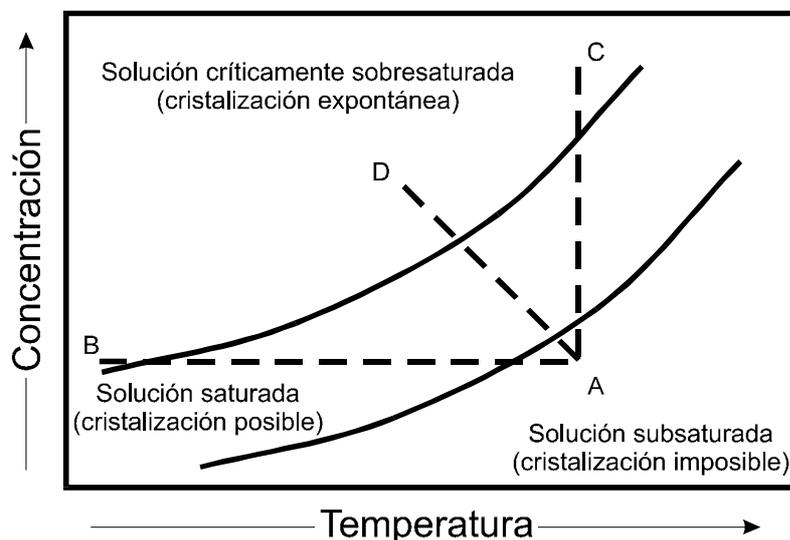


Fig. 9.1. Concentración del soluto (C/C_s) frente a su temperatura. La sobresaturación se puede obtener por enfriamiento (A-B), por incremento de la concentración (A-C), o por combinación de ambos casos (A-D). C = concentración del soluto, C_s = concentración de saturación del soluto.

Dependiendo del grado de saturación de la solución Sunagawa (1981) distingue tres regiones donde se desarrollan cristales con diferente hábito según un mecanismo de crecimiento distinto. Las regiones se separan por dos sobresaturaciones críticas σ^* y σ^{**} (Fig. 9.2). En la región con sobresaturación por debajo de σ^* crecen cristales poliédricos según un mecanismo de crecimiento en espiral. A mayor sobresaturación, entre σ^* y σ^{**} , la nucleación bidimensional es el mecanismo de crecimiento predominante originando cristales esqueletales (*hopper*). Cuando la sobresaturación es mucha más alta se forman morfologías dendríticas con superficies curvas y en ramas. Arnold y Zehnder (1982, 1985, 1988) determinaron que junto a la temperatura y la humedad relativa del aire, el factor externo más importante que influye en el hábito del cristal es la cantidad de solución que impregna el sustrato. Las relaciones observadas entre el sustrato húmedo y los hábitos cristalinos se ilustran en la Fig. 9.3.

En el Monasterio de San Jerónimo se ha comprobado que el estado de agregación de las sales y el hábito de sus cristales están condicionados por varios de los factores arriba mencionados, desarrollándose una u otra forma según la influencia de estos factores. Así por ejemplo, al margen de la composición mineralógica de la sal :

- se desarrollan cristales aciculares (*wiskers*) siempre que el sustrato está débilmente húmedo o casi seco (independientemente de la naturaleza de la sal);
- para un mismo tipo de sal (e.g. cloruros o nitratos) se han identificado diversos hábitos dependiendo de la altura a la que aparecen, y,
- los sulfatos siempre presentan la misma morfología, a pesar del distinto sustrato sobre el que crezcan.

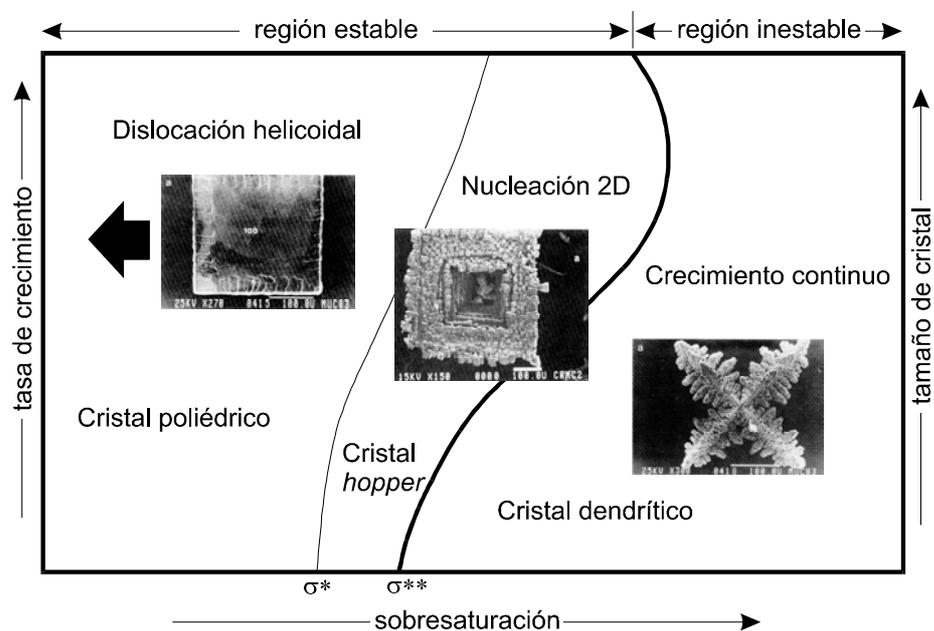


Fig. 9.2. Sobresaturación del soluto frente a grado de crecimiento de un cristal.
Extraído de García Ruiz (1986).

Un factor a considerar, y que complica si cabe aún más una interpretación acertada del proceso de cristalización, es que el hábito puede cambiar (y normalmente lo hace) a lo largo del tiempo, ya que las sales constituyen un "sistema dinámico" en el que se producen continuas transformaciones debido a procesos de envejecimiento, de hidratación-deshidratación y disolución-recristalización (Sperling et al., 1985; Arnold et al., 1985a, 1985b; Dohene, 1994).

Las sales de sulfato de magnesio (epsomita y/o hexahidrita) son las más abundantes en la Iglesia de San Jerónimo. Según se ha comprobado en la bibliografía, su aparición no es frecuente en monumentos históricos, aunque en algunas construcciones constituye la sal más abundante relacionándose su existencia con la presencia de morteros y dolomita (Winkler, 1973; Arnold, 1976; Arnold et al. 1990). La Iglesia del Monasterio de San Jerónimo puede considerarse un caso excepcional en el que se produce una cristalización masiva de epsomita y/o hexahidrita sobre un sustrato de calcarenita.

Existen en la literatura pocas referencias acerca de sales de sulfato de magnesio, aunque queda claro que su comportamiento es totalmente distinto al de las sales de sulfato de sodio (Stambolov, 1976). La precipitación de epsomita se produce en un rango de temperaturas comprendido entre 1.8°-48.3°C, cristalizando por debajo de 1.8°C la kieserita, variedad con una sola molécula de agua (Stambolov, op.cit.). No se ha encontrado información sobre la humedad relativa requerida para la cristalización de la epsomita, como tampoco las condiciones de precipitación de la hexahidrita, aunque sí las presiones de hidratación desarrolladas en la transformación de una fase a otra y recogidas en la Tabla 9.1. Se deduce de dicha tabla que a elevada temperatura y humedad relativa moderada la única fase estable es la hexahidrita. De acuerdo con estos datos y los resultados del estudio microclimático del interior de la Iglesia, se tienen que producir ciclos de hidratación-deshidratación por lo menos estacionales, de modo que cristalicen alternativamente hexahidrita o epsomita (Winkler, 1973).

Los procesos de hidratación-deshidratación en los sulfatos de magnesio no son frecuentes en la naturaleza y ejercen bajas presiones de hidratación en relación a otras sales (Tabla 9.1). No obstante, los continuos ciclos que se han debido producir a lo largo del tiempo en la Iglesia de San Jerónimo han contribuido a la desintegración de la calcarenita en las esculturas de la zona alta del ábside. Además, los procesos de hidratación se aceleran de forma considerable en presencia de cloruros, los cuales reducen la temperatura a la que se produce la transformación de fases hidratadas a anhidras, especialmente para los sulfatos (Stambolov, 1976, Amoroso et al., 1985), cloruros que han sido detectados en bajas proporciones junto a estas sales en el Templo.

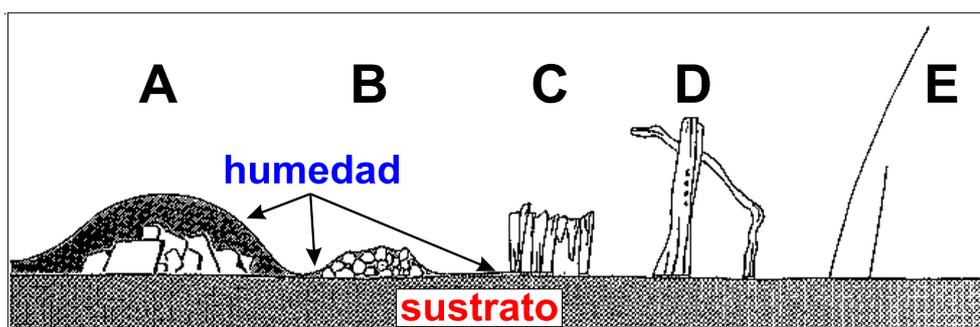


Fig. 9.3. Relación entre la morfología de un cristal y el sustrato húmedo de un material poroso. Cristales grandes que crecen completamente inmersos en la solución o en un sustrato muy húmedo. Desarrollan sus "formas de equilibrio". B) Costra granular constituida por cristales pequeños e isométricos que crecen en un sustrato húmedo. Los cristales están recubiertos por una delgada película de solución. C) Costra fibrosa que crece en el aire a partir de un sustrato cubierto por una película fina de solución. D) Wiskers columnares y gruesos creciendo a partir de un sustrato escasamente húmedo. E) Wiskers muy delgados que crecen en el aire cerca de la superficie seca a partir del aporte muy localizado de solución (según Arnold et al, 1990).

El aspecto y tamaño de la gran mayoría de los cristales de epsomita y hexahidrita, así como los de yeso, sugiere que se han formado en un sustrato poroso húmedo (zona B de la Fig. 9.3), con un grado de sobresaturación bajo de la solución salina, de modo que se han formado cristales próximos a su forma de equilibrio y otros tabulares. Las formas angulosas de los cristales y las grietas de desecación (Fig. 9.4) que se advierten en su superficie sugieren que estos cristales no son "formas directas de

crecimiento”¹. Dicho de otro modo, no son cristales recién formados o recientes, sino que han sufrido un proceso de envejecimiento, lo que confirmaría además que los episodios de hidratación-deshidratación no son frecuentes. De forma aislada se han identificado cristales con hábito acicular (*wiskers* y agregados subparalelos) que sugieren un sustrato menos húmedo para su formación. Como ya se ha comentado, las condiciones ambientales han podido ser fluctuantes en el tiempo y en el espacio, fenómeno que se refleja en el hábito de los cristales.

Los sulfatos de magnesio aparecen en forma de subeflorescencias porque la velocidad de evaporación es más elevada que la velocidad de suministro de la solución salina, de modo que ésta no es capaz de alcanzar la superficie (Rossi Manaresi et al., 1989). Los cristales crecen en la interfase entre la zona húmeda y la seca (Amoroso et al., 1983). Además, en su recorrido hacia el exterior la solución salina se encuentra con el obstáculo que supone la presencia de un medio más impermeable, como es el revestimiento de la calcarenita por morteros y pinturas murales

En la zona baja de la Iglesia las sales de sulfato de magnesio y/o calcio se desarrollan cuando coexisten morteros de yeso y morteros con dolomita; en la parte alta del retablo su presencia se debe a la existencia de una capa de preparación de yeso en las pinturas murales, procediendo el magnesio del que contiene la propia calcarenita, de los morteros de unión, y del que pueda contener la propia agua infiltrada por el muro.

El cloruro de sodio es otra de las sales más abundantes en la Iglesia, y su presencia está muy localizada en la zona baja E del Templo. Cristaliza con hábitos muy distintos, formando costras y agregados no compactos, siendo su desarrollo independiente del sustrato sobre el que se desarrolla (revestimientos de yeso, de cal y arena con dolomita, o ladrillo). Ello sugiere que la solución salina contiene una concentración de iones cloro y sodio lo suficientemente elevada como para que sea mínima la influencia de otros cationes lixiviados de los revestimientos y demás materiales pétreos. En el suelo de la habitación E la halita aparece como una "pelusa" de cristales sueltos con hábitos variados, tales como cubos perfectos (Fig. 9.5A), triquitos y *wiskers* rectos, curvados y/o enrollados (Fig. 9.5B). La limpieza periódica de las baldosas disuelve los cristales de halita, que en un plazo inferior a dos meses vuelven a cristalizar, por lo que continuamente se observan sales "frescas", jóvenes, con hábitos preferentemente aciculares (Arnold et al., 1985b).

Los *wiskers* pueden crecer a partir de una solución bajo muy diversas condiciones. Sobre un sustrato poroso pueden considerarse dos casos: a) un crecimiento por la punta o extremo del cristal acicular, donde la solución migra por las caras laterales o un canal central hacia el extremo del cristal donde se deposita la sal; b) un crecimiento por la base, en que la solución sobresaturada cristaliza en este lugar (Nabarro et al. 1958). La Figura 9.6 muestra un *wisker* en el que se observa perfectamente un canal central. Este canal no siempre aparece, y no es indicativo de una u otra forma de crecimiento. Únicamente pone de manifiesto la direccionalidad de la solución que origina el cristal.

Para que crezca un *wisker* hace falta una solución débilmente sobresaturada que sólo permite un mecanismo de crecimiento por nucleación unidimensional, de modo que se favorece un crecimiento espiral por dislocación en hélice. Son varios los experimentos llevados a cabo para explicar los factores que influyen en el desarrollo de los *wiskers*. Una de estas pruebas concluye que los *wiskers* rectos se originan cuando la velocidad de evaporación es lenta, de lo contrario se forman *wiskers* tortuosos. Dependiendo de otros factores externos los *wiskers* pueden ser delgados o gruesos; son gruesos cuando la evaporación es más marcada, la humedad del sustrato mayor y el sustrato es poroso (Arnold et al., 1985b). Considerando las HR tan bajas registradas en el Templo, y que la HR de equilibrio de la halita es elevada (75.5% a 20°C), la velocidad de evaporación es muy rápida favoreciendo el desarrollo de *wiskers* gruesos. No obstante, en la Iglesia se han identificado *wiskers*

¹ Hábito que posee un cristal al desarrollarse en unas condiciones determinadas de cristalización.

rectos, delgados, curvos y gruesos (predominando estos dos últimos tipos), lo que sugiere la variación de las condiciones ambientales

Pero la halita se presenta principalmente en forma de costra gruesa (2-3 cm) en los muros de la habitación E, y como "pústulas" salinas en la zona E del altar. Las pústulas son costras de pocos milímetros de espesor compuestas por cristales isométricos, prismas y agujas, y limitadas a áreas pequeñas. Estos dos tipos diferentes de costras sugieren también distintas condiciones de formación. Para que se forme una costra la cantidad de solución salina presente debe ser muy alta (Lewin, 1981; Arnold & Kueng, 1985b), en otras palabras, el sustrato debe estar muy húmedo o mojado. Como el cloruro sódico es una sal muy soluble, la solución saturada de halita contiene más soluto que otras sales menos solubles, por lo que la costra que se forme será más gruesa (con la misma cantidad de humedad del sustrato). Una costra se puede formar cristalizando directamente a partir de una solución, recrystalizando a partir de una eflorescencia suelta (no compacta), o por reacción química entre dos sales solubles. En el caso presente se desestima la última probabilidad, pero pueden haberse producido cualquiera de las dos primeras. Lo que sí está claro es que la HR tan baja registrada en la Iglesia no permitiría la redisolución de la halita (y por lo tanto no se producirían ciclos de disolución-recrystalización), favoreciéndose de esta manera el aporte continuo de solución que alimenta la costra sin interrupción. No obstante, hay que considerar que la HR de equilibrio de las sales tiende a disminuir con la presencia de otras sales (Amoroso et al., 1983; Arnold et al., 1989), así como por el denominado "fenómeno de histéresis" (Amoroso et al., 1983). Según este fenómeno el NaCl no cristalizaría hasta alcanzar una HR del 40%.

En los muros de la habitación E el gran espesor de la costra sugiere que se ha llegado a este estado por envejecimiento de la sal. En cambio, en las pústulas del altar, las observaciones estacionales han puesto de manifiesto la transición de costras delgadas a eflorescencias sueltas de cristales isométricos y tabulares y viceversa, lo que sugiere que el suministro de solución varía periódicamente. En la costra muy compacta y gruesa de los muros de la habitación E los cristales son en su inmensa mayoría subhédricos, mostrando muchos de ellos un hueco central (Fig. 9.7). Esta visión del cristal al SEM puede inducir al error de creer que es una forma *hopper*, es decir, una forma directa de crecimiento en la que se observan superficies planas pero cristales huecos, debido a que su crecimiento es más rápido en las aristas. Los *hopper* se forman a una sobresaturación intermedia mediante un mecanismo bidimensional de cristalización. No obstante, en la Fig. 9.7 los ángulos redondeados del cristal evidencian un fenómeno de disolución, por lo que en un principio este cristal pudo ser un *hopper*. En la Fig. 9.5A se ha mostrado un cubo de NaCl en el que se distinguen escalones de crecimiento en la cara visible, que pueden sugerir la formación incipiente de un *hopper*. En el altar los hábitos son más variados, apareciendo conjuntamente cubos, cristales tabulares y *hoppers*, lo que refleja, una vez más, las fuertes inhomogeneidades que puede sufrir la solución salina en el espacio y en el tiempo. De las explicaciones precedentes se deduce que la interpretación correcta de la "vida" de un cristal puede ser complicada, pero siempre está inscrita en su hábito

La costra es un tipo de eflorescencia (en oposición a las subeflorescencias), por lo que las condiciones de formación en relación al grado de evaporación deben ser similares, es decir, la velocidad de evaporación debe ser menor que la velocidad de flujo de la solución salina. Así, la solución tiene tiempo de llegar a la superficie donde posteriormente cristaliza (Arnold et al. 1990; Amoroso et al. op. cit.). Lo dicho es congruente con las observaciones de Arnold y Kueng (1985b), de modo que, para que crezca una costra el sustrato debe estar, no ya húmedo, sino bastante mojado.

Tabla 9.1. Presiones de hidratación (atm) para algunas sales solubles a distintas temperaturas y humedades relativas (tomado de Winkler, 1973).

HR (%)	Temperatura (°C)			
<u>Basanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) a yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)</u>				
	0°	20°	40°	60°
100	2190	1755	1350	926
90	2000	1571	1158	724
80	1820	1372	941	511
70	1600	1145	702	254
60	1375	884	422	0
50	1072	575	88	
<u>Kieserita ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) a hexahidrita ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)</u>				
	65.3°			
100	418			
90	226			
80	13			
<u>Hexahidrita ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) a epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)</u>				
	10°	20°	30°	40°
100	146	117	92	96
90	132	103	77	69
80	115	87	59	39
70	97	68	40	5
60	76	45	17	
50	50	19	0	
40	20	0		
<u>Thermonatrita ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) a heptahidrita ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)</u>				
	0°	10°	20°	30°
100	938	770	611	430
90	799	620	457	276
80	673	455	284	94
70	488	264	88	
60	243	46		
<u>Heptahidrita ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) a natrón ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)</u>				
	0°	10°	20°	30°
100	816	669	522	355
90	666	504	350	185
80	490	320	160	0
70	282	112	0	
60	60			

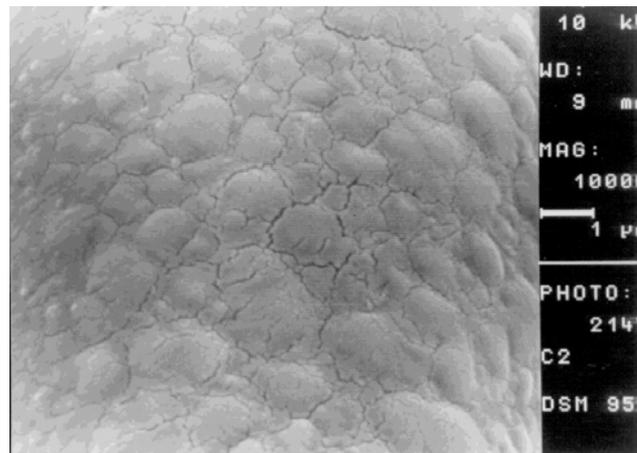


Fig. 9.4. Grietas de desecación desarrolladas en la Superficie de un cristal de hexahidrita.

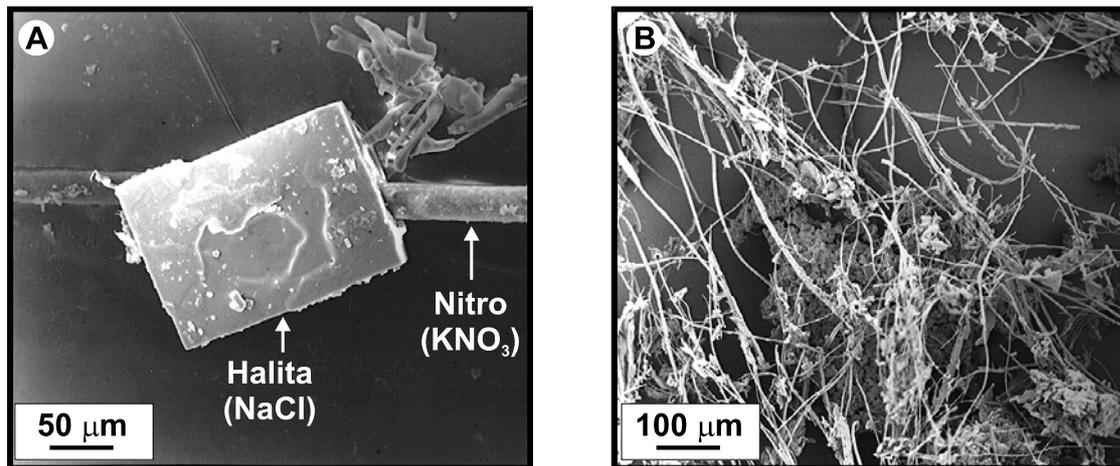


Fig. 9.5. A) Cubo de halita (morfología estructural) con indicios de escalones de disolución en una de sus caras. Aparece atravesada por un whiskers de nitro. B) Eflorescencia no compacta de cristales de halita con distinto hábito (whiskers y cubos), bajo la cual puede observarse una costra de pequeños cristales de halita.

Las alteraciones asociadas a las costras de halita en la Iglesia son el levantamiento y pérdida de los revestimientos, y una vez desaparecidos éstos, la descohesión de la calcarenita. Aunque en un principio algunos autores sugirieron que sólo las sales hidratadas eran perjudiciales, pronto se puso de manifiesto que algunos daños estaban únicamente asociados a la presencia de halita (Gauri et al., 1990). Las presiones de cristalización desarrolladas por distintas especies de sales se presentan en la Tabla 9.2, en la que se aprecia que las mayores presiones de cristalización corresponden a la halita, alcanzando valores que pueden destruir hasta la roca más dura.

En la zona baja de la Iglesia no se constata la zonación de sales observada en el área de ascenso capilar de un muro propuesta por Arnold (1982), y que se muestra en la Figura 9.9. De forma resumida (y según el modelo de Arnold) se puede decir que una solución salina es transportada por ascenso capilar a partir de la humedad del terreno que existe en la base de un muro. El mecanismo de transporte es la evaporación por encima del terreno. La sal transportada precipita en una secuencia

espacial de acuerdo con la actividad iónica y solubilidad de las fases salinas presentes en el sistema. La zona A más baja del muro no presenta evidencias de deterioro; encima, en la zona B aparecen las sales menos solubles e higroscópicas como sulfatos y carbonatos que originan disgregación granular, descamaciones y desarrollo de la mayoría de las eflorescencias. En la zona superior C se acumulan los nitratos y los cloruros, formando soluciones muy higroscópicas que difícilmente precipitan. En la Tabla 9.3 se muestran las sales que aparecen con mayor frecuencia en las zonas establecidas por Arnold, anotándose su HR de equilibrio para una temperatura de 25 °C.

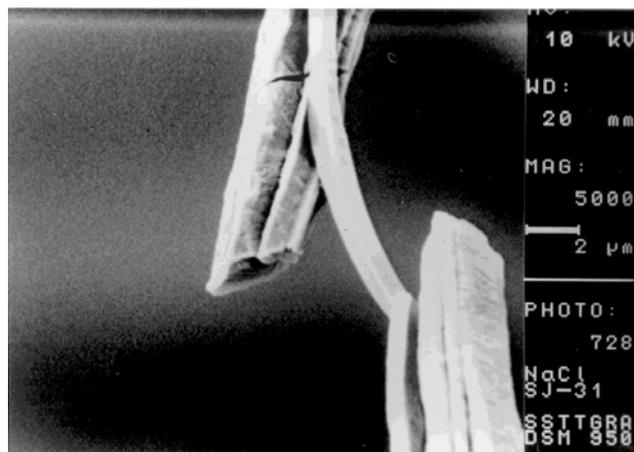


Fig. 9.6. Whiskers en el que se observa un canal central que indica la direccionalidad de la solución que origina el cristal.

En San Jerónimo no se aprecia esta secuencia espacial, porque aunque lo normal es que las soluciones salinas sean multicomposicionales. En este caso el contenido en ión cloruro e ión sodio en la solución es tan elevado, en relación a los demás iones, que se puede considerar como monocomposicional. La sal se concentra, acumula y precipita localmente a una altura por encima del suelo, aquella en la que se alcanza un estado de equilibrio entre la evaporación del muro y el suministro de solución desde el terreno. Como los cloruros constituyen soluciones extremadamente solubles e higroscópica, sólo bajo condiciones muy especiales, como un ambiente interno extremadamente seco (tal es el caso de la Iglesia de San Jerónimo), pueden cristalizar causando deterioro. Los cloruros son extremadamente peligrosos al ser muy solubles e higroscópicos. Una vez en solución son muy móviles y pueden penetrar y romper muchas estructuras pétreas. Su higroscopicidad les permite absorber humedad del aire y retenerla en los muros; cuando cristalizan originan depósitos muy porosos que por medio de la acción capilar absorben más agua

La altura máxima alcanzada por una deposición salina viene determinada por un estado de equilibrio entre la evaporación y el ascenso capilar del fluido. Durante el ascenso capilar de la solución se produce una disminución del contenido en humedad debido a la evaporación. Cuando ésta prevalece sobre la absorción capilar, el ascenso del fluido se detiene a un nivel, incluso aunque la base del muro tenga un contenido elevado de humedad. Experimentalmente se puede calcular la altura alcanzada por un fluido que asciende por capilaridad (fórmula de Laplace y Javin). No obstante, la altura máxima estimada matemáticamente es menor que la observada en la realidad, debido a que normalmente las estructuras de los muros son heterogéneas, el modelo de capilares rectos de radio uniforme es demasiado simplificado, y no se considera la influencia de las sales solubles transportadas por el fluido. La altura alcanzada por la costra gruesa en el muro de la

habitación E de la Iglesia de San Jerónimo es superior a 3 m (en la habitación W la epsomita también alcanza esta altura). Si se tiene en cuenta que la HR es extremadamente baja (máximo un 47% en invierno) por lo que la velocidad de evaporación es elevada, ello puede proporcionar una idea del abundante suministro de solución que se produce desde la base del muro.

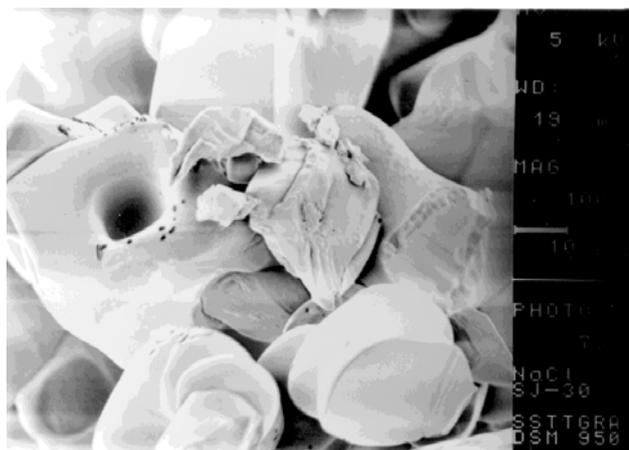


Fig. 9.7. Cristal de sulfato magnésico mostrando un hueco central y aristas redondeadas. Estas características sugieren que el hábito del cristal está evolucionado hacia un wiskers.

El hueco indica la dirección del aporte de la solución, y la angulosidad de las caras un fenómeno de disolución de las mismas.

Según el modelo de Arnold ya mencionado, los mayores daños se originan en la zona C (ver Fig. 9.9), pero no porque cristalicen sales, sino porque al ser éstas tan higroscópicas mantienen permanentemente húmedo el muro. En San Jerónimo se ha constatado que el deterioro más grande se produce efectivamente en esta zona, pero justo por el motivo contrario, ya que la halita ha cristalizado de forma masiva creando unas presiones de cristalización tan elevadas que ha sido capaz de reventar el revestimiento.

El desarrollo de las eflorescencias de nitrato de sodio y/o potasio de la habitación W es consecuencia del uso de productos de limpieza. En el resto del Templo éstas y otras sales son muy escasas, a veces sólo detectables con SEM. Son precisamente estos cristales los que muestran los hábitos más variados. El tratamiento estadístico de los resultados del análisis de estos cristales (Cap. 2) revela que corresponden a sales compuestas. Así, los triquitos están compuestos por sulfato y nitrato de potasio, siendo la proporción de K_2SO_4 mayor en la costra y de KNO_3 en las acículas. Se ha considerado que es nitrato y no carbonato, porque los triquitos aparecen sistemáticamente en aquellas eflorescencias en las que se han detectado nitratos mediante análisis químico y/o XRD.

En los agregados de cristales sueltos poco cristalinos de la zona del retablo, la cantidad de Mg (catión) detectada es claramente superior en términos equimoleculares a la del anión (SO_4^{2-}), por lo que debe existir otro anión no detectado con SEM que neutralice el Mg restante. Las posibilidades son los aniones CO_3^{2-} o NO_3^- . Se considera que es el $MgCO_3$ la fase presente por correspondencia con la naturaleza de las sales de las zonas adyacentes, donde la magnesita ha sido identificada mediante XRD. En la sal recogida del suelo el $NaNO_3$ ha debido ser aportado por los productos de limpieza.

Tabla 9.2. Presiones de cristalización (atm) de algunas sales. C/C_s =grado de sobresaturación. Tomado de Winkler, 1973.

	Sal	Vol molar (cc/mol)	$C/C_s=2$		$C/C_s=10$		$C/C_s=50$	
			0°C	50°C	0°C	50°C	0°C	50°C
Anhidrita	Ca(SO ₄)	46	335	398	1120	1325	1900	2262
Bischofita	MgCl ₂ · 6H ₂ O	129	119	142	397	470	675	803
Dodecahidrato	MgSO ₄ · 12H ₂ O	232	67	80	222	264	378	450
Epsomita	MgSO ₄ · 7H ₂ O	147	105	125	350	415	595	708
Yeso	CaSO ₄ · 2H ₂ O	74	282	334	938	1110	1595	1900
Halita	NaCl	28	554	654	1845	2190	3135	3737
Heptahidrita	Na ₂ CO ₃ · 7H ₂ O	154	100	119	334	365	568	677
Hexahidrita	MgSO ₄ · 6H ₂ O	130	118	141	395	469	671	800
Kieserita	MgSO ₄ · H ₂ O	57	272	324	910	1079	1543	1840
Miralbita	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	220	72	83	234	277	397	473
Natrón	Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O	199	78	92	259	308	440	524
Tachidrita	Mg ₂ CaCl ₆ · 12H ₂ O	310	50	59	166	198	282	336
Thenardita	Na ₂ SO ₄	53	292	345	970	1150	1650	1965
Thermonatrita	Na ₂ CO ₃ · H ₂ O	55	280	333	935	1109	1590	1891

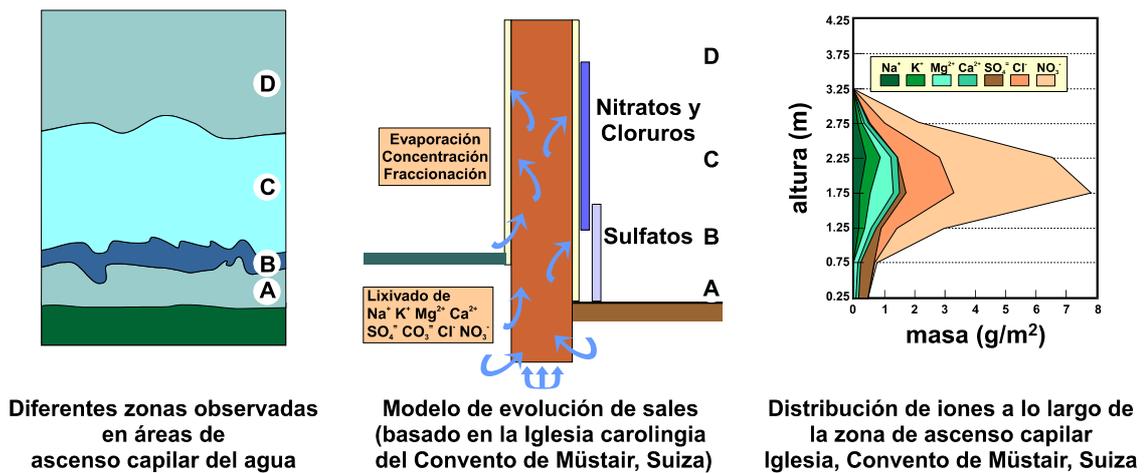


Fig. 9.9. Modelo de Arnold de evolución espacial de un sistema de sales solubles en un muro en función de su solubilidad. A) Zona de bajo deterioro, sales poco solubles. B) Región de máximo deterioro, sales de solubilidad moderada. C) Zona de alteración media, sales muy solubles e higroscópicas. D) Región sana, no existen sales solubles. Modificado de Arnold et al., (1991).

Los *wiskers* tienen una composición más heterogénea. El marcado pico de S frente a la casi ausencia del resto de elementos en el espectro nº 18 (SJE32), confirma que debe existir un catión (no detectado por las técnicas analíticas empleadas) con el que poder unirse para formar una sal; la única posibilidad es el ión amonio, por lo que debe existir sulfato amónico. El error tan elevado que se obtiene del tratamiento de los espectros nº 13 y nº 14 sugiere la presencia de cloruro cálcico, fase que no se ha podido determinar por no disponer de este patrón. En los cristales de hábito lenticular se ha empleado la estructura cristalina de cada fase para discernir la presencia de una u otra especie mineral. El KNO₃ cristaliza en el sistema ortorrómbico, una de cuyas formas es la bipirámide

romboidal que puede dar lugar a hábitos lenticulares; no así el K_2CO_3 que es monoclinico, sistema cristalino que no desarrolla estas morfologías. Por tanto los cristales lenticulares deben ser de KNO_3 .

Tabla 9.3. Humedades de equilibrio de algunas sales detectadas en los muros de edificaciones. (Tomado de Arnold et al., 1991).

Sal	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	Zona
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	41	37.7	33.7		30.8	28.6	22.4	C
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	33.7	33.6	33.5	33.3	33.1	32.8	32.4	C
$K_2CO_3 \cdot 2H_2O$	43.1	43.1	43.1	43.2	43.2	43.2	43.2	C
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	59	59.6	56.5	54	53.6	50.5	46.8	C
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	60.4	58.9	57.4	55.9	54.4	52.9	51.4	C
NH_4NO_3						61.8		B
$NaNO_3$		78.6	77.5	76.5	75.4	74.3	73.1	B
$NaCl$	75.5	75.7	75.7	75.6	75.5	75.3	75.1	B
Na_2SO_4					82	82.8	84.3	B
KCl	88.6	87.7	88.8	85.9	85.1	84.3	83.6	B
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$			86.9		90.1	88.3	88	A
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$				96.5	97.9	88.2	83.2	A
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$				95.2	93.6	91.4	87.9	A
KNO_3	96.3	96.3	96	95.4	94.6	93.6	92.3	A
K_2SO_4	98.8	98.5	98.2	97.9	97.6	97.3	97	A

A) sal raramente delicuescente, B) sal fluctuante entre sólida y delicuescente, C) sal normalmente delicuescente.

Se han identificado agregados subparalelos de cristales aciculares con composición similar en la Iglesia de San Jerónimo y en el Hospital de San Juan de Dios. En ambos casos las acículas son de KNO_3 , y la masa de cristalitos a ellas adosadas está compuesta de K_2SO_4 , KNO_3 y $NaNO_3$ (Fig. 9.10A). Se desestima que exista carbonato de potasio tanto en el Monasterio como en el Hospital porque las proporciones detectadas de nitrato son elevadas (XRD y AQ). La morfología de algunos de estos cristales curvos, con formas quebradas, un rosario de huecos paralelos al eje de crecimiento del cristal y bandas perpendiculares a ellos (Fig. 9.10B), indica un crecimiento variable y oscilatorio, y en consecuencia, unas condiciones ambientales no homogéneas e inestables (Arnold et al., 1985b).

Por último hay que hacer mención al hecho destacable de la presencia masiva de sales en el interior de la Iglesia de San Jerónimo, en oposición a la ausencia generalizada de eflorescencias en los materiales constructivos de la zona externa del edificio, en los que únicamente estudios de detalle de SEM permiten detectar su presencia. En este hecho intervienen numerosos factores de diversa naturaleza y conectados entre sí, resultando cuanto menos difícil evaluar la influencia de cada uno. La existencia o ausencia de sales está inducida por las diferencias microclimáticas en el exterior e interior de la Iglesia. Así, y como factores más determinantes para explicar la ausencia de deposiciones masivas de eflorescencias en el exterior se puede aludir a la continua disrupción granular de la calcarenita tanto por oscilaciones térmicas como a ciclos de hielo-deshielo, como al lavado superficial que ocasionan las lluvias y corrientes de viento (con material en suspensión). Por el contrario, en el interior de la Iglesia las condiciones de HR y T son inferiores y más estables que en el exterior. Al ser la evaporación más intensa los fluidos migran por capilaridad desde el muro hacia el interior, transportando las sales que disuelven de los materiales constructivos así como las aportadas por el subsuelo. Finalmente cristalizan en forma de eflorescencias, subeflorescencias y/o costras según las condiciones específicas ya mencionadas.

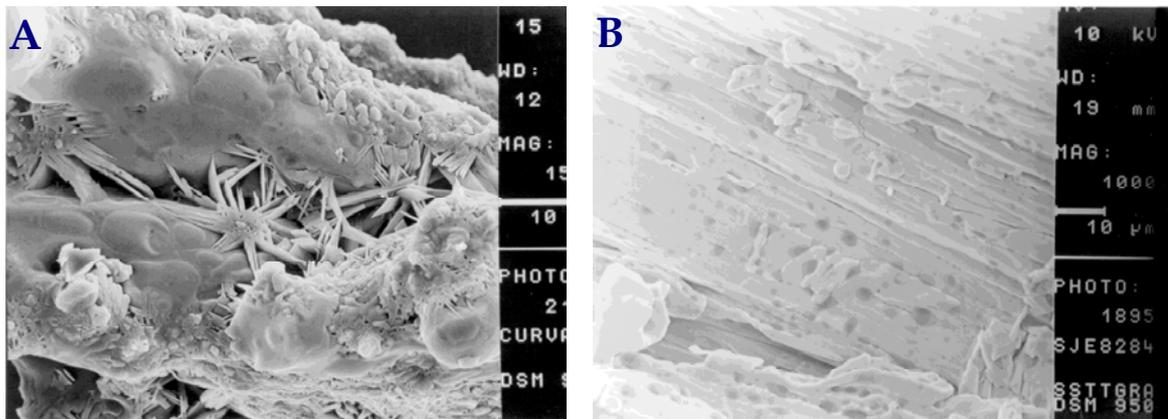


Fig. 9.10. A) Agregado de cristales con distinto hábito. Las acículas son de KNO_3 , y la masa de cristalitas de K_2SO_4 , KNO_3 y NaNO_3 . B) Agregado de cristales aciculares subparalelos. Obsérvese el rosario de huecos paralelos al eje del crecimiento del cristal, indicativo de un crecimiento oscilatorio debido a condiciones ambientales inestables.

En los travertinos, material ampliamente utilizado en la zona baja de la Iglesia, y estudiados en este Trabajo, su particular sistema porosimétrico muy heterogéneo y principalmente de macroporos (Rossi-Doria, 1985; Durán et al., 1993) favorece la elevada velocidad de secado, por lo que no se presentan ninguna de las formas de alteración observadas en las calcarenitas.

Por lo que respecta al estudio comparativo realizado en cuanto a naturaleza y hábito de las sales muestreadas en el Monasterio de San Jerónimo, Hospital de San Juan de Dios, y Parroquia del Perpetuo Socorro, hay que apuntar que cada monumento constituye un caso particular. En el Hospital de San Juan de Dios las sales más abundantes son los nitratos, introducidos por la existencia de morteros de restauración y/o el uso de desinfectantes y otros productos de limpieza. La Iglesia del Perpetuo Socorro es un caso parecido al del Monasterio de San Jerónimo, pues se encuentran las mismas sales, aunque el volumen detectado en la Iglesia de San Jerónimo es de tal envergadura que su problemática debe considerarse de forma exclusiva y específica.

*PARTE II: Estudio Experimental de
Cristalización de Sales*

Toda edificación construida en piedra o con materiales manufacturados está abocada a degradarse con mayor o menor intensidad en el tiempo. En la actualidad se considera que uno de los mecanismos de deterioro más generalizados y perjudiciales es la cristalización de sales, de modo que son numerosos los estudios sobre monumentos en que se resalta su acción destructiva. No obstante, y aunque existe una amplia literatura que describe la alteración ocasionada por las sales (también en experimentos de laboratorio), la mayoría de los trabajos son en esencia cualitativos, entre otros motivos por la dificultad que supone abordar estos estudios desde una perspectiva cuantitativa.

Es claro que el mecanismo de cristalización de sales es muy complejo, pues son numerosos los parámetros que en él intervienen. Por ello una de las vías de avance en el conocimiento de los fenómenos involucrados en el proceso de cristalización de sales es plantear nuevos y más variados experimentos, en los que se puedan controlar la influencia de las variables introducidas (e.g. saturación y propiedades físicas de la solución, incidencia de la luz solar, HR y T del ambiente, etc.).

Una de las cuestiones planteadas en las últimas décadas es el efecto de compactación o disgregación inducido por la cristalización de sales. Mientras que algunos autores indican que la presencia de sales solubles en un material pétreo no tiene por qué originar necesariamente su alteración, otros señalan que todas las sales pueden producir un fuerte deterioro (Arnold & Kueng, 1985a). Hasta ahora, estos efectos se relacionaban con el lugar de cristalización de la sal, de modo que las eflorescencias sólo afectarían al aspecto estético de la obra, y en cambio, las subeflorescencias originarían graves daños al precipitan en el seno del soporte.

Considerando los planteamientos expuestos sobre el estado actual del tema, en esta segunda parte del presente Trabajo, se desarrolla un diseño experimental de cristalización de sales y se presentan los resultados y conclusiones sobre la acción y efectos de diversas soluciones salinas en probetas de calcarenita. El objetivo es aportar luz a las lagunas existentes en este campo de Investigación.

10 DISEÑO EXPERIMENTAL

10.1 INTRODUCCION

La relación entre el deterioro de todo tipo de rocas (sedimentarias, metamórficas o ígneas) y la presencia de sales en las mismas es un tema ya fue abordado desde finales del siglo XIX por diferentes autores y desde distintos enfoques o perspectivas; éstos son, el campo de las observaciones, las teorías y los experimentos. Por lo que se refiere a las observaciones realizadas en materiales pétreos utilizados en la construcción, en 1902 Lucas (en Evans, 1970) apunta que el mecanismo de alteración por presencia de sales depende de la porosidad de la roca, naturaleza de la sal suministrada, así como la humedad y evaporación del ambiente que posibilitan su cristalización. Sugiere que los principales cambios sufridos por la roca son de tipo físico. Laurie (1925), Plenderleith (en Evans, op. cit.) y Winkler (1965) entre otros, observan igualmente que la alteración de areniscas y calizas se debe a las presiones generadas por la cristalización de sales, principalmente NaCl, MgSO₄ y Na₂SO₄. Diversas formas de alteración física ocasionadas por cristalización de sales también se ponen de manifiesto en carreteras (Weinert & Clauss, en Evans, op. cit.), guijarros de ríos (Coleman et al., 1966; Beaumont, 1968; Dunn, en Evans, op. cit.), zonas costeras (Bartrum, 1936; Wilhelmy, 1964) e incluso la Antártida (Wellman & Wilson, 1965; Nichols, en Evans, op. cit.).

Respecto a las teorías planteadas, Cobb en 1909 (en Evans, op. cit.) propuso que el efecto destructivo de la cristalización del sulfato de sodio se debía a una "fuerza de cristalización". Mortensen (en Auger, 1989) profundizó en el fenómeno indicando los poderes de cristalización de

varios tipos de sales, demostrando Cooke & Smalley (1968) que otro mecanismo por el que las sales podían destruir rocas era a causa de su elevado coeficiente de expansión térmica, superior en determinados casos al de algunas rocas. Por su parte, Honeyborne & Harris (en Evans, 1970, op. cit) y Rossi-Manaresi & Tucci (1991) demostraron que la microporosidad era más importante que la macroporosidad en el proceso de alteración de las rocas en presencia de sales.

Los primeros experimentos de desintegración de rocas por cristalización de sales fueron realizados por ingenieros. Las sales empleadas fueron KNO_3 , Na_2CO_3 , MgSO_4 y Na_2SO_4 entre otras, comprobándose que la más efectiva era ésta última (Brard, 1874). Se puso de manifiesto la analogía entre el mecanismo de cristalización de sales y el de formación de hielo (Everett, 1961; McGreevy, 1981), pero tuvieron que pasar muchas décadas antes de que los geólogos se interesaran por los experimentos. Posteriormente, y ya bien avanzado el siglo XX, los trabajos de investigación experimental derivaron hacia simulaciones más dinámicas en las que intervenían, además de las sales, otros parámetros de variabilidad cíclica, siendo Pauly (1972) un precursor en el tema. En la década de 1980 se presentaron por primera vez varios test de durabilidad de materiales sujetos a cambios en atmósferas naturales o contaminadas (Gauri, 1986; Cooke, 1979), así como nuevos simuladores dinámicos capaces de recrear una atmósfera particularmente salina (Auger, 1988).

En los últimos años hay una tendencia a cuestionar la representatividad de estos ensayos de envejecimiento acelerado, principalmente porque no son extrapolables a la realidad del monumento expuesto a la intemperie. En este caso son múltiples los factores que intervienen en el proceso de alteración, resultando difícil cuando no imposible controlarlos todos, y ello a pesar del avance tecnológico de las cámaras climáticas (modelos más sofisticados) y la aparición de nuevas técnicas analíticas como es el microscopio electrónico de barrido de ambiente (ESEM). El ESEM ha abierto nuevos campos de investigación en el área de la conservación de obras de arte, pues permite analizar muestras en su ambiente y con las condiciones similares a las que éstas presentan en un edificio, un cuadro, un tejido, etc. (Dohene et al., 1990 ; Rao, 1996).

Independientemente de que los ensayos mencionados tengan mayor o menor representatividad, numerosos investigadores los emplean en la caracterización de materiales pétreos con o sin tratamiento. Como ejemplos se pueden mencionar los trabajos realizados por Gauri (1986); Lewin (1989); Rossi Manaresi & Tucci (1989) y Durán Suárez (1995). No obstante su utilidad para evaluar el comportamiento de degradación de un determinado material pétreo, aportan muy poca o ninguna información acerca de los mecanismos que intervienen en el crecimiento de cristales. Hasta ahora han sido escasos los estudios sobre la dinámica de crecimiento de cristales (en un capilar o sustrato poroso) que consideren el comportamiento cristalográfico particular de cada sal involucrada en el proceso de alteración (Sunagawa, 1981; Zehnder & Arnold, 1989; Rodríguez Navarro et al, 1996). Es necesario disponer de datos adicionales sobre la influencia de la morfología cristalina y de la velocidad de nucleación de las sales, en base a determinar el tipo e intensidad de alteración que se produce en el medio poroso donde precipita la sal. Es en esta dirección hacia donde deben dirigirse las futuras investigaciones: considerar y determinar los parámetros físicos de las soluciones (concentración, viscosidad, tensión superficial...) que inciden sobremanera en el mecanismo del crecimiento cristalino, determinando el hábito de la sal, su migración a través del sustrato (que determina su ubicación en el seno de la roca), etc.

Otro aspecto a tener en cuenta es la no correspondencia entre los resultados de los experimentos realizados en el laboratorio y la realidad del monumento; ni siquiera en lo que a aplicación de tratamientos protectivos se refiere (Rossi-Manaresi et al., 1978). En consecuencia, es necesario plantear nuevos experimentos de cristalización de sales. Pühringer es tajante al respecto, indicando que las hipótesis convencionales relacionadas con los procesos de desintegración por sales no se pueden utilizar para explicar los mismos procesos en los materiales empleados en un monumento. Tienen que

formularse nuevas hipótesis que deben explicarse mediante experimentos muy simples (Pühringer, 1983), y no demostrarse o desaprobarse con métodos matemáticos.

La información obtenida de los diversos experimentos tiene un doble interés: por un lado de tipo teórico, y por otro de tipo práctico. Su aplicabilidad a la conservación de materiales constructivos y ornamentales del Patrimonio Histórico es evidente. En este sentido, las tendencias actuales de intervención se basan: en métodos directos, a través de la variación de los parámetros medioambientales (T y HR) que influyen en la cristalización de sales; y métodos indirectos, mediante la adición de sustancias (e.g. compuestos tensoactivos) capaces de modificar la pauta de crecimiento de las sales variando algunas características físicas de las mismas, como son la tensión superficial, que promueven el desarrollo de eflorescencias en vez de subeflorescencias (Price et al., 1994). Siguiendo esta línea, en esta Trabajo se ha diseñado una serie de ensayos que cubren tres objetivos:

- 1) Profundizar en el conocimiento de los mecanismos de transporte del fluido.
- 2) Una mayor aproximación a los procesos de degradación por presencia de sales que se dan en la realidad del monumento.
- 3) Pueden ser utilizados como test de alteración por cristalización de sales en un material que tenga unas características físico-mecánicas semejantes a la calcarenita aquí ensayada.

En la consecución del segundo objetivo ha sido decisivo emplear como sustrato del experimento el mismo tipo de biocalcarenita que la empleada en la construcción del Monasterio de San Jerónimo, y someterla a las soluciones salinas detectadas en los materiales empleados en esta Iglesia. Sólo de esta manera se pueden superar las prevenciones, lógicas por otra parte, de muchos autores sobre el hecho de que la realidad del monumento no suele tener mucha relación con los experimentos de simulación, y valorar la correspondencia de los datos obtenidos. Por tanto, mediante un experimento simple en esta Trabajo se han simulado en el laboratorio los procesos que se dan en la realidad de un monumento, sus condiciones y sus efectos. No es posible formular nuevas hipótesis de otra manera (Pühringer, 1983).

10.2 METODOLOGIA

El ensayo diseñado se basa en los estudios experimentales de cristalización de sales en un sustrato poroso rígido, esto es, una probeta, realizados por Tavira y Amorós (1980) y Lewin (1981). La evaluación de la eficacia de esta técnica como ensayo de alteración por cristalización de sales, y su posible aplicación a monumentos, queda puesta de manifiesto en trabajos precedentes (Rodríguez Navarro et al., 1993). Gauri (1986) denominó "efecto mecha" a la migración ascendente de soluciones salinas en una roca y su subsiguiente cristalización. Este nombre es suficientemente descriptivo del fenómeno de cristalización que en este experimento se reproduce.

Tipo rocoso empleado

El material pétreo utilizado en los experimentos es la biocalcarenita históricamente empleada como material de construcción y ornamental en la ciudad de Granada.

Son varias las razones en la elección de esta roca:

- con esta calcarenita se han construido buena parte de los monumentos más importantes de la ciudad de Granada, entre ellos el Monasterio de San Jerónimo;
- se encuentra ampliamente caracterizada desde un punto de vista químico, físico y mecánico (Sebastián Pardo et al., 1992), además de haber sido objeto de diversos estudios con consolidantes y protectivos con vistas a su restauración (Durán Suárez, 1996). En cambio, son

insuficientes los trabajos relacionados con la cristalización de sales, una de las principales patologías de la calcarenita una vez puesta en obra, y,

- es fuente de material de restituciones y restauraciones, ya que a partir del año 1990 se comenzaron a explotar de nuevo las canteras históricas. Esto contribuye además a disponer del material suficiente para los ensayos.

Las calcarenitas se han cortado en forma de probetas o bloques de paralelepípedos con una dimensión de 23x23x150mm.

Diseño del ensayo y condiciones de desarrollo

En la Figura 10.1 se presenta el diseño del experimento. En un cristalizador de 90 mm de diámetro y 50 mm de altura se ha vertido una solución de composición determinada, se coloca la probeta de calcarenita en posición vertical y se cubre la solución alrededor del bloque con parafina líquida dejando que se solidifique. Se pretende de este modo que sólo exista evaporación a través del material pétreo, lo que permite hacer un seguimiento de los procesos de crecimiento cristalino bajo condiciones que emulan la geometría del transporte del fluido. Por tanto, el único cuidado que hay que tener en la preparación del ensayo es derramar la parafina despacio, de modo que no se despegue de las paredes del cristalizador. Una vez solidificada, se atraviesa con una aguja hipodérmica que se deja instalada con el fin de extraer periódicamente (mediante una jeringa) solución del recipiente, lo que permite controlar la evolución de la concentración de la solución remanente.

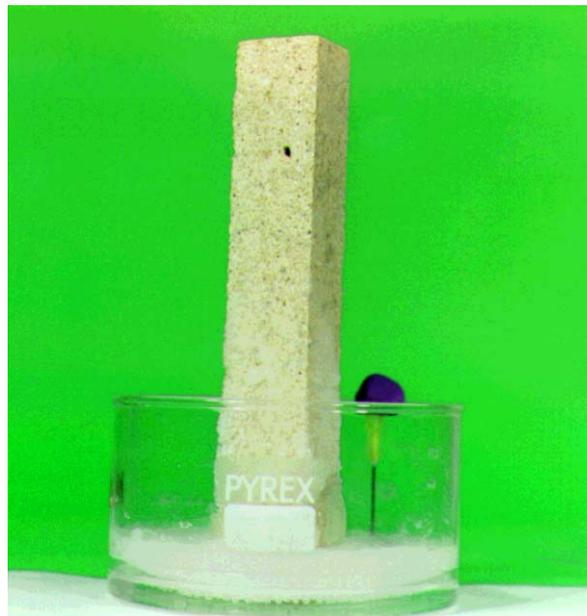


Fig. 10.1. Diseño del experimento de cristalización de sales. Cristalizador que contiene probeta impregnada por una solución salina. Para inducir la evaporación sólo a través de la roca la solución se sella con parafina. La aguja hipodérmica permite extraer periódicamente la solución remanente del recipiente. Ensayo realizado en condiciones ambientales que oscilan entre 18.7°C y 28.5°C de temperatura, y una humedad relativa entre 18% y 37%.

El desarrollo del proceso de crecimiento cristalino se ha registrado mediante documentación fotográfica. La duración media del experimento ha sido de 67 horas. Considerando como tiempo 0 el momento en que se vierte la solución en el cristizador y se cubre de parafina, los tiempos clave en que se realizaron los controles de las soluciones y las fotografías fueron a los 20 min, 1 h, 1.40 h, 4 h, 15.30 h, 16.15 h, 18.40 h, 20.15 h, 23 h, 26.30 h, 28 h, 40.30 h y 67 h. Posteriormente se extrajeron los bloques de calcarenita del cristizador dejando que la solución actuase en ellos en las condiciones ambientales. Una vez comprobado que el ensayo de cristalización se había estabilizado, se cortaron las probetas de calcarenita para realizar análisis posteriores. A lo largo del experimento se han anotado cualesquiera incidencias dignas de consideración, tales como momento de aparición de las sales (caso de ser perceptibles), evolución de sus hábitos, cantidad de solución remanente en el recipiente, secado del bloque pétreo, etc.

El experimento se ha realizado en una habitación donde el sol nunca ha incidido directamente, considerándose la luminosidad similar en las cuatro caras de la probeta. Se han realizado medidas puntuales de la temperatura y la humedad relativa del ambiente a las horas mencionadas. Debido a que la cantidad de probetas ensayadas ascendía a un total de 53, el experimento se ha tenido que realizar en varias partidas, prolongándose durante varios meses (de febrero a junio). En consecuencia, las condiciones de T y HR han variado en cada ensayo. La temperatura ha oscilado entre 18.7° y 28.5°C, y la humedad relativa entre 18.1 y 37.0%.

soluciones salinas ensayadas

La elección de las soluciones salinas se ha realizado con los siguientes propósitos:

- estudiar la pauta de cristalización de distintas soluciones salinas a través de un medio poroso, y determinar la influencia de un determinado anión y/o catión, o una combinación de ambos. A tal fin se han elegido soluciones salinas simples y mezclas de dos soluciones con un catión o un anión común;
- comparar los datos experimentales obtenidos en el laboratorio con los datos observados en condiciones reales en la Iglesia de San Jerónimo. Por tanto, también se han elegido mezclas de soluciones salinas sin ningún ión en común, y que además corresponden a las composiciones de las eflorescencias que aparecen con mayor frecuencia en el Monasterio;
- se han elegido soluciones salinas con distinto grado de concentración, ya que ésta no es siempre la misma en la realidad del monumento.

La cantidad de solución vertida en los cristizadores ha sido de 60 ml, inferior al volumen de la probeta de calcarenita que es de 79.35 cc. Así, si los bloques se mojan del todo se pondrá de manifiesto que son las fuerzas de ascensión capilar las que inciden en la subida de las soluciones por la calcarenita. Para la obtención de las soluciones salinas se han seguido las indicaciones del Manual de Química y Física (Handbook of Chemistry and Physics, 1978) referentes a las solubilidades de distintos compuestos en agua fría. Atendiendo a estos datos se han elaborado soluciones sobresaturadas y diluidas 1/50 respecto a las anteriores. Se han filtrado las soluciones en cuyo seno se han desarrollado cristales, y que pueden falsificar los datos de concentración de los iones. En la Tabla 10.1 se presentan las soluciones salinas empleadas en el experimento, sus solubilidades en agua fría, su pH y la temperatura al que se ha determinado.

Técnicas analíticas aplicadas a las calcarenitas y las sales

Como medida de control de alteración del material pétreo se han pesado los bloques de calcarenita y calculado la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos antes del ensayo y una vez finalizado.

Tabla 10.1. Soluciones salinas ensayadas en el experimento de cristalización de sales. Cc = Concentración de las soluciones: C = Concentradas, D = Diluidas (dilución 1/50), S = Solubilidad en agua fría, V = Volumen vertido en el cristizador, T = Temperatura.

#	Solución ensayada	Cc	S (mg/l)	V (ml)	pH	T(°C)
5	CaSO ₄ · 2H ₂ O	C	0.241	60	5.11	25.3
9	CaSO ₄ · 2H ₂ O	D		60	5.82	25.3
15	MgSO ₄ · 7H ₂ O	C	71.0	60	6.73	25.2
19	MgSO ₄ · 7H ₂ O	D		60	6.54	25.3
22	MgCl ₂	C	54.25	60	5.20	25.2
24	MgCl ₂	D		60	4.96	25.3
27	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	C	11.0	60	6.32	25.1
30	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	D		60	5.80	25.3
36	NaCl	C	35.7	60	6.54	25.3
38	NaCl	D		60	5.51	25.2
50	NaNO ₃	C	92.1	60	5.23	25.2
51	NaNO ₃	D		60	5.90	25.2
53	KNO ₃	C	13.3	60	6.15	25.1
55	KNO ₃	D		60	6.02	25.2
48	K ₂ SO ₄	C	12.25	60	6.11	25.2
44	K ₂ SO ₄	D		60	6.38	25.0
63	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	C	125	60	3.85	25.3
64	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	D		60	5.73	25.0
65	KCl	C	34.4	60	5.23	25.2
66	KCl	D		60	5.54	25.2
12	CaSO ₄ · 2H ₂ O + MgSO ₄ · 7H ₂ O	C		30+30	6.04	20.9
14	CaSO ₄ · 2H ₂ O + MgSO ₄ · 7H ₂ O	D		30+30	7.28	24.3
20	MgSO ₄ · 7H ₂ O + MgCl ₂	C		30+30	6.02	20.0
21	MgSO ₄ · 7H ₂ O + MgCl ₂	D		30+30	5.78	24.7
49	NaNO ₃ + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	C		30+30	6.71	20.1
58	NaNO ₃ + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	D		30+30	6.00	25.1
25	KNO ₃ + NaNO ₃	C		30+30	6.27	20.6
26 y 23	KNO ₃ + NaNO ₃	D		30+30	7.23	24.1
32	K ₂ SO ₄ + KNO ₃	C		30+30	6.76	20.8
28	K ₂ SO ₄ + KNO ₃	D		30+30	6.94	24.1
37	NaCl + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	C		30+30	6.87	20.2
46	NaCl + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	D		30+30	6.24	25.0
42	MgSO ₄ · 7H ₂ O + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	C		30+30	6.89	20.1
43	MgSO ₄ · 7H ₂ O + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	D		30+30	6.10	25.0
17	KCl + KNO ₃	C		30+30	6.39	20.8
29	KCl + KNO ₃	D		30+30	6.33	24.3
52	NaCl + KCl	C		30+30	6.19	20.4
54	NaCl + KCl	D		30+30	6.17	25.3
57	NaCl + KNO ₃	C		30+30	6.83	20.4
47	NaCl + KNO ₃	D		30+30	6.38	24.9
18	NaCl + NaNO ₃	C		30+30	6.67	20.3
45	NaCl + NaNO ₃	D		30+30	6.29	25.1
6	NaNO ₃ + Mg(NO ₃) ₂	C		30+30	4.98	20.8
1	NaNO ₃ + Mg(NO ₃) ₂	D		30+30	6.99	24.1
35	MgSO ₄ · 7H ₂ O + Mg(NO ₃) ₂	C		30+30	5.80	20.0
31	MgSO ₄ · 7H ₂ O + Mg(NO ₃) ₂	D		30+30	6.01	24.8
39	MgSO ₄ · 7H ₂ O + NaNO ₃	C		30+30	6.29	20.0
56	MgSO ₄ · 7H ₂ O + NaNO ₃	D		30+30	6.13	25.0
59	MgSO ₄ · 7H ₂ O + NaCl	C		30+30	6.73	20.9
60	MgSO ₄ · 7H ₂ O + NaCl	D		30+30	6.41	24.1
61	CaSO ₄ · 2H ₂ O + NaCl	C		30+30	6.52	20.9
62	CaSO ₄ · 2H ₂ O + NaCl	D		30+30	6.07	24.3

Al término del experimento se han realizado los siguientes estudios y análisis en las calcarenitas y las sales.

- Extracción periódica de solución del cristalizador para controlar la evolución de la concentración de los iones disueltos, con objeto de determinar qué tipo de transporte se está produciendo en todo momento a lo largo de la probeta de calcarenita (e.g. ascenso capilar, difusión, filtración, etc). En los tiempos establecidos se ha tomado 1 ml de solución que se ha diluido en 100 ml de agua destilada. Para la medición de los cationes (Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ y Na^+) y de los aniones (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) han hecho falta diluciones adicionales, por lo que los errores cometidos en las mediciones pueden ser importantes. No obstante, de lo expuesto se desprende que interesa más la pauta de variación de las concentraciones, que dan idea del tipo de movimiento del fluido, que los valores absolutos de la concentración de la solución remanente.
- Determinación de la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos en las probetas antes y después del ensayo de cristalización de sales. Con esta técnica se pretende evaluar los efectos generados tras impregnar los bloques de calcarenita con soluciones salinas; es decir, si las soluciones originan cristalización de sales y, en este caso, si su efecto es cementante o disruptivo.
- Estudio mediante lupa binocular de las morfologías cristalinas de las sales precipitadas en la superficie de los bloques de calcarenita.
- Análisis semicuantitativo mediante XRD de las fases minerales presentes en las eflorescencias.
- Comprobación de la presencia de sales en el interior de las calcarenitas y estudio de sus hábitos mediante microscopía óptica polarizada (MOP). Para ello se prepararon 56 láminas delgadas. Como se ha mencionado en el Capítulo 2, su elaboración fue dificultosa dado que la solubilidad de las sales impedía emplear agua en el proceso. Las probetas de calcarenita se tuvieron que cortar en seco. Para evitar la producción de polvo y la posible rotura de las máquinas cortadoras se optó por cortar los bloques empleando etanol (alcohol con una pureza del 99.9%). Una vez pegados los trozos al porta con parafina se rebajó su espesor en seco hasta alcanzar 30 μm , utilizando lijas de agua del nº 320; el pulido final se realizó con lijas del nº 600. Las láminas delgadas se extrajeron de distintas alturas de la probeta de biocalcarenita dependiendo de la existencia o ausencia de eflorescencias. En los casos en los que se formaron eflorescencias se prepararon láminas de la zona límite con y sin sales visibles, por lo que la altura fue diferente para cada bloque. En ausencia de eflorescencias las láminas se hicieron aproximadamente en la zona media del paralelepípedo. En todos los casos las láminas se obtuvieron de la parte interna de la zona media de los bloques de roca, tal y como se indica en la Figura 10.2, excepto en los bloques nº 27, nº 48, nº 49 y nº 61 en los que se extrajeron de la superficie de la zona alta de la probeta. Este corte permite comprobar el lugar del sustrato donde se desarrollan las sales, es decir, si corresponden a eflorescencias o subeflorescencias. Así mismo, mediante esta técnica se ha estudiado el hábito de las sales, y su relación espacial con los poros y granos minerales de la calcarenita.
- Con SEM se ha estudiado el hábito y la composición química de las eflorescencias de los bloques de calcarenita. Para una mejor visualización de las formas las sales se han colocado sobre un porta y se han metalizado con oro. El análisis se ha realizado sin ventana de berilio que permite analizar el oxígeno, el nitrógeno y el carbono, elementos que forman parte de la composición de las sales estudiadas. Por otra parte, no ha sido posible el estudio con SEM de las láminas delgadas elaboradas para el estudio de microscopía óptico-polarizada, puesto que el pulido insuficiente de éstas imposibilitó el análisis mediante microscopía electrónica.
- Con objeto de comprobar el efecto disruptivo o cementante de las sales (Rossi-Manaresi, 1991), se ha caracterizado el sistema poroso de las calcarenitas después de haberlas sometido a la cristalización de sales. En la elección de los trozos de material pétreo analizados se ha

seguido el mismo criterio que en el caso de las láminas delgadas. Se ha calculado la porosidad total y determinado la distribución del sistema poroso de 20 trozos de calcarenita pertenecientes a 16 probetas del experimento, y comparado con el sistema poroso de la calcarenita original de cantera.

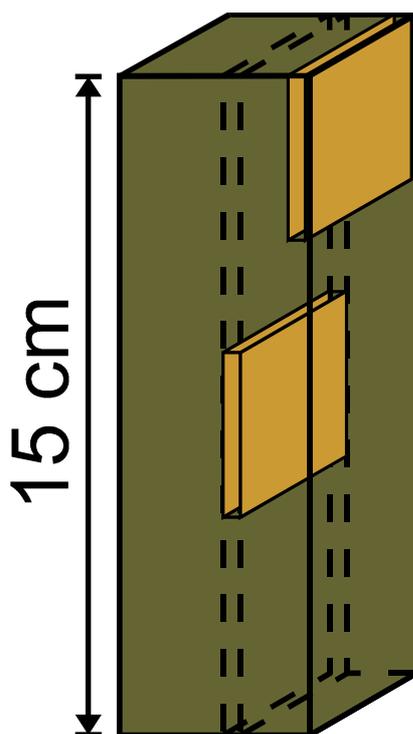


Fig. 10.2. Esquema del lugar de extracción de las láminas delgadas a distintas alturas de la probeta, dependiendo de la presencia o ausencia de eflorescencias. En este último caso las láminas delgadas se han realizado de la parte interna de la zona media de la calcarenita, en el lugar indicado en la figura. En los casos en que el volumen de eflorescencias es elevado las láminas se extrajeron de la superficie de la parte más alta de la probeta.

11 RESULTADOS

Habida cuenta de la abundante información que se puede extraer sobre el efecto que las soluciones salinas ensayadas tienen en las probetas de calcarenita (cada una de las cuales abarca por sí misma un extenso campo de investigación), el lector puede apreciar la complicación que supone presentar los resultados de forma clara y concisa, aparte de mencionar todos los fenómenos que en el proceso de cristalización intervienen. Es por ello que en este Trabajo se ha optado por exponer los resultados en el siguiente orden:

1) En primer lugar se presentan las observaciones *de visu* de los ensayos de cristalización de sales, es decir, de las transformaciones sufridas por las probetas sometidas a las soluciones salinas simples (diluidas y concentradas), y a continuación los cambios ocasionados por las soluciones mezcla (diluidas y concentradas). Con objeto de determinar la influencia de un catión o anión determinado en la solución salina, y en consecuencia en el deterioro de la calcarenita, los resultados se obtienen de las comparaciones realizadas entre diferentes soluciones simples y mezcla. Estas comparaciones se ha realizado entre:

- soluciones simples con idéntico catión pero diferente anión, lo que permite extraer conclusiones sobre los aniones;
- soluciones simples con similar anión pero diferente catión, obteniéndose conclusiones sobre la influencia de los cationes;
- soluciones mezcla con un catión común, tal que se obtiene información acerca de la actuación conjunta de los aniones de la solución;

- soluciones mezcla con un anión común, que proporcionan información sobre la acción conjunta de los cationes de la solución, y,
 - soluciones con iones diferentes. Estas corresponden a las soluciones salinas detectadas en La Iglesia de San Jerónimo, por lo que permiten comparar la realidad del monumento con los experimentos en laboratorio.
- 2) A continuación se hace referencia a la evolución en términos de concentración de las soluciones salinas remanentes en los cristalizadores.
- 3) Seguidamente se presentan los resultados de la interacción calcarenita-sal determinados mediante diferentes técnicas analíticas. Estas son:
- cálculo de la velocidad de impulsos ultrasónicos en la biocalcarenita antes y después del experimento de cristalización, cuyo fin es determinar el efecto de compactación y/o disgregación de las sales en la roca;
 - composición mineralógica de las eflorescencias de las probetas;
 - estudio morfológico mediante LB, MOP y SEM de las subeflorescencias y eflorescencias de las probetas, y,
 - análisis porosimétrico de determinadas calcarenitas ensayadas con una misma solución salina (diluida y concentrada), comparando los resultados con el estudio del sistema poroso de la calcarenita original de cantera.

11.1 OBSERVACIONES DE VISU DE LAS PROBETAS DE BIOCALCARENITA

Los resultados de cada una de las 53 probetas de calcarenita ensayadas con distinta solución salina y diferente concentración se presentan en forma de fichas (se adjuntan en el Anexo III). En cada ficha aparece el número de probeta y el número del experimento, la solución salina ensayada, si es concentrada o diluida, su peso antes y después del experimento, la altura alcanzada por la solución en la probeta en diferentes tiempos, la altura donde se elaboró la lámina delgada, la temperatura y la humedad relativa del ambiente en los tiempos de medida establecidos, así como observaciones realizadas en la probeta a lo largo del ensayo, tales como existencia de eflorescencias, abombamientos, manchas, grietas y cantidad de solución remanente en el cristalizador.

Es clara la diferente acción de las soluciones dependiendo de su concentración. En general las soluciones diluidas no originan eflorescencias. La solución salina vertida al cristalizador se evapora casi por completo. No se aprecia variación de peso en las probetas antes y después del ensayo. Con alguna excepción (e.g. $\text{CaSO}_4 + \text{NaCl}$) las probetas se mojan del todo entre las 15-23 h del inicio del experimento, y se secan completamente entre 3 y 6 días. Las soluciones concentradas desarrollan eflorescencias (excepto las soluciones de KNO_3 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ y MgCl_2). Las sales suelen cristalizar primero por las aristas, y la mayoría de las veces presentan forma de arco (Fig. 11.1). Se aprecia variación espacial y temporal de las eflorescencias. El volumen de solución salina remanente en el cristalizador es aproximadamente $\frac{3}{4}$ del inicial. El peso de la probeta aumenta del orden de 10 a 30 g finalizado el experimento. Únicamente se ha ensayado una solución con calcio, que es el sulfato cálcico (diluido y concentrado). En ambos casos las probetas se comportan de forma similar. Se mojan del todo a las 15.30 h, se secan totalmente a las 63 h, y no presentan eflorescencias.

Comparación entre soluciones simples con un catión común

- Soluciones con Na. El ascenso por la probeta de soluciones diluidas de NaCl y NaNO₃ es similar; las rocas se mojan del todo a las 15 h y no desarrollan eflorescencias. El Na₂SO₄ · 10H₂O moja del todo la probeta a las 28 h y aparecen eflorescencias a las 26 h. En las soluciones concentradas, el Na₂SO₄ · 10H₂O asciende más rápidamente que el NaNO₃, y éste que el NaCl. Las eflorescencias aparecen respectivamente a las 20 h, 10 h y 17 h. El Na₂SO₄ · 10H₂O cristaliza primero en la zona superior del bloque, el NaNO₃ y el NaCl cristalizan en la parte inferior y continuando hacia arriba. Las morfologías de las sales de sulfato y nitrato de Na varían dependiendo de la altura a la que aparecen en el bloque, siendo los cristales de NaCl siempre globulares. En los cristalizadores con Na₂SO₄ · 10H₂O y NaCl se han formado cristales en la solución remanente a partir de las 71 h (Fig. 11.2). En ambos casos se produce pérdida de material pétreo en la probeta.
- Soluciones con K. Las soluciones diluidas de KCl, KNO₃ y K₂SO₄ mojan totalmente las probetas a las 15 h, pero el K₂SO₄ asciende con mayor rapidez en los primeros minutos. Las probetas se secan a los tres días. No hay desarrollo de eflorescencias. Respecto a las soluciones concentradas, el KNO₃ no origina eflorescencias y su comportamiento es similar a la solución diluida. Con KCl aparecen *wiskers* a las 15 h y más tarde cristales con hábitos variados por toda la probeta, la cual empieza a secarse a las 75 h. Con K₂SO₄ las sales sólo se detectan al tacto a las 40 h. y la calcarenita permanece totalmente mojada a las 90 h (Fig. 11.3A).
- Soluciones con Mg. Las soluciones diluidas de Mg(NO₃)₂ · 6H₂O y MgSO₄ · 7H₂O mojan los 15 cm de la probeta a las 15 h, y el MgCl₂ a las 20 h. No hay desarrollo de eflorescencias. Las horas de secado de la calcarenita son muy dispares; el MgSO₄ · 7H₂O se seca a las 23 h, el Mg(NO₃)₂ · 6H₂O a las 40 h, y el MgCl₂ permanece mojado pasado un mes del inicio del ensayo, debido a su elevada higroscopicidad. En cuanto a las soluciones concentradas, el MgCl₂ moja toda la probeta a las 67 h (el excesivo tiempo empleado en relación a las demás se debe a la elevada viscosidad de esta solución), y el Mg(NO₃)₂ · 6H₂O y MgSO₄ · 7H₂O no llegan a humedecerla del todo, destacando ésta última que sólo alcanza hasta el cm 5 (Fig. 11.3B). No hay desarrollo de eflorescencias con MgCl₂. Con MgSO₄ · 7H₂O aparecen escasas eflorescencias y sólo en la parte inferior mojada de la probeta. Destacando la formación de grietas con la consiguiente rotura de la calcarenita. Con Mg(NO₃)₂ · 6H₂O cristalizan sales primero en la zona baja y después por toda la probeta con distintas morfologías, dependiendo de la altura (Fig. 11.3C).

Comparación entre soluciones simples con un anión común

- Soluciones con SO₄²⁻. Las soluciones diluidas de K₂SO₄ y MgSO₄ · 7H₂O no originan eflorescencias, secándose las probetas con esta última a las 23 h. El Na₂SO₄ · 10H₂O desarrolla eflorescencias por toda la calcarenita. Excepto con sulfato cálcico, todas las soluciones concentradas forman eflorescencias, pero con distinta localización y volumen. Con K₂SO₄ y MgSO₄ · 7H₂O cristalizan sales (casi imperceptibles) en la zona baja de la probeta. Las sales de sulfato de Na crecen a partir del cm 8 y son muy abundantes.
- Soluciones con Cl⁻. Con soluciones diluidas no hay eflorescencias en los bloques de calcarenita. Las probetas se han mojado y secado al mismo tiempo con KCl que con NaCl, siendo el comportamiento del MgCl₂ diferente, pues la probeta tarda más tiempo en humedecerse y permanece así más de un mes. Por tanto, es el Mg el responsable del diferente comportamiento de las sales. Respecto a las soluciones concentradas, el MgCl₂ no origina eflorescencias, actuando sobre la calcarenita de igual modo que la solución diluida. El NaCl y KCl tienen un comportamiento diferente al de sus soluciones homónimas diluidas, pues hay cristalización de sales. Con NaCl los cristales son granulares en la zona inferior del bloque, y con KCl tienen diferente morfología dependiendo de la altura a la que aparezcan.

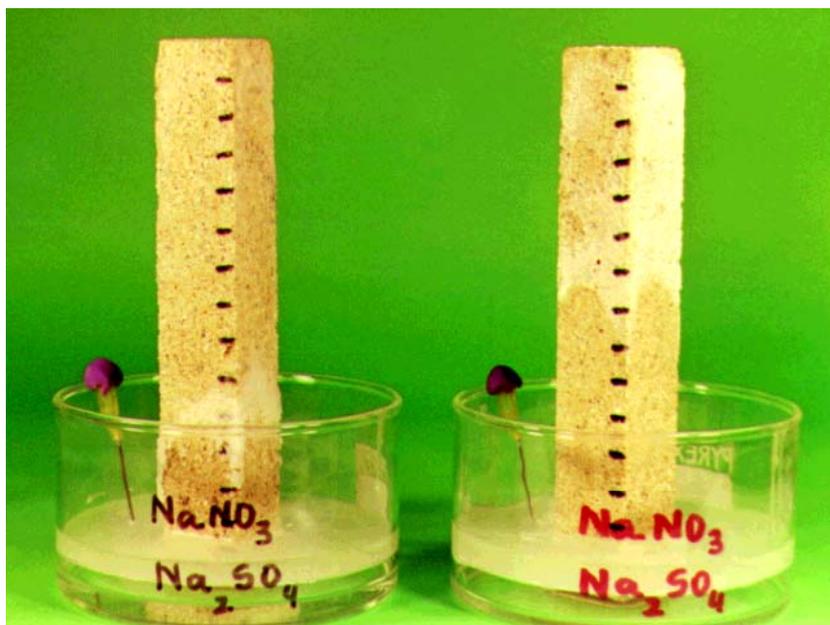


Figura 11.1. Cristalización de las eflorescencias preferentemente en las aristas de las probetas, y continuación por el centro de las caras presentando forma de arco.

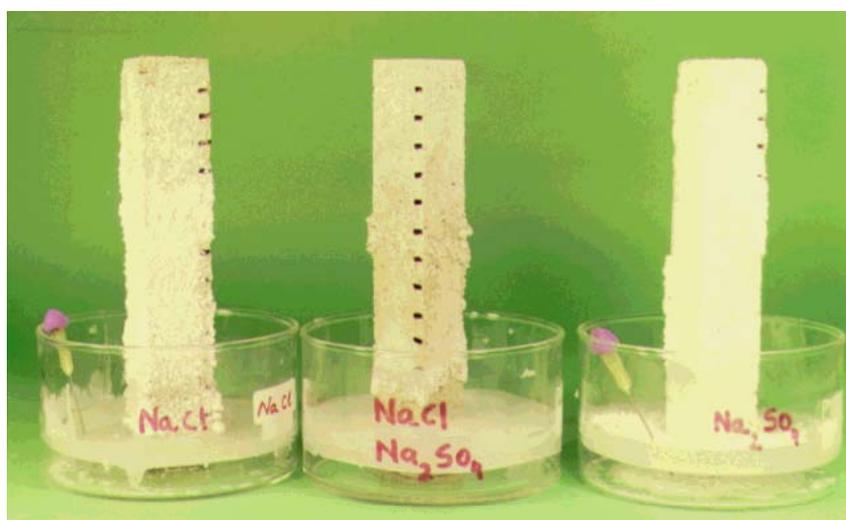


Figura 11.2. Desarrollo de eflorescencias en probetas sometidas a la acción de soluciones simples concentradas con un catión común (NaCl y $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), y su comparación con la solución mezcla correspondiente. Obsérvese el diferente hábito y lugar de cristalización de las sales en las calcarenitas, así como la precipitación de cristales en el fondo del cristalizador que contiene $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, y crecimiento de cristales dendríticos en las paredes del recipiente que contiene solución de NaCl .

- Soluciones con NO_3^- . En las soluciones diluidas el comportamiento del NaNO_3 , KNO_3 y $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ es similar. Las probetas se mojan del todo y se secan a las mismas horas, y no hay cristalización de eflorescencias. En las soluciones concentradas el KNO_3 actúa de la misma manera que el diluido. Con NaNO_3 y $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ aparecen eflorescencias sobre las 10 h en la parte baja de la probeta, que luego se extienden hacia arriba con diferentes morfologías según la solución salina.

Comparación entre soluciones mezcla con un catión común y sus correspondientes soluciones simples

Soluciones con Na

- $\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. En la mezcla diluida el bloque de calcarenita se moja del todo a las 20 h, con NaCl a las 15 h y con $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ a las 26 h. No hay desarrollo de eflorescencias con la solución mezcla ni con NaCl , pero sí con $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Ello sugiere que en la solución mezcla la influencia del NaCl es tal que inhibe la acción cristalizadora del sulfato. Con la solución mezcla concentrada las eflorescencias aparecen antes que en las soluciones simples, siendo el lugar de aparición (zona baja) y la morfología de la sal (granular) similar a las eflorescencias cristalizadas con la solución de NaCl , volviendo a ponerse de manifiesto la mayor influencia del NaCl en la mezcla (Fig. 11.3D).
- $\text{NaCl} + \text{NaNO}_3$. La solución mezcla diluida tiene el mismo comportamiento que las soluciones simples, en las que su modo de actuar es a su vez similar. En la mezcla concentrada las eflorescencias aparecen a una hora intermedia entre las horas en que lo hacen las sales de las soluciones simples. Con las tres soluciones las sales cristalizan al principio en la parte baja de la probeta, pero su hábito, aspecto y lugar de localización son distintos (Fig. 11.3E).
- $\text{NaNO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Con la solución mezcla diluida las eflorescencias aparecen a las 20 h y con $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ cristalizan pasadas 40 h. En ambos casos las eflorescencias no se ubican ni tienen morfología parecida, no existiendo sales con NaNO_3 . En la solución mezcla concentrada las sales se forman un poco más tarde que en las soluciones simples. La localización y la morfología de las sales es también distinta a las de las soluciones simples (Fig. 11.3F). En este caso parece que ambas soluciones simples ejercen similar influencia en la mezcla.

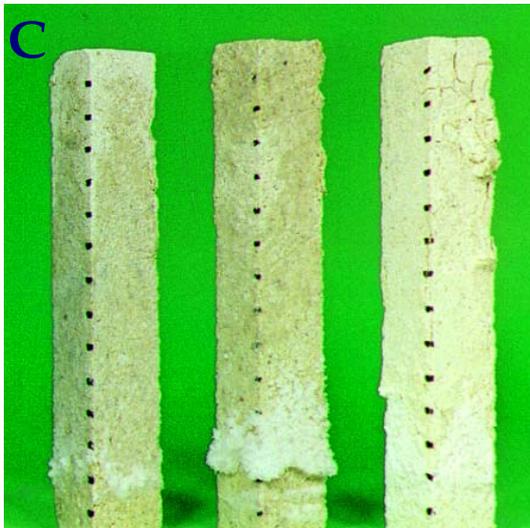
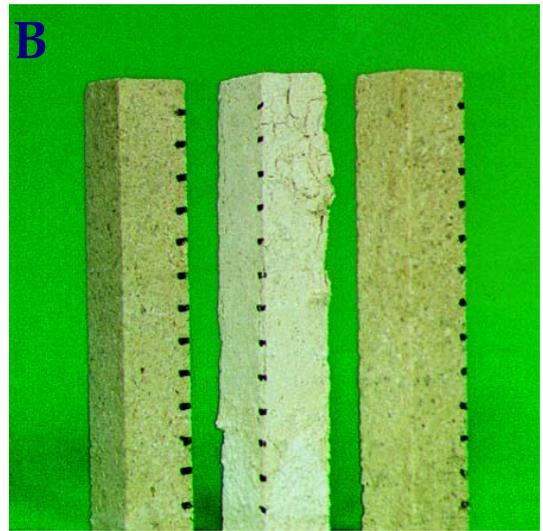
Soluciones con K

- $\text{KNO}_3 + \text{K}_2\text{SO}_4$. La solución mezcla diluida se comporta del mismo modo que las soluciones simples. No hay desarrollo de eflorescencias, y las probetas se mojan y se secan a las mismas horas. En la solución mezcla concentrada se constata la presencia de eflorescencias al tacto, igual que en la solución de K_2SO_4 , no existiendo desarrollo de sales con KNO_3 . Por tanto, en la mezcla influye más la presencia del ión sulfato.
- $\text{KCl} + \text{K}_2\text{SO}_4$. La solución mezcla diluida se comporta de forma semejante a las soluciones simples. No hay desarrollo de eflorescencias y las probetas se mojan y se secan en el mismo período de tiempo. En la solución mezcla concentrada las eflorescencias aparecen casi a la misma hora que con KCl , aunque las morfologías de los cristales y su localización es diferente.
- $\text{KNO}_3 + \text{KCl}$. La solución mezcla diluida se comporta del mismo modo que las soluciones simples. No hay desarrollo de eflorescencias y las probetas se mojan del todo y se secan a las mismas horas. En la solución mezcla concentrada se originan eflorescencias al igual que con la solución de KCl , pero no con la de KNO_3 . Por tanto, en la mezcla influye más el ión cloruro. El lugar de aparición de las sales y su hábito es ligeramente diferente. Únicamente con la solución de KCl cristalizan *wiskers*.

Soluciones con Mg

- $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. La solución mezcla diluida se comporta de forma semejante a las soluciones simples. No hay desarrollo de eflorescencias y las probetas se mojan del todo y se secan a las mismas horas. La solución mezcla concentrada no moja del todo la probeta, lo mismo que ocurre con las soluciones simples. Las eflorescencias cristalizan pasadas 67 h (más tarde que en las soluciones simples) y su localización y morfología es distinta a la de aquellas. Por tanto, en el desarrollo de sales deben haber influido la presencia simultánea de los diferentes iones (Ver Fig. 11.3C).
- $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{MgCl}_2$. La solución mezcla diluida no origina eflorescencias, como tampoco las soluciones simples, secándose la probeta alrededor de las 40 h. El MgCl_2 mantiene húmeda la calcarenita pasado un mes, y con $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ la probeta se seca a las 23 h. Así, la influencia del sulfato ha sido mayor que la del cloruro. Con la solución mezcla concentrada y con $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ cristaliza una costra pasadas las 67 h, no apareciendo sales con MgCl_2 (Ver Fig. 11.3B).

Fig. 11.3. Comparación del efecto alterológico y desarrollo de eflorescencias ejercido por soluciones salinas simples (con un ión en común o sin iones comunes), y su correspondiente solución mezcla. En todos los casos las soluciones salinas son concentradas. En las fotografías la probeta de la izquierda es la tratada con la solución mezcla, y hacia la derecha las soluciones salinas ensayadas se corresponden con el orden en que aparecen en los distintos casos presentados seguidamente. **A) KNO_3 y KCl .** Sólo aparecen eflorescencias (morfología granular) con la solución de KCl y la solución mezcla en la parte baja de la probeta y particularmente en las aristas. **B) $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y MgCl_2 .** Las probetas permanecen mojadas en presencia de MgCl_2 , apreciándose una fina costra de sal y formación de grietas en la calcarenita con $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. **C) $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.** La cristalización de sales es mayor con las soluciones que contienen nitrato, apareciendo los cristales con hábito granular en la parte inferior de la calcarenita. La probeta ensayada con $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ permanece húmeda un mes después de finalizado el ensayo, la tratada con $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ está completamente seca y fracturada en la zona más alta, y la probeta impregnada con la mezcla presenta secos los vértices superiores. **D) $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ y NaCl .** Ambas soluciones originan gran desarrollo de eflorescencias, siendo diferente su hábito y ubicación en las probetas. Las eflorescencias de sulfato sódico son pulverulentas mientras que las de NaCl son duras y de hábito granular. En ambos casos se aprecia desprendimiento del material calcáreo, siendo más evidentes los reventones en la probeta ensayada con NaCl y la solución mezcla. **E) NaCl y NaNO_3 .** Las eflorescencias son muy abundantes en los tres casos, pero las morfologías difieren. Sólo se aprecia disgregación del material en la probeta impregnada con NaCl . **F) $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ y NaNO_3 .** Las soluciones simples originan más volumen de eflorescencias que la correspondiente solución mezcla. Con la solución de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ las sales que cristalizan son pulverulentas apreciándose disgregación en la roca. Con NaNO_3 las sales son duras y no infligen daño al sustrato, hecho que se ha comprobado ocurre en la probeta tratada con la solución mezcla.



Comparación entre soluciones mezcla con un anión común y sus correspondientes soluciones simples

Soluciones con SO_4^{2-}

- $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. La solución mezcla diluida tiene el mismo efecto en la probeta que las soluciones simples. Estas se mojan del todo y se secan a la misma hora, y no hay desarrollo de eflorescencias. Con la solución mezcla concentrada se origina una fina costra y la rotura de la calcarenita, igual que con el $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. No se detectan ninguna de estas evidencias con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, por lo que la influencia del Mg en la mezcla parece ser mayor (Fig. 11.3G).
- $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. La solución mezcla diluida y el $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ no originan eflorescencias, que sí aparecen con $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Con la solución mezcla concentrada y con $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ las sales cristalizan a las dos semanas y son duras. Con $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ las sales se forman a partir de las 20 h y tienen diferente hábito y dureza dependiendo de la altura a que se forman en el bloque y del momento en que aparecen (Fig. 11.3H).

Soluciones con Cl^-

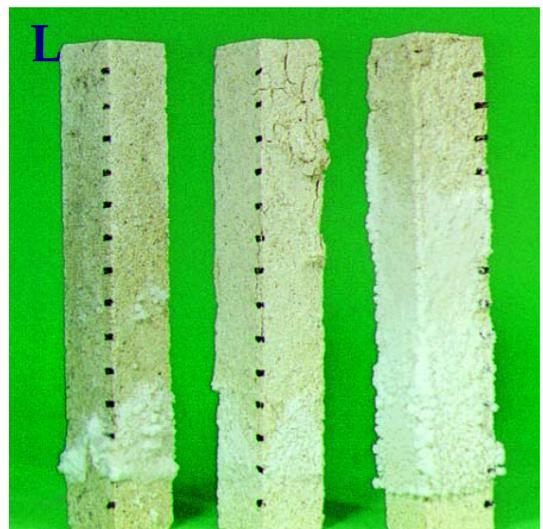
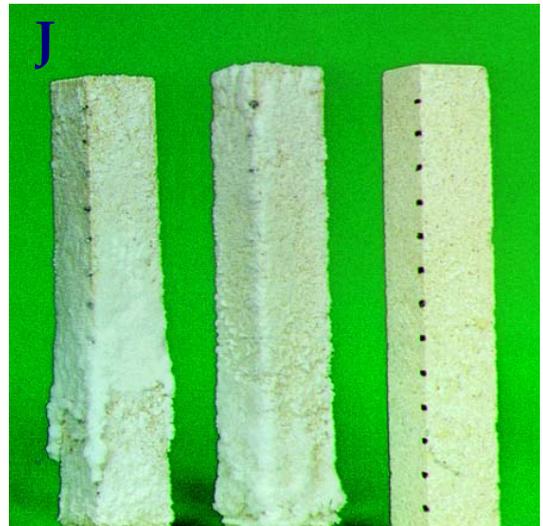
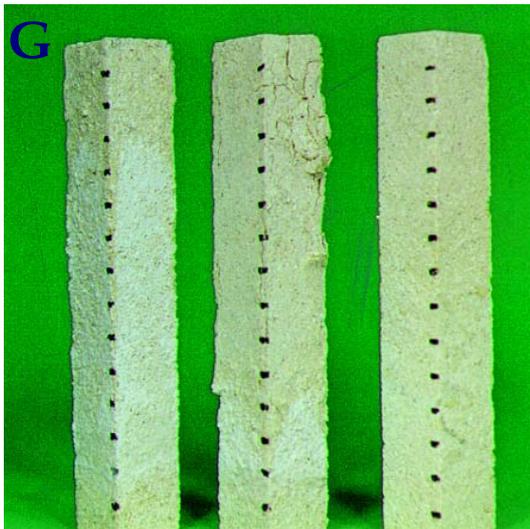
- $\text{NaCl} + \text{KCl}$. La solución mezcla diluida y las soluciones simples no originan eflorescencias, su comportamiento es similar. Con la solución mezcla concentrada la aparición de sales se produce antes que con NaCl, y las morfologías de los cristales se parece más a los de la probeta con KCl (Fig. 11.3I).

Soluciones con NO_3^-

- $\text{NaNO}_3 + \text{KNO}_3$. La solución mezcla diluida se comporta de la misma manera que las soluciones simples. No hay desarrollo de eflorescencias. La solución mezcla concentrada y el NaNO_3 producen eflorescencias, no así el KNO_3 , pero las sales son distintas en cuanto a dureza, siendo pulverulentas las originadas con NaNO_3 (Fig. 11.3J).
- $\text{NaNO}_3 + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. La solución mezcla diluida y las soluciones simples correspondientes actúan de forma similar, aunque la solución mezcla asciende más lentamente por la roca. No hay desarrollo de eflorescencias. Con la solución mezcla concentrada las primeras eflorescencias cristalizan a mayor altura que con las soluciones simples. Las morfologías de los cristales *de visu* parecen similares en los tres casos.

Fig.11.3. (continuación). Comparación del efecto alterológico y desarrollo de eflorescencias ejercido por soluciones salinas simples y su correspondiente solución mezcla. En las fotografías la probeta de la izquierda es la tratada con la solución mezcla, y hacia la derecha las soluciones salinas ensayadas se corresponden con el siguiente orden.

G) $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Sólo hay escasas eflorescencias con las soluciones que contienen sulfato magnésico, que cristalizan como un fina costra por toda la probeta. En la probeta tratada con $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ las sales aparecen en la zona baja y es el único caso en que se detecta rotura de la calcarenita. **H) $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.** El desarrollo de eflorescencias es muy abundante con $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, siendo casi nulo con la solución de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y la solución mezcla. **I) KCl y NaCl .** La solución mezcla origina sales sólo en la parte inferior de la calcarenita, con crecimiento de whiskers, apareciendo las eflorescencias por toda la roca con las soluciones simples. En las tres probetas domina la morfología granular en las sales. **J) NaNO_3 y KNO_3 .** No hay formación de eflorescencias con la solución simple de KNO_3 , pero sí con la solución mezcla y con NaNO_3 , siendo el hábito de los cristales diferente. **K) KNO_3 y NaCl .** Únicamente hay cristalización de eflorescencias en presencia de NaCl. El desarrollo de sales es muy abundante con la solución simple, además de originar rotura de la roca, hechos que no se aprecian en la probeta impregnada con la solución mezcla. **L) $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y NaCl .** El NaCl origina abundante sales, siendo su efecto menor en la solución mezcla. Con ClNa no se aprecia rotura de la roca.



Comparación entre soluciones compuestas sin iones en común

- CaSO₄ · 2H₂O + NaCl. Con la solución mezcla diluida la probeta no se humedece del todo, mojándose completamente la calcarenita con las soluciones simples a las 15 h. La hora de secado es muy distinta en los tres casos. No hay desarrollo de eflorescencias. En la solución mezcla concentrada y con NaCl hay formación de sales, no así con la solución de CaSO₄ · 2H₂O. Las eflorescencias se forman a la misma hora y en la zona baja, apareciendo primero en las aristas. La morfología de los cristales es granular, aunque la mezcla origina además una costra en la parte alta de la probeta.
- NaCl + KNO₃. La solución mezcla diluida y las soluciones simples tienen el mismo comportamiento sobre la probeta, pero con KNO₃ la probeta tarda más en secarse. No hay desarrollo de eflorescencias. La solución mezcla concentrada y el NaCl originan formación de sales, no así el KNO₃. El lugar de aparición de las eflorescencias, su extensión y morfología difiere según la solución ensayada, por lo que se deduce que en la cristalización originada por la mezcla han influido los distintos iones presentes (Fig. 11.3K).
- MgSO₄ · 7H₂O + NaNO₃. La solución mezcla diluida y las soluciones simples se comportan de forma similar sobre las probetas. Estas se mojan del todo y se secan a las mismas horas. No hay eflorescencias. La solución mezcla concentrada y las correspondientes soluciones simples originan eflorescencias, pero en los tres casos la localización de las sales, su volumen y morfología es distinta, lo que sugiere que en la mezcla han influido los diferentes iones presentes en la solución.
- MgSO₄ · 7H₂O + NaCl. La solución mezcla diluida y las soluciones simples actúan de forma parecida sobre las probetas. No hay desarrollo de eflorescencias. Con las tres soluciones concentradas se originan eflorescencias a distintas alturas. La solución mezcla y el NaCl originan sales con morfologías más parecidas, de modo que parece mayor la influencia del NaCl en la mezcla (Fig. 11.3L).

11.2 EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LAS SOLUCIONES SALINAS

El objetivo es identificar el tipo de flujo que está actuando en cada momento en el seno de las probetas de calcarenita, a través de la variación de la concentración de los iones de las soluciones salinas remanentes en los cristalizadores. De lo mencionado se desprende que no interesa tanto el valor absoluto de los datos de concentración analizados, sino su evolución en el tiempo. Además, dichos valores pueden estar sujetos a errores, en algunos casos elevados, debido a las altas diluciones a que se han sometido las soluciones salinas. Por otra parte, se ha realizado la medición del ión Ca²⁺ en todas las soluciones, puesto que aportará información acerca del fenómeno de disolución que está sufriendo la calcarenita (cemento y/o áridos) como consecuencia del poder corrosivo de las soluciones salinas actuantes. Dicho poder depende del pH de las mismas, que es ligeramente ácido en todas y muy especialmente en las soluciones de MgCl₂ y Mg(NO₃)₂ · 6H₂O. En este caso sí interesa el valor absoluto de la concentración del catión, puesto que a mayor concentración se asume que la acción alterológica de la solución es superior.

Las diluciones realizadas han sido las adecuadas para cada solución en concreto, de tal modo que no se sobrepasase el límite de detección impuesto por las técnicas analíticas empleadas para cada uno de los iones medidos. Los cationes se han analizado en todas las soluciones salinas ensayadas (simples y mezcla), mientras que los aniones sólo se han determinado en las soluciones simples. En las soluciones salinas diluidas originales (dilución 1/5000) los cationes se han determinado sin necesidad de dilución adicional, al comprobarse que las concentraciones de los elementos se encontraban dentro del rango detectable por el ICP, excepto en las soluciones n° 28 (K₂SO₄ + KNO₃) y n° 58 (NaNO₃ + Na₂SO₄ · 10H₂O) que requirieron de una nueva disolución 1/10. Todas las soluciones salinas concentradas precisaron de

una dilución 1/50 para que los resultados obtenidos fueran adecuados, por lo que finalmente el análisis también se efectuó en soluciones con una dilución 1/5000. Los valores analizados de Ca fueron excesivamente bajos en las soluciones concentradas, por lo que se midió en las soluciones sin dilución 1/50 al igual que las soluciones salinas diluidas (1/5000). Los aniones se han determinado en las soluciones salinas diluidas originales añadidas a las probetas (dilución 1/5000). En el caso de las soluciones concentradas, han sido necesarias diluciones adicionales específicas según la solución salina. Así, se ha realizado una dilución 1/100 en las soluciones que contienen NaNO_3 , una dilución 1/10 en las soluciones que contienen KNO_3 , K_2SO_4 , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, y una dilución 1/20 en las soluciones que contienen KCl , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y MgCl_2 . En las soluciones con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ se ha medido además la solución diluida 1/5000.

En la Tabla 11.1 se presentan los valores de concentración de los cationes de las soluciones salinas diluidas (simples y mezcla), y en la Tabla 11.2 los valores de concentración de los cationes en las soluciones salinas concentradas (simples y mezcla). En la Tabla 11.3 aparecen únicamente los valores de concentración de los aniones de las soluciones simples diluidas y concentradas. Independientemente de los errores que las circunstancias analíticas pueden haber provocado, de los datos obtenidos se puede destacar lo siguiente:

- la dispersión de los valores obtenidos es indicativo de la pauta de evolución particular de cada ión en las diferentes soluciones salinas ensayadas, resultando arriesgado y difícil las generalizaciones;
- el modelo de variación de los iones en algunas soluciones salinas depende del grado de concentración de éstas. Por ejemplo, el ión K experimenta un descenso de concentración en la solución diluida de KSO_4 , y permanece constante en la solución concentrada;
- en las soluciones mezcla que tienen un catión común, la variación de concentración de éste es distinta a la variación que experimenta en las correspondientes soluciones simples. Así, se aprecia un descenso de concentración de Na en la solución mezcla diluida $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{NaNO}_3$, mientras que no hay variación en las correspondientes soluciones simples, y,
- en general, en las soluciones mezcla que tienen iones diferentes, la pauta de comportamiento de los cationes es disminuir ligeramente o permanecer constantes en la solución salina remanente en el cristizador, independientemente de la concentración de la solución.

Respecto al ión Ca^{2+} , era de esperar su presencia en las soluciones salinas remanentes en el cristizador, como consecuencia de la acción corrosiva de dichas soluciones en la calcarenita, y su consiguiente efecto de disolución sobre la misma. A pesar de ello, no se detecta un incremento notable en la concentración del calcio. Todos los valores registrados son inferiores a 1 ppm, excepto en las soluciones que contienen sulfato cálcico, tales como $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, etc., que son ligeramente superiores.

Tabla 11.1 Análisis químico de la concentración de los cationes (mg/l) presentes en las soluciones salinas diluidas (simples y mezclas) remanentes en los cristalizadores. # = Solución salina cuyo número se corresponde con el de la probeta ensayada. Los números añadidos tras el guión indican tiempos de control de la solución (ver pg. 155).

#	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	#	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺
60	2.2	0.18	0.3	11.5	28		0.10	11.6	
60-1	1.7	0.24		13.6	28-1		0.77	9.7	
60-3	1.6	0.60		12.0	28-2		0.26	9.3	
23		0.12	5.7	18.4	29		0.11	29.2	
55		0.23	11.5		29-1		0.17	5.6	16.0
55-1		0.37	4.9		29-2		0.33	20.5	
55-2		0.29	5.1		29-3		0.39	20.7	
55-3		0.22	5.0		30		0.20	0.1	3.3
56	6.4	0.40	0.1	30.9	30-1		0.50		2.3
56-1	1.4	0.27		16.7	30-2		0.50		2.5
62		0.43	0.2	11.8	30-3		0.75		2.5
62-1		0.20		10.9	30-4		0.90		2.6
62-2		0.30		11.6	31	6.9	0.14		
62-3		0.40		13.0	31-1	10.6	0.64		
62-4		0.30		10.5	31-2	9.7	0.40		
64-1	15.0	0.50			38		0.36		21.0
64-3	14.3	0.84			38-1		0.30		24.0
64-4	15.5	0.70			38-2		0.45		21.8
66		0.13	47.3		38-3		0.64		23.1
66-1		0.20	29.9		38-4		1.07		24.7
66-2		0.60	30.8		1	7.3	0.11		19.9
66-3		0.50	31.1		1-1	7.0	0.30		17.0
43	2.2	0.10		1.3	1-2	6.4	0.45		15.4
43-1	3.5	0.20		1.1	9		0.26		
43-2	3.6	0.38		0.9	9-1		0.69		
43-3	3.6	0.50		1.0	9-2		0.63		
44		0.27	10.4		9-3		1.14		
44-1		0.29	4.6		14	2.3	0.21		
44-2		0.26	4.7		14-1	4.0	0.50		
44-3		0.20	4.5		14-2	4.0	0.49		
45		0.11		11.6	14-3	4.1	1.60		
45-1		0.46		28.1	19	8.0	0.99	0.3	
45-2		0.40		28.8	19-1	9.5	0.39		
45-3				28.0	19-2	9.4	0.56		
46		0.13		13.2	19-3	9.6	1.09		
46-1		0.20		12.8	21	7.8	0.20		
46-2		0.20		11.9	21-1	12.5	0.50		
47		0.17	12.0	21.1	21-2	12.2	0.60		
47-1		0.16	3.5	9.7	21-3	12.7	1.26		
47-2		0.30	3.8	11.1	24	16.0	0.26	0.2	
47-3		0.40	3.7	10.2	24-1	13.3	0.54		
51		0.21	2.17	33.6	24-2	14.6	0.59		
51-1		0.33		34.3	24-3	13.7	1.11		
51-2		0.38		33.4	58		0.15	0.2	34.6
51-3		0.27		32.5	58		0.16	0.1	36.8
54		0.20	25.3	21.1	58		0.83	0.2	36.0
54-1		0.18	13.5	11.1	58-1		0.17	0.2	18.0
54-2		0.50	13.6	11.1	58-2		0.18		17.8
54-3		0.40	13.8	11.2	58-3		0.28	0.2	17.0
26-1		0.60	4.4	16.4					
26-2		0.30	4.2	16.0					
26-3		0.40	4.0	16.0					

Tabla 11.2. Análisis químico de la concentración de los cationes (mg/l) presentes en las soluciones salinas concentradas (simples y mezcla) remanentes en los cristalizadores. # = Solución salina cuyo número se corresponde con el de la probeta ensayada. Los números añadidos tras el guión indican tiempos de control de la solución (ver pg. 155).

#	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	#	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺
5-1		5.60			37		0.7		15.4
5-2		5.60			37-1		0.5		14.0
5-3		5.90			37-2		0.1		13.3
6	7.3	0.14		17.8	37-3		0.1		13.8
6-1	3.6	0.28	0.6	19.2	37-4		0.1		13.1
6-2	7.5	0.20	0.2	17.2	39	6.6	0.3	0.2	34.3
6-3	7.1	0.10		20.2	39	7.0	0.3	0.2	34.5
6-4	7.0	0.10		20.0	39-1	2.1	0.1		17.8
6-5	7.1			20.0	39-2	2.4	0.1		17.5
12	4.0	2.50			39-3	2.4	0.1		17.5
12-1	5.2	2.90			39-4	2.5	0.1		17.3
12-2	4.6	3.30			42	4.1	0.6		1.2
12-3	4.8	3.70			42-1	4.4	1.3		0.9
12-4	4.8	0.16			42-2	4.3	0.1		0.9
15	9.4	0.11			42-3	4.1	0.1		0.8
15-1	9.6	0.79			48		0.5	8.4	
15-2	9.5	0.14			48-1		0.1	7.1	
15-3	9.1	0.16			48-2		0.1	7.1	
15-4	9.0	0.15			48-3		0.1	6.8	
17		0.15	16.0		48-4		0.1	6.4	
17-1		0.13	19.6		49		0.1		17.5
17-2		0.15	19.7		49-1		0.1		1.4
17-3		0.40	19.9		49-2		0.1		1.2
18		0.10		31.2	49-3		0.1		1.3
18-1		0.10		29.5	50		0.9		37.4
18-2		0.12		29.5	50-1		0.5		34.3
18-3		0.20		30.9	50-2		0.1		36.0
18-4		0.20		29.4	50-3		0.1		34.6
20	12.4	0.57			50-4		0.1		33.5
20-1	13.2	0.70			52		0.2	24.3	21.4
20-2	13.3	0.20			52-1		0.1	14.3	11.7
20-3	12.0	0.10			52-2		0.1	14.2	11.8
20-4	12.0	0.10			52-3		0.1	14.7	12.1
22-1	16.2	0.28			52-4		0.1	14.1	11.4
22-1	14.4	0.15			53		0.5	9.7	
22-2	14.3	0.14			53-1		0.1	0.1	
22-3	14.2	0.18			53-2		0.1	0.1	
22-4	13.7	0.17			53-3		0.1	0.2	
25-1		0.10	3.8	20.7	57		0.1	4.8	12.8
25-2		0.08	4.5	18.1	57-1		0.1	4.0	11.5
25-3		0.10	4.3	17.7	57-2		0.1	3.6	11.5
25-4		0.09	4.7	17.9	57-3		0.1	3.7	11.6
27		0.09		2.5	59	3.0	0.1		13.2
27-1		0.10		2.9	59-1	2.5	0.1		11.0
27-2		0.10		2.8	59-2	2.5	0.1		11.2
27-3		0.10		2.8	59-3	2.3	0.1		11.4
27-4		0.10		2.8	59-4	2.3	0.1		11.2
32		0.50	10.0		61				12.5
32-1		0.14	0.2		61-1		3.0		11.7
32-2		0.10	9.0		61-2		3.3		11.6
32-3		0.10	9.0		61-3		3.5		12.0
32-4		0.20	9.0		61-4		3.2		11.6

Tabla 11.2. (continuación). Análisis químico de la concentración de los cationes (mg/l) presentes en las soluciones salinas concentradas (simples y mezcla) remanentes en los cristalizadores. # = Solución salina cuyo número se corresponde con el de la probeta ensayada. Los números añadidos tras el guión indican tiempos de control de la solución (ver pg. 155).

#	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	#	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺
35	11.6	0.10			63-1	17.6	0.1		1.0
35-1	12.3	0.20			63-2	18.2	0.1		
35-2	12.2	0.20			63-3	18.0	0.1		
35-3	12.7	0.13			63-4	19.0	0.1		
35-4	12.4	0.14			63-5	18.0	0.2		
35-5	12.0	0.15			65			26.9	
36		0.70		27.0	65-1		0.1	30.9	
36-1		0.10		23.0	65-2		0.1	30.9	
36-2		0.10		25.0	65-3		0.1	32.0	
36-3		0.13		24.0	65-4		0.1	31.5	
36-4		0.12		24.5					

Tabla 11.3. Análisis químico de la concentración de los aniones Cl⁻, NO₃⁻ y SO₄²⁻ (mg/l) presentes en las soluciones salinas simples empleadas en el experimento de cristalización de sales, y que permanecen remanentes en los cristalizadores. # = Solución salina cuyo número se corresponde con el de la probeta ensayada. Los números añadidos tras el guión indican tiempos de control de la solución (ver pg. 155).

#	Cl ⁻	#	NO ₃ ⁻	#	SO ₄ ²⁻
22 MgCl ₂ (C)	0.35	50 NaNO ₃ (C)	0.89	5 CaSO ₄ · 2H ₂ O (C)	0.12
22-1	1.83	50-1	0.84	5-1	0.15
22-2	1.81	50-2	0.79	5-2	0.12
22-3	2.03	50-3	0.84	5-3	0.16
22-4	1.71	50-4	0.84	9-0	0.11
24 MgCl ₂ (D)	0.42	51 NaNO ₃ (D)	1.00	9 CaSO ₄ · 2H ₂ O (D)	0.37
24-1	1.88	51-1	0.94	9-1	1.04
24-2	1.99	51-2	0.81	9-2	1.40
24-3	1.57	51-3	0.72	9-3	2.44
36 NaCl (C)	40.50	53 KNO ₃ (C)	1.53	15 MgSO ₄ · 7H ₂ O (C)	1.81
36-1	35.37	53-1	0.07	15-1	1.90
36-2	38.53	53-2	0.06	15-2	1.87
36-3	36.75	53-3	0.07	15-3	1.78
36-4	38.66	55 KNO ₃ (D)	0.07	15-4	1.75
38 NaCl (D)		55-1	0.01	19 MgSO ₄ · 7H ₂ O (D)	0.10
38-1	39.48	55-2	0.09	19-1	1.91
38-2	36.85	55-3	0.07	19-2	2.07
38-3	37.92	63 Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O (C)	8.79	19-3	1.93
38-4	38.85	63-1	8.75	27 Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (C)	0.77
65 KCl (C)	1.26	63-2	8.75	27-1	0.77
65-1	0.05	63-3	9.21	27-2	0.77
65-2	0.05	63-4	8.78	27-3	0.76
65-3	0.05	64-1 Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O (D)	7.57	27-4	0.74
65-4	0.05	64-3	7.87	30 Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (D)	0.11
66 KCl (D)	1.95	64-4	9.99	30-1	0.79
66-1	1.30			30-2	0.78
66-2	1.41			30-3	0.83
66-3	1.54			30-4	0.82
				48 K ₂ SO ₄ (C)	1.30
				48-1	1.10
				48-2	1.06
				48-3	1.04
				44 K ₂ SO ₄ (D)	0.36
				44-1	1.11
				44-2	1.06
				44-3	0.82

11.3 MODELO DE INTERACCION ROCA-SAL

11.3.1 Efecto de cementación o disgregación

En este apartado se presentan los valores correspondientes a la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos en las probetas sometidas a la acción de las soluciones salinas. Así mismo se exponen los valores de velocidad de propagación de ultrasonidos en estas mismas probetas antes de someterlas al citado ensayo, a fin de controlar la heterogeneidad textural de la calcarenita. El objetivo es disponer de valores concretos de velocidad de transmisión de ondas a los que referir los valores obtenidos tras el tratamiento con las soluciones salinas. Los resultados aportados por la técnica podrán relacionarse con la cementación o disrupción de las calcarenitas por cristalización de sales, a través de las variaciones en la velocidad de propagación de las ondas de ultrasonidos. Así, un aumento de velocidad se relaciona con el grado de cementación de la calcarenita como consecuencia de la cristalización de sales en su seno (demostrándose que el fenómeno no es siempre destructivo). Por contra, la disminución de la velocidad de transmisión de ondas da idea del grado de desintegración de la roca debido al efecto disruptivo que ejercen las subeflorescencias. Es clara la relación que existe entre el aumento de la velocidad de transmisión de pulsos ultrasónicos a través de un material pétreo y la mejoría de sus propiedades físico-mecánicas (Guerrero et al., 1989). No obstante, en los casos como el presente, en el que se sabe que está actuando una solución salina, el aumento de la velocidad únicamente debe relacionarse con el sellado de los poros por las sales, no incidiendo necesariamente en una mejoría de sus características mecánicas.

Resulta arriesgado generalizar, por lo que merece aclaración el hecho de que sólo bajo ciertas circunstancias las sales podrían tener un efecto cementante. No hay que olvidar que las sales son muy sensibles a las variaciones termohigrométricas del ambiente, principalmente a la temperatura y humedad relativa que provocan ciclos de disolución-cristalización, hidratación-deshidratación, etc. Estos ciclos son los fenómenos verdaderamente perjudiciales para la integridad de un material, por lo que para evitarlos la T y HR del ambiente deben permanecer relativamente estables, asegurando de esta manera que no va a cambiar el estado físico de la sal presente.

En la Tabla 11.4 se presentan los resultados de la velocidad de impulsos ultrasónicos, y su correspondiente desviación estándar (en función del número de medidas realizadas), en los bloques de calcarenita antes del ensayo de cristalización de sales y una vez finalizado éste. Los valores de velocidad de transmisión de ondas en la dirección de máxima longitud de la probeta son los utilizados para establecer la variación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos, y de este modo el estado de deterioro de la calcarenita. No se ha obtenido respuesta en las mediciones realizadas a lo ancho de la probeta, una vez sometidas las calcarenitas a la acción de las soluciones salinas. Los valores de transmisión de pulsos ultrasónicos obtenidos antes de la realización del ensayo se incluyen en el Anexo IV. Por lo que se refiere a las probetas de calcarenita originales o no tratadas, existe una dispersión importante de valores que abarcan una franja de velocidades entre 2500 y 3200 m/s. Ello confirma una vez más la heterogeneidad de este material pétreo. El valor mínimo obtenido es de 2579.4 ± 87.3 m/s y el máximo registrado es de 3125.7 ± 114.3 m/s. Respecto a los bloques de calcarenita sometidos a la acción de soluciones salinas, se observan varios hechos:

- no ha sido posible la medida en 24 de las 52 probetas ensayadas, comprobándose *de visu* que las tratadas con solución concentrada de sulfato magnésico más sulfato cálcico, y sulfato magnésico concentrado están destrozadas. A *grosso modo* se observa que en los bloques sometidos a soluciones en las que intervienen sulfato de calcio y sulfato de calcio y/o sulfato de magnesio no se obtienen resultados ultrasónicos debido a la generación de fracturas. Tampoco se registran datos cuando el desarrollo de eflorescencias es abundante en la calcarenita;
- la mayoría de las probetas restantes (29 en total) corresponden a bloques sometidos a soluciones concentradas. En 10 de ellas se ha detectado un descenso en la velocidad de transmisión de ondas

elásticas, tanto en bloques sometidos a soluciones salinas concentradas (6 probetas) como diluidas (4 probetas). En algunos casos la disminución de los valores es significativo. Sirva como ejemplo la variación de velocidad de 2964.8 a 1222.3 m/s entre la calcarenita no tratada y la sometida a NaCl solución concentrada, y la variación de 2998.4 a 1365.1 m/s entre la roca original y la tratada con nitrato sódico más sulfato sódico diluido. En estos casos la atenuación de la velocidad de impulsos ultrasónicos a través del material pétreo se relaciona con su importante deterioro, y,

- en 18 probetas restantes la velocidad de transmisión de ondas ha aumentado en un rango que oscila entre 1 y 297 m/s, lo que podría dar idea del diferente grado de cementación de la calcarenita inducido por las diferentes soluciones salinas. En 13 de estos bloques las soluciones ensayadas son diluidas, no detectándose desarrollo de eflorescencias.

Tabla 11.4. Datos de velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos en las probetas antes y después de ser sometidas a la acción de las soluciones salinas.

NºProbeta	A	B	NºProbeta	A	B
1	2821.7 ± 95.60	-	39	2809.7 ± 67.50	2063 ± 67.80
5	2929.6 ± 102.6	-	40	2785.1 ± 64.80	1388 ± 79.80
6	2705.0 ± 99.50	-	42	2761.5 ± 97.50	-
9	2877.3 ± 85.20	-	43	2759.6 ± 87.30	2876 ± 101.5
12	2939.4 ± 66.50	Destrozada	44	2870.9 ± 94.20	-
14	2892.3 ± 87.40	2961 ± 49.0	45	2833.3 ± 93.20	2924 ± 79.80
15	2982.1 ± 110.2	Destrozada	46	2882.9 ± 74.60	2951 ± 69.80
17	2752.3 ± 59.60	-	47	2823.6 ± 94.50	2872 ± 95.20
18	2808.9 ± 84.50	-	48	2887.4 ± 49.90	2736 ± 79.40
19	2918.4 ± 94.60	2982 ± 79.60	49	2988.1 ± 87.40	2982 ± 68.10
20	2894.0 ± 67.50	3084 ± 79.40	50	2894.4 ± 94.10	2856 ± 62.40
21	2929.9 ± 79.80	2959 ± 97.10	51	2885 ± 1100.3	-
22	2864.2 ± 85.60	2797 ± 81.0	52	2763.9 ± 97.70	-
23	2837.7 ± 112.5	2915 ± 81.6	53	2863.1 ± 67.90	-
24	3069 ± 114.20	2996 ± 104.0	54	2841.5 ± 75.80	2896 ± 67.41
25	2839 ± 99.80	-	55	2876.4 ± 81.30	-
26	2839.6 ± 100.6	2900 ± 49.80	56	2841.5 ± 66.90	2852 ± 49.71
27	2901.3 ± 84.50	-	57	2850.9 ± 78.40	1365 ± 94.11
28	2926.3 ± 93.10	2955 ± 74.10	58	2988 ± 1106.3	-
29	2808.9 ± 78.20	2885 ± 56.20	59	2966.0 ± 87.30	2910 ± 78.10
30	2928.0 ± 64.30	3010 ± 79.60	60	2949.0 ± 58.90	-
31	2905.4 ± 51.20	2940 ± 84.00	61	2955.0 ± 79.70	-
32	2966.4 ± 64.20	3050 ± 96.30	62	3012.0 ± 64.80	-
35	2834.9 ± 64.30	1586 ± 81.20	63	3002.0 ± 67.90	-
36	2964.4 ± 79.10	1222 ± 61.20	64	2947.0 ± 59.70	-
37	3124.7 ± 114.3	3225 ± 46.90	65	2945.0 ± 77.90	-
38	2904.8 ± 65.50	-	66	2945.0 ± 97.80	-

Nota: A = Velocidad de propagación de ultrasonidos antes del ensayo de cristalización de sales. B = Velocidad de propagación de ultrasonidos después del ensayo de cristalización de sales. Medidas realizadas en la dirección de mayor longitud de la probeta. - = Probetas en las que no se ha obtenido respuesta de propagación ultrasónica.

11.3.2 Composición y textura de las sales y calcarenitas

Difracción de rayos X y lupa binocular

Se ha procedido a la caracterización mineralógica y textural de las eflorescencias cristalizadas en las probetas de calcarenita mediante XRD y lupa binocular. Para ello se ha realizado un muestreo de las sales atendiendo a diversas observaciones *de visu*; tales son el hábito de los cristales y el lugar donde aparecen en la probeta, que puede ser a diferente altura y en distintas caras y/o aristas. Por tanto, las características de extracción de las sales han sido específicas para cada probeta. Los resultados se exponen en la Tabla 11.5, en la que la sal se nombra con el número de la probeta ensayada seguido de una letra cuando se ha extraído más de una muestra por bloque rocoso. Se señala la solución salina actuante en la calcarenita y su concentración, facilitando de este modo la comprensión de la naturaleza de las eflorescencias cristalizadas. Además se han anotado las características morfológicas de las eflorescencias observadas mediante lupa binocular, la altura a la que éstas se han cogido, y por último su composición mineralógica (análisis semicuantitativo) determinada mediante XRD.

Se aprecia que las eflorescencias son de la misma naturaleza que la solución salina experimentada cuando ésta es simple, tal es el caso del NaCl, KCl y NaNO₃. Si la sal introducida en la calcarenita es hidratada, la sal cristaliza con menos moléculas de agua (e.g. hexahidrita y no epsomita) o es anhidra (e.g. thenardita y no mirabilita), excepto cuando la solución es de Mg(NO₃)₂ · 6H₂O ya que cristaliza la misma fase. En estos casos además se forma sulfato cálcico y carbonato magnésico. Cuando la solución salina experimentada es una solución mezcla, la composición de la eflorescencia puede ser simple o compuesta. En estos casos una fase salina de la mezcla "domina" a la otra fase salina, por decirlo de alguna forma, e incluso inhibe su capacidad de cristalizar sales. Los casos observados son los siguientes:

- si la solución salina ensayada es una mezcla de epsomita y yeso o mirabilita, domina la acción cristalizadora de la epsomita. Por contra, la cristalización de epsomita se inhibe en presencia de halita, nitrato sódico o nitrato magnésico;
- si la solución salina experimentada es de naturaleza sulfatada (e.g. sulfato magnésico, sulfato sódico o solución mezcla en la que intervenga alguna de estas fases), suelen cristalizar en la probeta eflorescencias de yeso;
- si en la solución salina ensayada existe NaCl, su poder cristalizador disminuye o inhibe la posibilidad de formar sales por parte de otras soluciones (e.g. mirabilita, KNO₃, epsomita y yeso), excepto en presencia de NaNO₃;
- si en la solución salina ensayada existe NaNO₃, su poder de cristalización inhibe o disminuye la posibilidad de que otras soluciones (e.g. KNO₃, NaCl, Mg(NO₃)₂ · 6H₂O, MgSO₄ · 7H₂O) favorezcan el desarrollo de sales. Esto no ocurre en presencia de mirabilita. La mezcla de NaNO₃ con sulfatos origina en la calcarenita sales de diferente naturaleza tales como yeso y darapskita, favoreciendo el desarrollo de carbonato sódico en presencia de KNO₃;
- la cristalización de Mg(NO₃)₂ · 6H₂O es mínima en presencia de NaNO₃. Por contra, es la eflorescencia predominante o única cuando en la mezcla salina existe sulfato magnésico;
- el poder de cristalización del KCl es dominante cuando en la mezcla hay KNO₃, presentando los cristales hábitos distintos;
- si la solución salina ensayada es una mezcla y existe Na₂SO₄ · 10H₂O, su poder de cristalización es superior al de NaNO₃. Por contra se inhibe o es menor ante la presencia de NaCl, siendo similar cuando existe sulfato de magnesio, y;
- en mezclas de solución salina en las que se ha añadido yeso, nunca cristalizan sales de esta fase mineral.

Tabla 11.5. Composición mineralógica semicuantitativa (% en volumen) de las eflorescencias cristalizadas en las probetas de calcarenita. Lugar de localización en la roca y morfología predominante de la sal.

#	Solución salina	Localización y morfología	Eflorescencia
15	MgSO ₄ · 7H ₂ O (C)	Costra amarillenta dura justo encima de la parafina	MgSO ₄ · 6H ₂ O, (MgCO ₃ · 3H ₂ O), ((CaSO ₄ · 2H ₂ O))
36	NaCl (C)	Zona superior probeta. Cristales granulares, blancos, opacos y duros	NaCl
27	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (C)	Sal pulverulenta opaca por toda la probeta. En el tope es amarillenta	Na ₂ SO ₄
30	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (D)	Idem	Na ₂ SO ₄
50A	NaNO ₃ (C)	Cm = 2. Sal cristalina, muy dura, cristales granulares	NaNO ₃
50B	NaNO ₃ (C)	Cm = 9. Cristales lenticulares, blancos, opacos, duros	NaNO ₃
50C	NaNO ₃ (C)	Cm = 12. Sal blanca, cristales granulares y duros (menos que 50 ^a)	NaNO ₃
63A	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O (C)	Cm = 2. Cristales granulares y cristalinos ; <i>wiskers</i> rectos y enrollados	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O
63B	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O (C)	Cm = 8-9. Triquitos traslúcidos	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O
63C	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O (C)	Cm = 8-9. Triquitos y <i>wiskers</i>	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O
65	KCl (C)	Sal en toda la probeta con morfología granular y bastante relieve, muy duros. Triquitos y <i>wiskers</i> (justo encima de la parafina)	KCl
12	CaSO ₄ · 2H ₂ O + MgSO ₄ · 7H ₂ O (C)	Costra dura, amarillenta y opaca por toda la probeta	MgSO ₄ · 6H ₂ O
49A	NaNO ₃ + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (C)	Cm = 2-7. Sal pulverulenta, beige, opaca	Na ₂ SO ₄ , ((CaSO ₄ · 2H ₂ O, Na ₃ (SO ₄)(NO ₃)H ₂ O))
49B	NaNO ₃ + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (C)	Cm = 10-15. Sal pulverulenta beige, opaca	Na ₂ SO ₄ , (CaSO ₄ · 2H ₂ O), ((Na ₃ (SO ₄)(NO ₃)H ₂ O))
58A	NaNO ₃ + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (D)	Cm = 2. Cristales aislados granulares, blancos opacos	NaNO ₃ , (Na ₂ SO ₄)
58B	NaNO ₃ + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (D)	Cm = 4. Costra de fácil despegue. Cristales blancos opacos	NaNO ₃
58C	NaNO ₃ + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (D)	Cm = 12-15. Sal pulverulenta traslúcida	NaNO ₃
25A	NaNO ₃ + KNO ₃ (C)	Cm = 2. En las caras hay costra fina traslúcida de cristales granulares. Dura, pero de fácil despegue.	NaNO ₃ , (KNO ₃), ((Na ₂ CO ₃ · H ₂ O))
25B	NaNO ₃ + KNO ₃ (C)	Aristas. Cristales granulares que evolucionan a costra, traslúcidos, dureza alta	NaNO ₃
25C	NaNO ₃ + KNO ₃ (C)	Cm = 4-8. Costra en las caras de probeta. De cristales duros pero muy frágiles	NaNO ₃ , ((Na ₂ CO ₃ · H ₂ O))
25D	NaNO ₃ + KNO ₃ (C)	Cm = 10-15. Cristales granulares aislados, blancos, opacos y duros. También aparecen sobre la costra	NaNO ₃ , (Na ₂ CO ₃ · H ₂ O) ((KNO ₃))
32A	KNO ₃ + K ₂ SO ₄ (C)	Cm = 8-9. Cristales duros, granulares, blancos, sin relieve	K ₂ SO ₄ , KNO ₃
32B	KNO ₃ + K ₂ SO ₄ (C)	Zona alta probeta. Idem	K ₂ SO ₄ , KNO ₃
37A	NaCl + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (C)	Borde de parafina. Cristales granulares con bastante relieve, blancos, opacos y duros	NaCl
37B	NaCl + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (C)	Cm = 8-9. Cristales granulares, beige, opacos, duros, con bastante relieve	NaCl, ((Na ₂ SO ₄))
42A	MgSO ₄ · 7H ₂ O + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (C)	Cm = 2-7. Sal no compacta, blanca, dura (menos que 42B)	MgSO ₄ · 6H ₂ O, (Na ₂ SO ₄ , CaSO ₄ · 2H ₂ O), ((MgSO ₄ · 7H ₂ O))
42B	MgSO ₄ · 7H ₂ O + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (C)	Cm = 10-15. Costra con cristales granulares, blancos, opacos, duros.	MgSO ₄ · 6H ₂ O, Na ₂ SO ₄ , ((MgSO ₄ · 7H ₂ O))
17A	KCl + KNO ₃ (C)	Cm = 3 y borde parafina. Cristales granulares, blancos, duros, con relieve, que evolucionan a 17B	KCl, ((KNO ₃))
17B	KCl + KNO ₃ (C)	Costra fina, dura y frágil, blanca traslúcida. Se desprende en bloque quedando la calcarenita limpia	KCl, ((KNO ₃))
17C	KCl + KNO ₃ (C)	Cm = 14. Pústulas duras, <i>wiskers</i> y triquitos	KCl, ((KNO ₃))
17D	KCl + KNO ₃ (C)	Cm = 2-3. Costra blanca por bajo de 17 ^a	KCl

Tabla 11.5 (continuación). Composición mineralógica semicuantitativa (% en volumen) de las eflorescencias cristalizadas en las probetas de calcarenita. Lugar de localización y morfología predominante de la sal.

#	Solución salina	Localización y morfología	Eflorescencia
57A	NaCl + KNO ₃ (C)	Cm = 2-5 en cara y aristas. Sal blanca opaca, dura, granular.	NaCl, (KNO ₃)
57B	NaCl + KNO ₃ (C)	Cm = 8-9. Costra blanca, opaca, dura, ligero relieve granular.	NaCl, ((KNO ₃))
57C	NaCl + KNO ₃ (C)	Cm = 13-15. Costra lisa, blanca, opaca, dura.	NaCl, ((KNO ₃))
52	NaCl + KCl (C)	Cristales granulares, duros, por toda la probeta.	KCl
18	NaCl + NaNO ₃ (C)	Parte superior. Cristales aislados granulares, blancos, duros. Difíciles de desprender.	NaNO ₃ , (NaCl)
6A	NaNO ₃ + Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O (C)	Justo encima de la parafina. Sal dura, blanca, opaca, morfología boitroidal, cristales huecos.	NaNO ₃ , (Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O)
6B	NaNO ₃ + Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O (C)	Cm = 10-15. Costra muy dura de cristales granulares, blancos opacos.	NaNO ₃ , (Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O)
6C	NaNO ₃ + Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O (C)	Cm = 14. Trozo de calcarenita con tono anaranjado alterada.	NaNO ₃ , Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O
35A	MgSO ₄ · 7H ₂ O + Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O (C)	Cm = 2. Costra dura, blanca, opaca, de fácil despegue	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O, (MgSO ₄ · 6H ₂ O)
35B	MgSO ₄ · 7H ₂ O + Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O (C)	Parte superior. Costra sin relieve, dura, traslúcida.	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O
39A	MgSO ₄ · 7H ₂ O + NaNO ₃ (C)	Cm = 1 por encima de la parafina. Sal blanca opaca, dura, morfología granular.	NaNO ₃ , (MgSO ₄ · 6H ₂ O)
39B	MgSO ₄ · 7H ₂ O + NaNO ₃ (C)	Cm = 3. Costra traslúcida cristalina, despegada del sustrato.	NaNO ₃ , ((Na ₃ (SO ₄)(NO ₃)H ₂ O))
59A	MgSO ₄ · 7H ₂ O + NaCl (C)	Cm = 2. Costra fina transparente, cubierta por sal granular, blanca opaca.	NaCl, (MgSO ₄ · 6H ₂ O)
61A	CaSO ₄ · 2H ₂ O + NaCl (C)	Cm = 4-5. Aristas. Sal blanca, opaca, dura, granular con bastante relieve, de fácil despegue. Hacia la cara de la probeta evoluciona a costra, de fácil despegue quedando limpia la calcarenita.	NaCl
61B	CaSO ₄ · 2H ₂ O + NaCl (C)	Cm = 8-9. Costra dura y frágil.	NaCl
61C	CaSO ₄ · 2H ₂ O + NaCl (C)	Cm = 15. Sal granular, dura, frágil.	NaCl

Nota : (C) soluciones salinas concentradas ; (D) soluciones salinas diluidas ; () contenidos minoritarios ; (()) proporciones traza. Nesquehonita: MgCO₃ · 3H₂O ; Termonatrita: Na₂CO₃ · H₂O ; Darapskita: Na₃(SO₄)(NO₃) · H₂O ; Halita: NaCl ; Thenardita: Na₂SO₄ ; Hexahidrita: MgSO₄ · 6H₂O ; Epsomita: MgSO₄ · 7H₂O ; Yeso: CaSO₄ · 2H₂O ; Silvita: KCl ; Niter: KNO₃ ; Nitratita: NaNO₃ ; Nitromagnesita: Mg(NO₃)₂ · 6H₂O.

Otros resultados se relacionan con los diversos patrones de cristalización de eflorescencias observados en las probetas, y que dependen de la naturaleza de las soluciones salinas ensayadas. Así:

- La única solución salina diluida mezcla que ha originado eflorescencias es Na₂SO₄ · 10H₂O + NaNO₃, comprobándose que la naturaleza de las sales, su hábito y localización en la probeta es diferente dependiendo de la concentración. Así, con la solución salina concentrada se forman sales pulverulentas de thenardita y darapskita por toda la probeta, pero en la zona alta la cantidad de ésta última es mayor. En ningún momento cristaliza NaNO₃. Con la solución diluida se forman por igual eflorescencias de thenardita y NaNO₃, pulverulentas en la zona baja de la calcarenita y en forma de costra en la parte alta.
- El hábito de los cristales de las eflorescencias y su estado de agregación varía con la altura y el lugar concreto de aparición en la probeta (aristas o caras), independientemente de la naturaleza de las sales. Cada tipo de sal presenta un patrón de crecimiento cristalino. Únicamente se ha comprobado que en aquellas probetas en que aparecen *wiskers* y triquitos (probetas n° 17 y n° 63. Fig. 11.4), lo hacen en las zonas intermedias o altas, donde el sustrato húmedo o aporte acuoso es menor que en el resto del bloque.



Figura 11.4. Microfotografía realizada con lupa binocular. Agregados subparalelos de cristales aciculares, triquitos y whiskers extraídos de las probetas n° 17 ($KCl + KNO_3$) y n° 63 ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$). La barra equivale a 1.5 mm.

Microscopía óptica polarizada

Los resultados del estudio óptico-petrográfico de las calcarenitas se exponen en la Tabla 11.6, en la que se indica el número de probeta ensayada, la solución salina empleada, su concentración, y las observaciones realizadas con el microscopio. Tales son el lugar de aparición de las sales en la lámina delgada, la existencia de fracturas, fenómenos de disolución del cemento o de los áridos, etc. Los resultados son los siguientes:

- Las probetas de calcarenita sometidas a soluciones salinas diluidas (simples o compuestas), se observan bajo el microscopio óptico fracturadas en mayor o menor medida, dependiendo de la naturaleza de la sal ensayada. En la mayoría de los casos estas fisuras no se aprecian *de visu*. En general, los sulfatos (Fig. 11.5A) son los que producen una fracturación más intensa (excepto el K_2SO_4), seguidos del nitrato sódico, especialmente si se encuentra mezclado con otra sal. En las probetas tratadas con soluciones concentradas no suelen apreciarse las microfisuras, excepto en el caso de $NaCl$, $NaCl + KNO_3$ y $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$, aunque *de visu* son muy evidentes las grietas.
- Se advierte que la disolución del cemento, y en algunos casos la de los áridos, se ve favorecida por la acción de las soluciones salinas concentradas (Fig. 11.5B). No obstante también es patente con algunas soluciones diluidas, especialmente en presencia de $NaCl$ o $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$.
- Las soluciones salinas diluidas originan cristalización de sales por toda la lámina delgada pero en escasa proporción (a veces inapreciable), excepto el sulfato de sodio que provoca gran cantidad de sales. El desarrollo de subeflorescencias es inapreciable con otras soluciones sulfatadas compuestas (e.g. yeso más epsomita), así como con soluciones compuestas en las que interviene la halita (e.g. halita con yeso, con epsomita, o con silvita). Únicamente se detectan eflorescencias en superficie con la mezcla diluida de $KCl + KNO_3$. La acción de soluciones concentradas origina la cristalización de sales por toda la lámina, así como en la misma superficie, excepto con $MgCl_2$ y KNO_3 que no desarrollan eflorescencias. Resaltar que el $NaCl$ es especialmente abundante en la superficie, y el yeso y la epsomita como soluciones simples cristalizan sólo en el interior de la calcarenita, pero cuando se mezclan lo hacen también en el exterior (Fig. 11.5C). En la Figura 11.5D se pueden observar cristales de $NaNO_3$ en el seno de la calcarenita, y en la Figura 11.5E en la superficie de la misma, con desarrollo de cristales euhédricos y/o subhédricos.

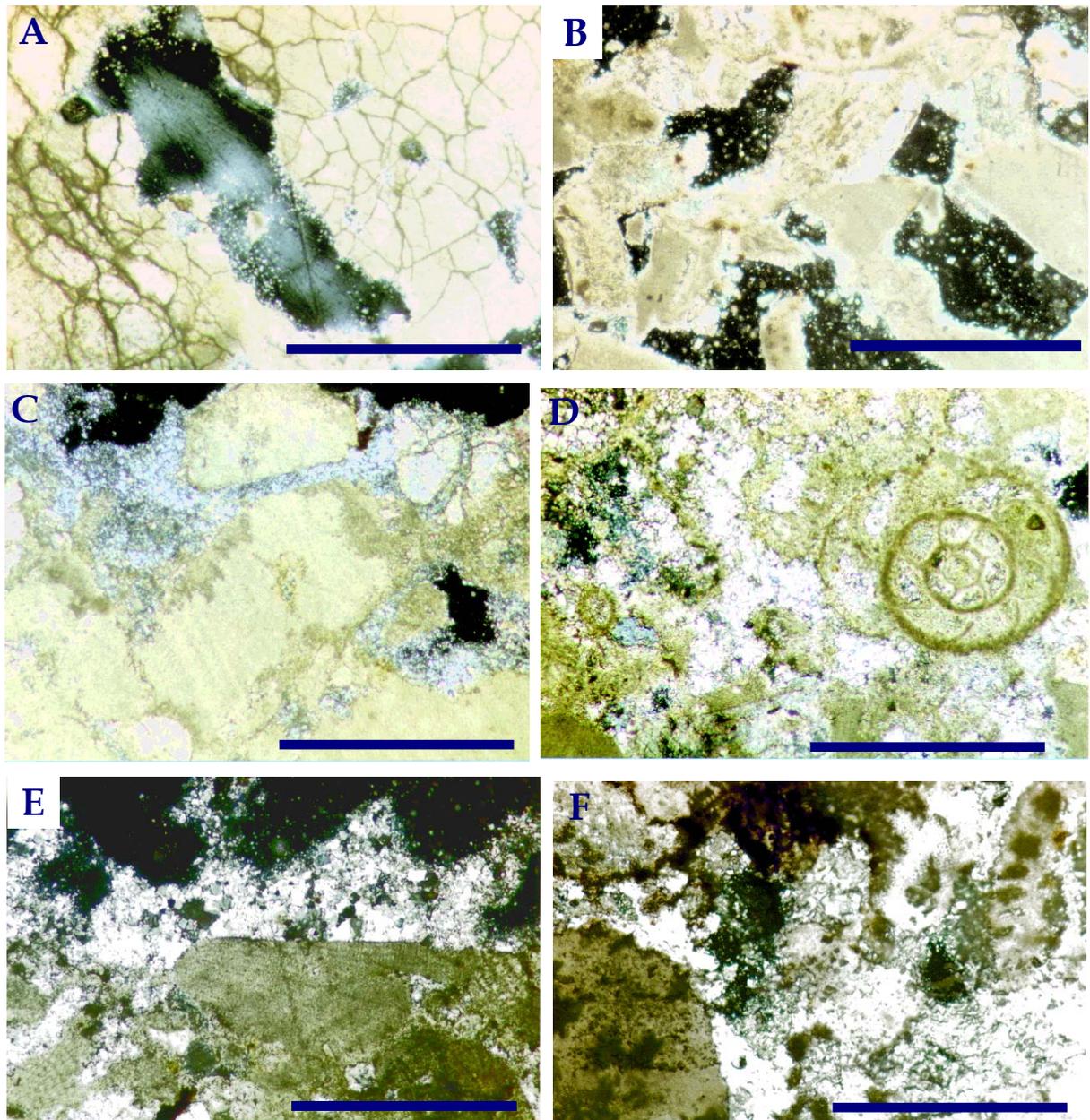


Figura 11.5. Microfotografías realizadas con luz transmitida y polarizadores cruzados. **A)** Intensa fracturación en la probeta ensayada con la solución diluida de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{MgCl}_2$. **B)** Disolución del cemento y áridos favorecido por la acción de una solución concentrada (probeta n° 61 tratada con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$).

C) Cristalización de sales de hexahidrita en la superficie de la probeta n° 12 (ensayada con $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Detalle de la rotura de los áridos. **D)** Cristalización de NaNO_3 en el seno de la calcarenita. Sellado de los poros y reducción de la porosidad (probeta n° 50 tratada con NaNO_3). **E)** Desarrollo de cristales euhédricos y/o subhédricos de NaNO_3 en la superficie de la probeta n° 50. **F)** Masa de cristales anhédricos precipitados en el interior de la calcarenita (probeta n° 6 ensayada con $\text{NaNO}_3 + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). La barra equivale a 0.5 mm.

- Los cristales son subhédricos o anhédricos cuando cristalizan en el interior de la calcarenita, agrupándose a veces en masas amorfas (Fig. 11.5F). Constituyen una excepción los cristales con diferente hábito (cúbico, *wiskers*...) detectados en el seno de la probeta tratada con NaCl + KNO₃. Por su parte, los cristales suelen presentar formas cristalinas bien formadas en el exterior de la roca, reconociéndose hábitos y formas de agregación variadas. Por ejemplo, las soluciones mezcla de NaNO₃ desarrollan cristales subhédricos en superficie; las soluciones compuestas con NaCl originan cubos (a veces perfectos), en presencia de KNO₃ se forman *wiskers*, y con Mg(NO₃)₂ · 6H₂O los cristales se asocian en agregados palmiformes.

Tabla 11.6. Estudio mediante microscopio óptico petrográfico de las sales presentes en las probetas de calcarenita ensayadas con distintas soluciones salinas diluidas. Características texturales de dichas calcarenitas. LD = Lámina delgada.

#	Solución salina	Observaciones (lugar cristalización, fracturas, disoluciones etc.)
9	CaSO ₄ · 2H ₂ O	Escasa cristalización de yeso en interior. Fracturas paralelas a la superficie.
14	CaSO ₄ · 2H ₂ O + MgSO ₄ · 7H ₂ O	No se aprecia cristalización de sales en LD. Fracturas abundantes. Disolución cemento (aumento tamaño de poros).
19	MgSO ₄ · 7H ₂ O	Sales por toda la LD. Numerosas fracturas.
21	MgSO ₄ · 7H ₂ O + MgCl ₂	No se aprecia cristalización de sales. LD muy fracturada. Disolución cemento.
24	MgCl ₂	Sales escasas por toda la LD. En superficie cristales grandes anhédricos.
30	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	Cristalización por toda la LD. Fracturación abundante.
38	NaCl	Cristalización escasa por toda la LD. Fracturación incipiente en la superficie.
51	NaNO ₃	Escasa cristalización por toda la LD. Baja fracturación.
55	KNO ₃	Escasa cristalización por toda la LD. Elevada fracturación.
44	K ₂ SO ₄	No se detecta cristalización. Escasa fracturación.
58	NaNO ₃ + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	Abundante sales por toda la LD. Cristales subhédricos en superficie. Disminución de porosidad.
26	NaNO ₃ + KNO ₃	Escasa cristalización por toda la LD. Fracturación media.
28	K ₂ SO ₄ + KNO ₃	Escasa cristalización por toda la LD. Fracturación baja.
46	NaCl + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	Escasa cristalización por toda la LD. Fracturación baja.
29	KCl + KNO ₃	Sales sólo en superficie. Fracturación media.
47	NaCl + KNO ₃	Cristalización escasa y sólo en interior de LD. Fracturación baja.
45	NaCl + NaNO ₃	Escasa cristalización por toda la LD. Fracturación muy abundante.
43	MgSO ₄ · 7H ₂ O + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	Escasa cristalización por toda la LD. Fracturación muy abundante.
23	NaNO ₃ + KNO ₃	Escasa cristalización por toda la LD. Fracturación media.
56	MgSO ₄ · 7H ₂ O + NaNO ₃	No se aprecia cristalización de sales. Fracturación muy elevada.
54	NaCl + KCl	No se aprecia cristalización de sales. Disolución importante de cemento (aumento tamaño poros).
1	NaNO ₃ + Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Escasas sales por toda la LD. Disolución de cemento.
31	MgSO ₄ · 7H ₂ O + Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Escasa cristalización por toda la LD. Disolución de cemento.
60	MgSO ₄ · 7H ₂ O + NaCl	No se aprecia cristalización de sales. Ausencia de fracturas.
62	CaSO ₄ · 2H ₂ O + NaCl	Ausencia de sales. Elevada disolución de cemento. No fracturas.
64	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	No se aprecia cristalización de sales. Elevada disolución de cemento.
66	KCl	Escasa cristalización en el interior de la LD. Elevada disolución de cemento.

Tabla 11.6 (continuación). Estudio mediante microscopio óptico petrográfico de las sales presentes en las probetas de calcarenita ensayadas con distintas soluciones salinas concentradas. Características texturales de dichas calcarenitas. LD = Lámina delgada.

#	Solución salina	Observaciones (lugar cristalización, fracturas, disoluciones etc.)
12	CaSO ₄ · 2H ₂ O + MgSO ₄ · 7H ₂ O	Sales sólo en los bordes de la LD. Disolución del cemento y áridos.
36	NaCl	Escasas sales en el interior, mayor en la superficie de la LD. Desarrollo aislado de cristales euhédricos (cubos).
5	CaSO ₄ · 2H ₂ O	Escasa cristalización de sales en el interior de la LD. Disolución de cemento.
15	MgSO ₄ · 7H ₂ O	Cristalización de sales en el interior de la LD.
20	MgSO ₄ · 7H ₂ O + MgCl ₂	Cristalización de sales por toda la LD. Disolución de cemento y áridos.
22	MgCl ₂	Ausencia de sales. Aumento de porosidad por disolución de cemento y áridos.
27	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	Escasas sales en los bordes de LD. Disolución incipiente de cemento.
50	NaNO ₃	Abundancia de sales. Cristales grandes en los bordes, y más pequeños y menos numerosos en el interior de la LD.
53	KNO ₃	Ausencia de sales. Similar en apariencia a la calcarenita original.
48	K ₂ SO ₄	Sales principalmente en los bordes de la LD, y de modo excepcional en el interior.
49	NaNO ₃ + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	Escasas sales por toda la LD.
32	K ₂ SO ₄ + KNO ₃	Escasas sales por toda la LD.
37	NaCl + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	Abundantes sales por toda la LD. Cristales con hábito cúbico en bordes de LD. Fisuras en superficie (por presión de cristalización de las sales).
17	KCl + KNO ₃	Sales por toda la LD.
52	NaCl + KCl	Abundantes sales sobre todo en bordes de la LD. Cristales cúbicos.
57	NaCl + KNO ₃	Abundantes sales por toda la LD. En los bordes los cristales generan presión de cristalización formando fisuras paralelas a la superficie. <i>Wiskers</i> en superficie. Cristales con morfología estructural (cubos) en el interior.
18	NaCl + NaNO ₃	Abundantes sales principalmente en la superficie.
25	KNO ₃ + NaNO ₃	Abundantes sales por toda la LD. Sellado de poros.
6	NaNO ₃ + Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Abundantes sales por toda la LD y consiguiente disminución de la porosidad. Morfologías masivas. Avanzada alteración química de los áridos.
35	MgSO ₄ · 7H ₂ O + Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Sales abundantes por toda la LD. Agregados palmiformes de cristales en la superficie. Masa de cristales anhédricos en el interior.
39	MgSO ₄ · 7H ₂ O + NaNO ₃	Sales por toda la LD. Cristales subhédricos en superficie. Disminución de la porosidad por sellado de sales.
59	MgSO ₄ · 7H ₂ O + NaCl	Abundantes sales en superficie que disminuyen hacia el interior de la LD.
42	MgSO ₄ · 7H ₂ O + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	Sales por toda la LD.
61	CaSO ₄ · 2H ₂ O + NaCl	Sales en superficie y escasas en el interior de la LD. Disolución de cemento.
63	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Sales por toda la LD. Disminución de poros por sellado de poros con sales.
65	KCl	Escasas eflorescencias en la superficie.

Microscopía electrónica de barrido

Mediante esta técnica de análisis químico y textural se ha estudiado de forma detallada el hábito, la composición, y las relaciones espaciales de las sales con la calcarenita (Tabla 11.7). Para ello se han utilizado trocitos de roca (fractura viva), dada la imposibilidad de emplear las láminas delgadas elaboradas para la observación con el microscopio óptico por su falta de pulimento final (Cap. 10). Se ha realizado una selección previa mediante lupa binocular de los bloques de calcarenita a analizar, asegurando de este modo la presencia de sales en el sustrato. Finalmente han sido 19 las muestras seleccionadas, obteniéndose datos referentes a eflorescencias únicamente en 14 de ellas. En todos los

casos los bloques corresponden a calcarenitas sometidas a la acción de soluciones salinas concentradas, que son las que originan el desarrollo, en menor o mayor medida, de eflorescencias.

Tabla 11.7. Estudio mediante S.E.M. de la naturaleza, hábito y forma de asociación de las sales cristalizadas en las probetas de calcarenita ensayadas con distintas soluciones salinas concentradas.

#	Solución salina	Características de las sales (naturaleza, hábito, tamaño cristales...)
27	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Posiblemente una sal doble de sulfato y cloruro de sodio y potasio. Cristales muy pequeños ($1 \mu\text{m}$) tapizando la calcarenita.
36	NaCl	NaCl. Cristales en fracturas de la calcarenita, con morfología estructural (cubos) mostrando escalones de crecimiento.
65	KCl	KCl. Cristales grandes ($\pm 150 \mu\text{m}$) con evidencias de disolución y formación de grietas por desecación. En fracturas de la calcarenita.
22	MgCl_2	Sales de cloruro cálcico, cloruro magnésico y cloruro cálcico-magnésico. Cristales pequeños ($1-5 \mu\text{m}$) que tapizan la superficie de la calcarenita.
15	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Sales de sulfato cálcico-magnésico, sulfato magnésico y sulfato cálcico. Cristales = $1-5 \mu\text{m}$ con grietas de desecación. Tapizan superficie de la calcarenita.
12	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Sales de sulfato cálcico-magnésico. Cristales = $1-5 \mu\text{m}$.
42	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	No se detectan sales. Pulverización de la calcarenita.
52	NaCl+KCl	KCl. Cristales de $\pm 100 \mu\text{m}$, hábito cúbico con desarrollo de escalones de crecimiento. Tapizan la superficie de la calcarenita.
35	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Sales de nitrato magnésico y nitrato cálcico-magnésico. Cristales = $1-5 \mu\text{m}$ con grietas de desecación. Tapizan la superficie de la calcarenita. Pulverización de la roca.
20	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{MgCl}_2$	Costra de cloruro cálcico-magnésico. Eflorescencia de cristales no compactos de sulfato magnésico de $\pm 5 \mu\text{m}$.
39	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{NaNO}_3$	Intercrecimiento de cristales de nitrato sódico ($\pm 20 \mu\text{m}$) y sulfato magnésico ($<5 \mu\text{m}$). Los cristales de sulfato tienen grietas de desecación.
25	$\text{KNO}_3 + \text{NaNO}_3$	Intercrecimiento de nitrato sódico, nitrato potásico, y nitrato sódico-potásico formando una costra. Cristales subhédricos de nitrato sódico de mayor tamaño ($50-70 \mu\text{m}$) que los de nitrato potásico ($<50 \mu\text{m}$).
37	NaCl+ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Crecimiento de NaCl con diversos hábitos: cubos con escalones de crecimiento, morfologías aciculares y cristales compactos (costra). <i>Wiskers</i> de sulfato sódico. Evidencia de disolución de la calcarenita.
57	NaCl+ KNO_3	Desarrollo de NaCl formando costra con grietas de desecación, y como cristales subhédricos.
17	KCl+ KNO_3	Sales de KCl, cristales pequeños ($<5 \mu\text{m}$).

Por lo que respecta a las características texturales de la calcarenita, en la mayoría de los casos se detecta disolución del cemento calcítico que origina un aumento de porosidad en la roca. Así mismo, el ataque químico se pone de manifiesto por la disolución de los áridos, que en algunos casos reducen significativamente su dimensión. En cuanto a la naturaleza de las sales cristalizadas, los datos revelan que las soluciones salinas simples de NaCl y KCl dan lugar respectivamente a sales de NaCl y KCl. Sin embargo, con las otras tres soluciones simples ensayadas se forman sales de su misma naturaleza, más otras sales dobles, como consecuencia de su reacción con el CaCO_3 de la calcarenita (e.g. sales dobles de sulfato magnésico-cálcico o sódico-cálcico). De acuerdo con los resultados obtenidos con XRD, mediante SEM se confirma que la mezcla de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ no provoca formación de yeso, inhibiéndose la cristalización de sulfato magnésico cuando en la mezcla existe nitrato magnésico. En cambio, se produce desarrollo de cristales de Na_2SO_4 a partir de una solución compuesta de NaCl + $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

Se han reconocido diversos hábitos en los cristales, que dependen del tipo de sal que cristaliza y de la solución salina a partir de la cual precipitan. La presentación de estas morfologías se realiza atendiendo a las soluciones origen, de modo que:

- La solución salina simple de NaCl origina cristalización de cubos perfectos (morfología estructural) así como cristales subhédricos. Se detectan escalones de crecimiento y formas redondeadas debido a la disolución de la sal. Los cristales suelen tener un tamaño superior a 20 μm . A partir de una solución mezcla, el NaCl cristaliza como una costra que tapiza la superficie de la calcarenita, y como cristales subhédricos también redondeados por los fenómenos de disolución, mostrando a menudo grietas de desecación (Fig. 11.6A). En estos casos no se han detectado cubos perfectos.
- La solución salina simple de KCl desarrolla cristales subhédricos con formas romas (por disolución de la sal), así como escalones de crecimiento. Los cristales son bastante grandes superando las 200 μm . Cuando el KCl cristaliza a partir de una solución mezclada con NaCl se forman cubos grandes (Fig. 11.6B), y si en la solución hay KNO_3 los cristales originados de KCl son anhédricos y de muy pequeño tamaño (unas 5 μm).
- El Na_2SO_4 precipita como cristallitos (1-5 μm) sueltos cuando la solución origen es la mirabilita. En presencia de NaCl cristalizan whiskers de Na_2SO_4 (Fig. 11.6C).
- La solución salina simple de $\text{Mg}(\text{Cl})_2$ origina cristales muy pequeños (<5 μm), sueltos, de la misma naturaleza. A partir de una solución compuesta también se forma un tapiz cristalino (Fig. 11.6D). Se trata de una película de gel cuya formación es frecuente en las sales magnésicas.
- Independientemente de que el sulfato de magnesio cristalice a partir de la correspondiente solución simple o una compuesta, siempre lo hace como cristallitos anhédricos de tamaño inferior a 10 μm (Fig. 11.6E). En presencia de NaNO_3 se produce un intercrecimiento entre ambas sales (Fig. 11.6F). La pulverización de la calcarenita es muy avanzada cuando se somete a solución de epsomita y mirabilita, a pesar de que no se detectan eflorescencias con SEM.
- El $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ inhibe la cristalización de sulfato magnésico, formándose únicamente el nitrato ya sea de Mg y/o Mg y Ca, a veces con espectaculares grietas concéntricas de desecación (Fig. 11.6G).
- Con la solución mezcla $\text{NaNO}_3 + \text{KNO}_3$ precipita una costra o tapiz de NaNO_3 , sólo o intercrecido con KNO_3 , así como cristales subhédricos de mayor tamaño (Fig. 11.6H).

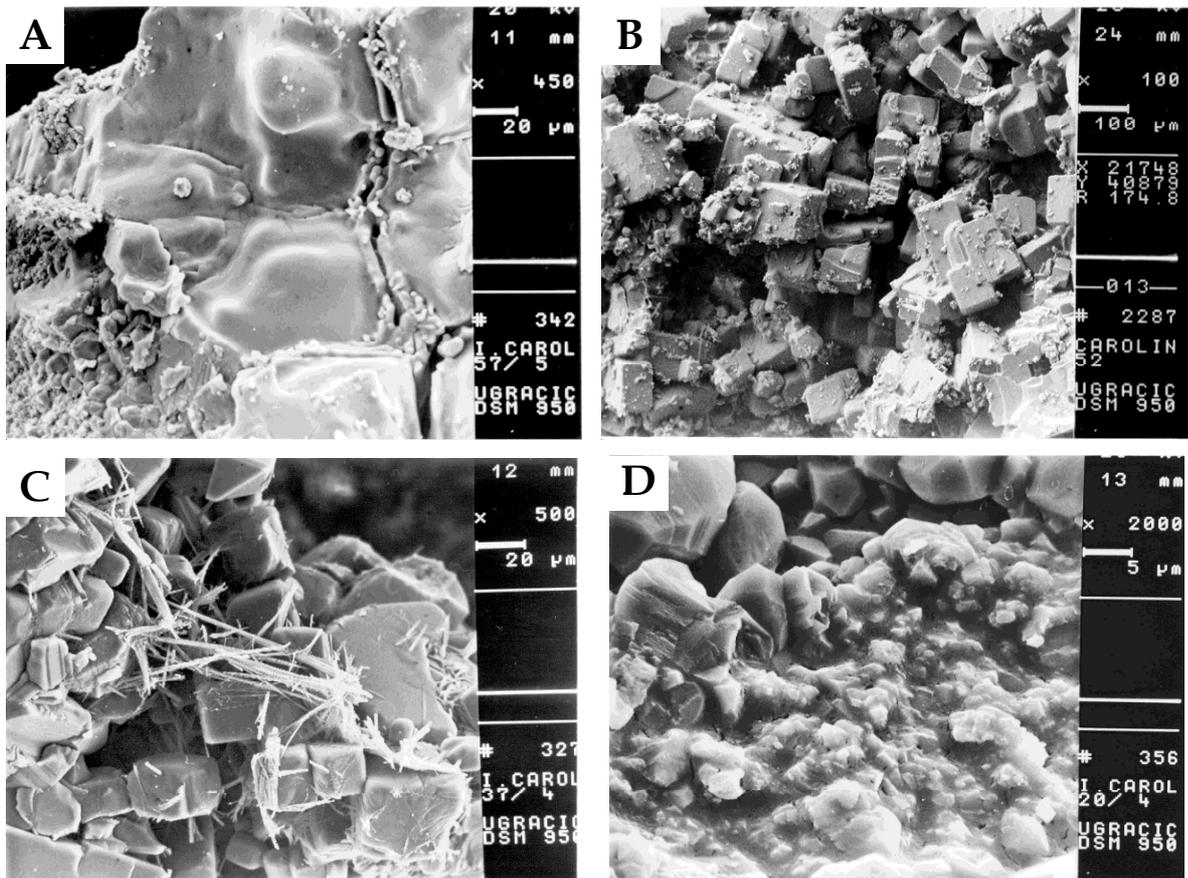


Figura 11.6. Microfotografías realizadas con microscopía electrónica de barrido (SEM). **A)** Precipitación de NaCl en la superficie de la probeta nº 57 (ensayada con solución mezcla NaCl + NaNO₃). La halita cristaliza principalmente como una costra a partir de las soluciones mezcla, no detectándose en estos casos su morfología estructural. Nótese en la fotografía las formas redondeadas de la superficie de la costra consecuencia de fenómenos de disolución. Las fisuras pueden haberse generado por episodios de desecación. Otras morfologías identificadas corresponden a cristales subhédricos de menor tamaño, también redondeados por fenómenos de disolución (esquina inferior izquierda de la fotografía). **B)** Desarrollo de grandes cristales cúbicos (Φ medio 100 μ m) de KCl en la probeta nº 52 ensayada con la solución mezcla NaCl + KCl. En este caso el KCl crece con su morfología estructural, apreciándose en algunos cristales escalones de crecimiento, bordes redondeados y desarrollo de un hueco central, como consecuencia de la oscilación de las condiciones medioambientales externas que controlan el mecanismo de crecimiento. **C)** La solución mezcla NaCl + Na₂SO₄·10H₂O (probeta nº 37) origina la cristalización de escasos cristales de thenardita (Na₂SO₄) con hábito acicular y tamaño muy pequeño (< 20 μ m), que aparecen adosados a la superficie de los granos sueltos de calcita. Obsérvese la elevada disolución del cemento calcítico. **D)** Precipitación de una delgada película de cloruro cálcico-magnésico a partir de la solución mezcla MgSO₄·7H₂O + MgCl₂ (probeta nº 20). El aspecto gelatinoso de la película se debe a la tendencia de las sales de Mg a formar geles.

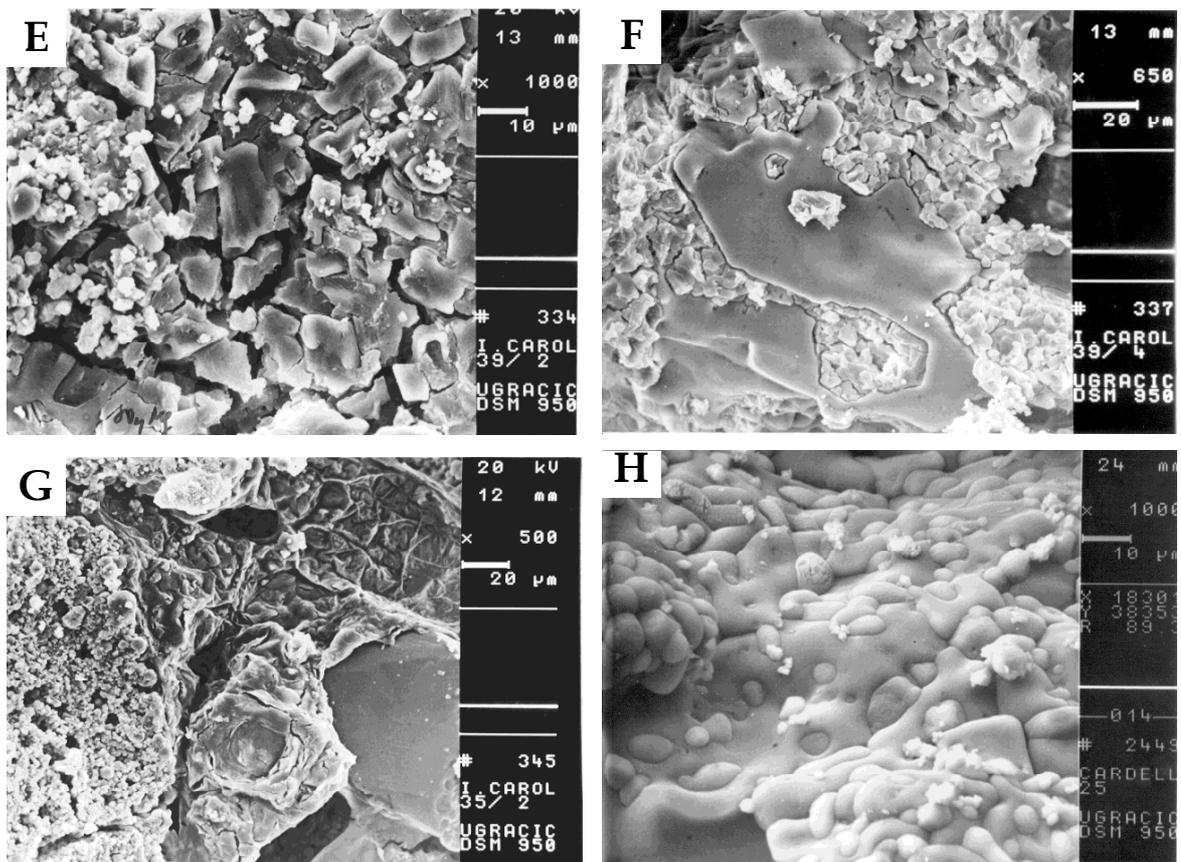


Figura 11.6. (continuación). Microfotografías realizadas con microscopía electrónica de barrido (SEM). **E**) Desarrollo de cristales anhédricos de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ de aproximadamente $5\mu\text{m}$ de tamaño medio en la superficie de la probeta n° 39 (ensayada con $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{NaNO}_3$). Nótese la microfisuración de la calcarenita originada por la presión de cristalización de la sal. **F**) Detalle del intercrecimiento de cristales pequeños de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y grandes cristales NaNO_3 , de tamaño superior a $60\mu\text{m}$ (probeta n° 39). **G**) Sales de nitrato magnésico y nitrato magnésico-cálcico cristalizadas a partir de una solución mezcla de $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. El nitrato magnésico de la solución inhibe la cristalización del sulfato magnésico y reacciona con el Ca de la calcarenita para formar una sal polifásica. Obsérvese en la fotografía la textura particular de la sal consecuencia de que las sales de Mg son propensas a formar geles. La abundantes fisuras que surcan los cristales son consecuencia de procesos de desecación. **H**) Detalle del intercrecimiento de cristales de NaNO_3 y KNO_3 . La costra es de NaNO_3 y las formas redondeadas pequeñas que por ella asoman son de KNO_3 .

11.3.3 Modificación del sistema poroso

El objetivo perseguido con la aplicación de la porosimetría de inyección de Hg es comprobar la variación sufrida por el sistema poroso de las calcarenitas tras haber sido sometidas al ensayo de cristalización de sales. Previamente es imprescindible la caracterización de la distribución del rango de poros en la roca de origen (más que la determinación del valor de la porosidad total), puesto que la existencia de sales en una roca sólo es perjudicial en presencia de una estructura porosa particular (Honeyborne & Harris, 1958; Accardo et al., 1978; Efes, 1979; Esbert et al., 1984; Adinarayana, et al. 1990; Gauri et al., 1990; Rossi-Manaressi et al., 1991). A este respecto merece la pena apuntar la observación realizada por Schaffer (en Punuru et al., 1990): "En una serie de 100 muestras procedentes de cantera, las medidas de porosidad total constituyen una base inútil de clasificación. Son las medidas de microporosidad (calculadas por métodos físicos como por ejemplo succión capilar) las idóneas para establecer las clasificaciones más adecuadas".

Los sustratos porosos más susceptibles de deteriorarse por la acción de la cristalización de sales son precisamente aquellos que poseen un sistema poroso en el que predominan los poros inferiores a 5 μm (según Walker et al. en Esbert et al., 1984) o 1 μm (según Rossi-Manaressi et al., 1991), independientemente de que existan huecos de mayor tamaño. Es justo en estos microporos donde se desarrollan las mayores presiones de cristalización. Cuando el porcentaje de poros más alto se encuentra en el rango de los macroporos, las presiones de cristalización desarrolladas suelen ser bajas, normalmente insuficientes para ocasionar la rotura mecánica de la roca.

En este Trabajo se han analizado mediante porosimetría de mercurio 20 muestras pertenecientes a 16 probetas. En 12 casos los trocitos a analizar se han extraído aproximadamente de la zona intermedia de los bloques. En las 4 probetas restantes se han extraído dos muestras a distinta altura. Las muestras se han nombrado con el número de la probeta seguido de una letra, en los casos en que se efectuó un doble muestreo por bloque de calcarenita. El significado de las letras es: A, zona alta; M, zona media y B, zona baja de la probeta. Los resultados se presentan en la Tabla 11.8 y en la Figura 11.7. Los valores tabulados corresponden a la distribución de % de volumen en rango de poro. Los rangos de poro establecidos han sido 5, comprendidos entre: $>10 \mu\text{m}$, 10 y $1 \mu\text{m}$, 1 y $0.1 \mu\text{m}$, 0.1 y $0.01 \mu\text{m}$ y $< 0.01 \mu\text{m}$. Además se consignan la microporosidad, la macroporosidad y la porosidad total (todas ellas expresadas en %), así como el área superficial específica (m^2/g). En los gráficos se han proyectado los valores del volumen acumulado de mercurio intruido (% volumen acumulado) y los respectivos valores del volumen relativo de mercurio intruido (% volumen absoluto), éstos últimos en forma de histograma.

Se comprueba que no hay una fuerte dispersión de valores de porosidad total entre la calcarenita de cantera ($25 \pm 2.3\%$) y las sometidas a ensayo de cristalización de sales (con diferentes soluciones salinas y concentración), en las que se registra un valor mínimo de 20.5% y un máximo de 28.25%. En todos los casos los valores son indicativos de una roca altamente porosa. No obstante, y considerando el rango de oscilación de porosidad total calculado para la calcarenita de cantera, se considera que las muestras nº 5, nº 9, nº 14, nº 15B, nº 36, nº 37 y nº 59B han experimentado una disminución en el porcentaje de sus huecos (y por lo tanto han sufrido una cementación). Las muestras nº 15A, nº 46 y nº 60 han incrementado su porosidad total. No se ha detectado variación alguna en el resto de las muestras de calcarenita ensayadas. En los casos en los que se han analizado dos muestra por probeta, se comprueba que la porosidad total es similar a la de la calcarenita original en las probetas nº 19 y nº 38. En cambio, aumenta ligeramente en la zona alta de la probeta 15 (muestra 15A), y apenas disminuye en la probeta 59 (muestra 59B).

Tabla 11.8. Distribución porcentual de volumen de rango de poro en probetas de calcarenita sometida a la acción de distintas soluciones salinas. Porosidad total (PT) ; microporosidad (m) ; macroporosidad (M); A.S. = área superficial (m²/g); A = zona alta probeta; B = zona baja probeta.

#	Solución salina	>10	10-1	1-0.1	0.1-0.01	<0.01	PT (%)	m (%)	M (%)	A.S.
5*	CaSO ₄ · 2H ₂ O	31.63	21.68	27.76	16.98	1.94	21.42	12.10	10.61	2.13
9	CaSO ₄ · 2H ₂ O	41.03	16.50	21.07	16.99	4.40	20.50	9.93	11.22	3.42
12*	CaSO ₄ · 2H ₂ O + MgSO ₄ · 7H ₂ O	39.87	25.12	24.35	10.51	0.15	25.52	11.56	15.38	0.97
14	CaSO ₄ · 2H ₂ O + MgSO ₄ · 7H ₂ O	21.44	23.62	34.35	17.72	2.95	20.64	13.46	8.39	2.64
15A*	MgSO ₄ · 7H ₂ O	42.75	22.04	22.96	11.74	0.53	27.44	12.07	16.62	1.32
15B*	MgSO ₄ · 7H ₂ O	34.01	25.92	24.78	13.39	1.90	21.67	10.93	12.07	1.29
19B	MgSO ₄ · 7H ₂ O	34.57	27.22	24.18	13.60	0.42	26.63	12.88	15.47	1.33
19M	MgSO ₄ · 7H ₂ O	25.52	28.59	31.51	14.22	0.16	25.14	13.88	12.75	1.23
27*	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	29.05	27.74	24.71	16.28	2.21	22.79	12.60	12.14	2.41
30	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	35.64	22.82	24.25	15.04	2.24	24.08	12.09	13.31	2.40
36A*	NaCl	37.00	21.50	27.20	14.30	0.00	22.21	11.24	12.48	0.99
37*	NaCl + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	21.18	29.90	27.95	18.27	2.69	20.69	11.64	9.97	2.34
38A	NaCl	40.70	22.08	25.72	11.61	0.23	26.08	12.93	15.47	1.14
38B	NaCl	41.27	21.46	21.55	13.52	2.19	25.34	11.55	15.09	2.53
46	NaCl + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	34.75	27.65	15.12	12.31	0.16	28.25	13.78	16.45	1.27
58	NaNO ₃ + Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	38.16	25.78	25.00	9.53	1.51	26.66	11.80	16.14	1.98
59B*	NaCl + MgSO ₄ · 7H ₂ O	36.33	20.52	28.89	11.68	2.59	22.03	11.15	11.80	1.90
59M*	NaCl + MgSO ₄ · 7H ₂ O	29.70	26.21	30.95	11.72	1.40	23.52	12.29	12.18	1.70
60	NaCl + MgSO ₄ · 7H ₂ O	26.79	29.93	28.63	13.72	0.93	27.60	14.14	14.73	1.76
62	CaSO ₄ · 2H ₂ O + NaCl	38.86	23.49	24.36	12.14	1.14	27.28	12.78	16.19	1.69

Nota: * = soluciones salinas concentradas.

La macroporosidad oscila entre un valor mínimo de 8.39% (probeta n° 14) y un máximo de 16.62% (probeta n° 15A), variando la microporosidad entre un valor máximo de 14.14% (probeta n° 60) y un mínimo de 9.93%. Respecto a la distribución porcentual de los radios de poro, se observa claramente que es el parámetro que ha sufrido variación en el sistema poroso de las calcarenitas. El mayor volumen de poros se concentra en el rango de radio de poro superior a 10 µm, a pesar de lo cual ha experimentado un descenso en las probetas ensayadas con sales respecto al volumen que posee la calcarenita no alterada. En las muestras pertenecientes a las probetas n° 14 y n° 37 el volumen más alto de poros se concentra en el rango de 0.1-1 µm, y en la muestra n° 60 en el rango de 1-10 µm. En todos los casos ha aumentado el porcentaje de poros de tamaño inferior a 10 µm, siendo de destacar el volumen de huecos menor de 0.01 µm, que en algunos casos es de un 4.4% (muestra n° 9) respecto al 0.5 % de la calcarenita de origen.

En las gráficas de la Figura 11.7 se presenta la variación del volumen de poros respecto al radio de acceso de poros. Las curvas corresponden al % de Hg acumulado, cuyas pendientes dan idea de la mayor concentración de volumen de huecos en un rango de poro determinado. El % de volumen absoluto de Hg intruido se presenta en forma de histograma. Para su acertada interpretación es necesario realizar una correcta lectura de la escala logarítmica de abscisas, y comparar los resultados con los valores de porosidad registrados en la Tabla 11.8. La distribución unimodal del rango de radio de poro de la calcarenita no alterada se mantiene en la mayoría de las calcarenitas ensayadas con soluciones salinas, excepto en las muestras n° 5, n° 9, n° 36, n° 38, n° 59A y n° 59M, en que es clara la distribución bimodal del tamaño de los poros, detectándose un máximo en el rango de 0.1-1 µm y otro en el rango >10 µm.

Como se observa en la Tabla 11.8, las muestras elegidas pertenecen a probetas tratadas con distintas soluciones salinas y diferente grado de concentración, con objeto de poder establecer alguna diferencia en relación a este grado de concentración. Se observa que cada solución tiene un efecto (cementante o disruptivo) distinto sobre la calcarenita. Así, la acción de la solución de CaSO₄ · 2H₂O es cementante

independientemente de su concentración; la solución de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ diluida es cementante y la concentrada no origina variación en la porosidad total; El comportamiento de las soluciones de NaCl , $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ y $\text{NaCl} + \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ es justo opuesto al caso anterior. En líneas generales se puede decir que las soluciones concentradas reducen la porosidad total de la roca en comparación a las respectivas soluciones diluidas.

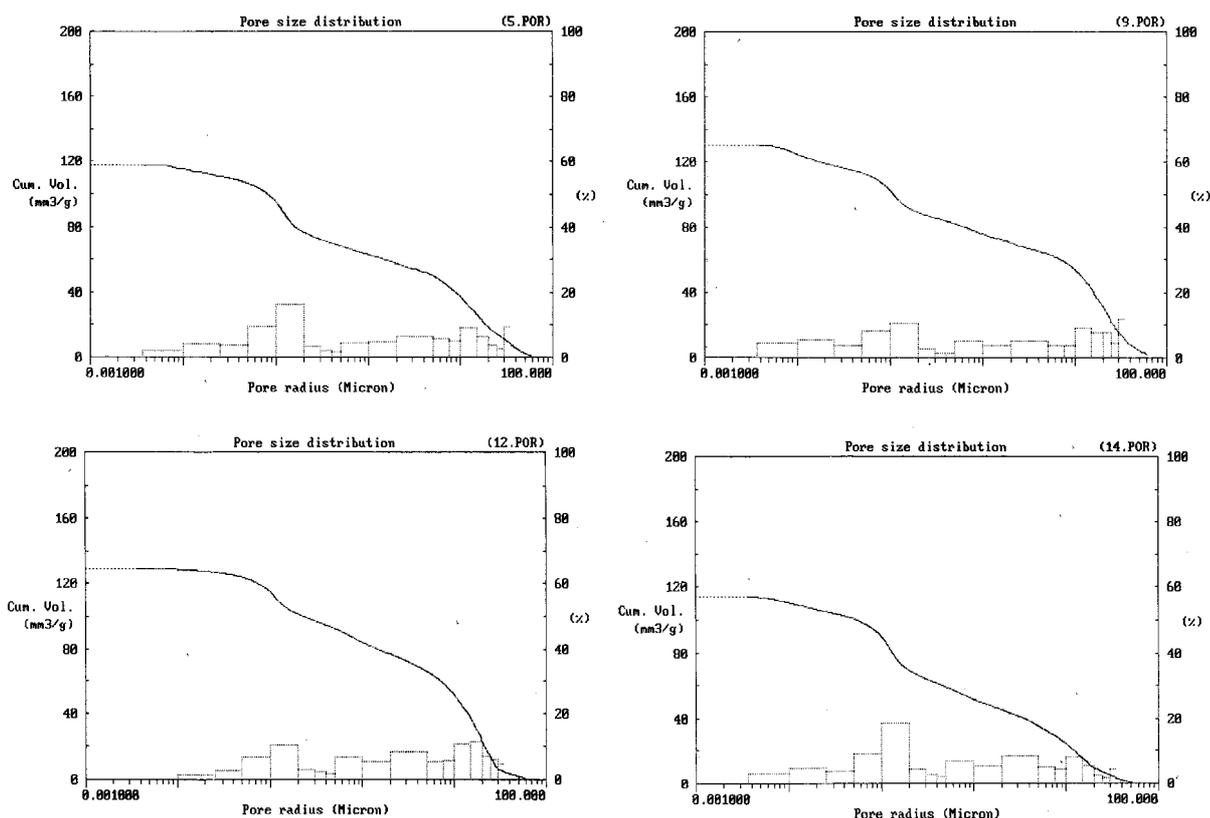
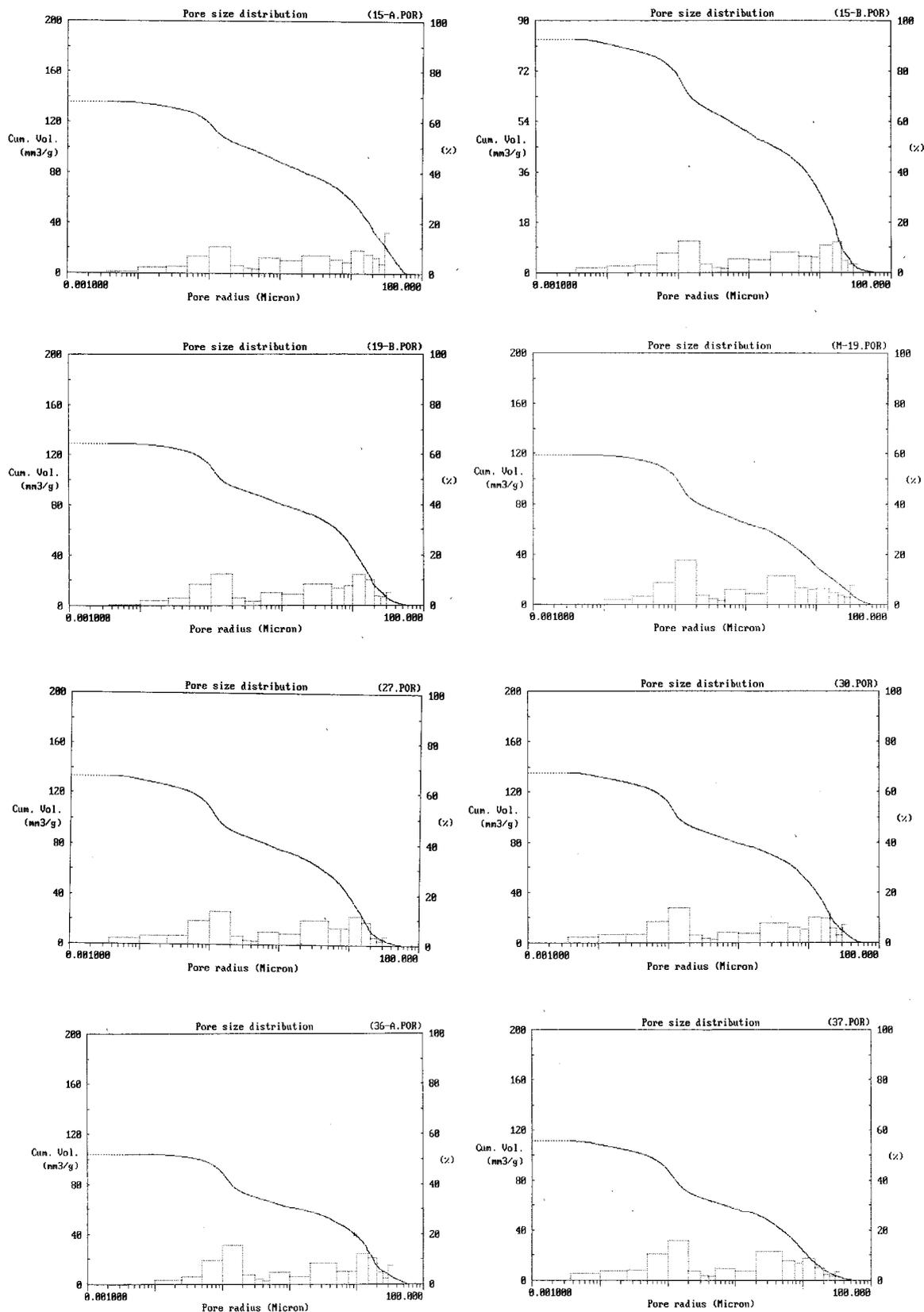
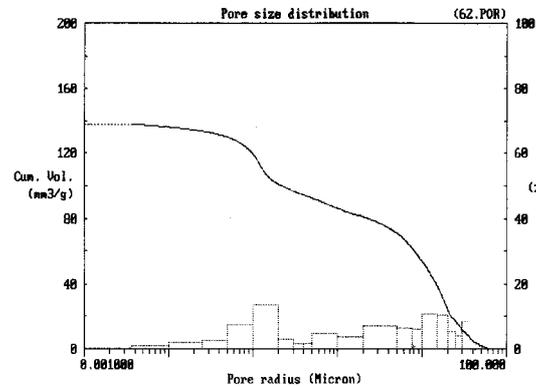
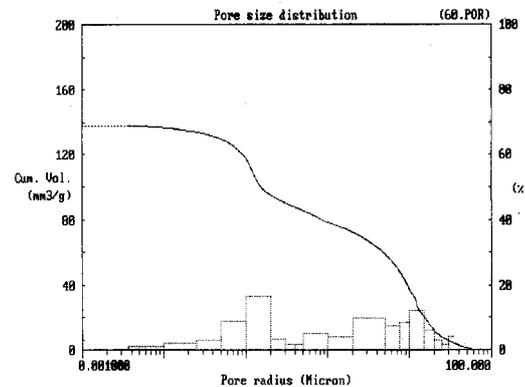
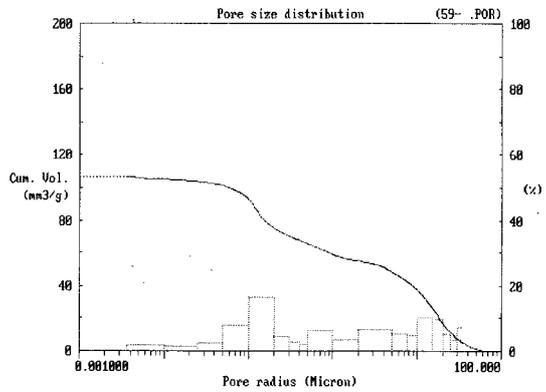
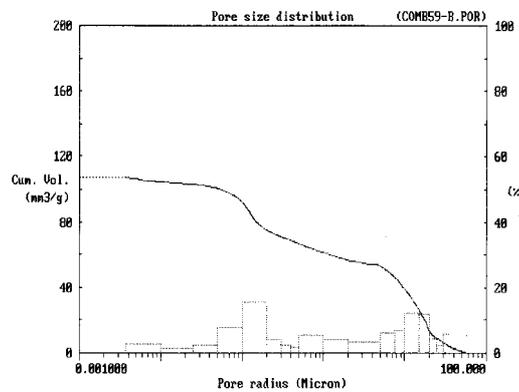
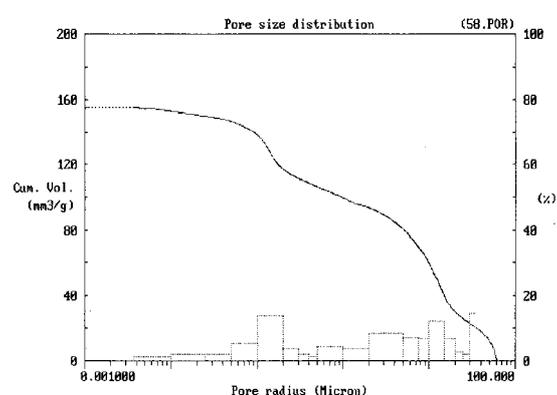
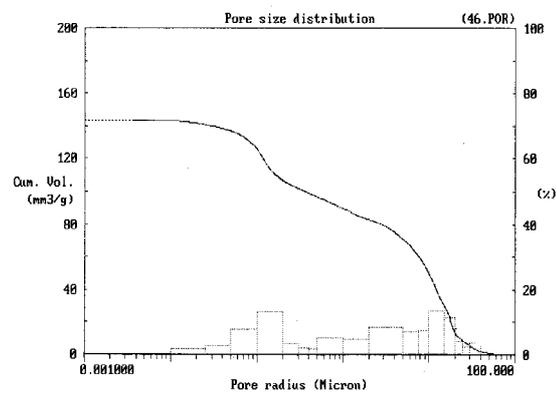
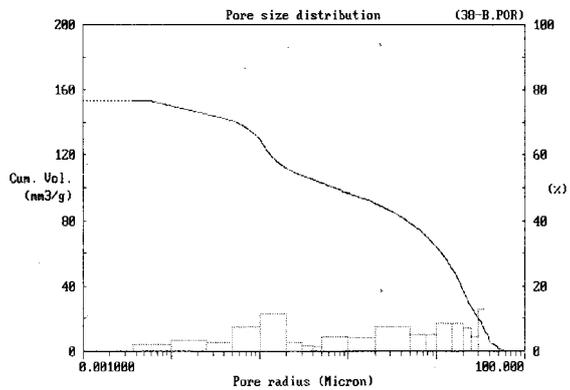
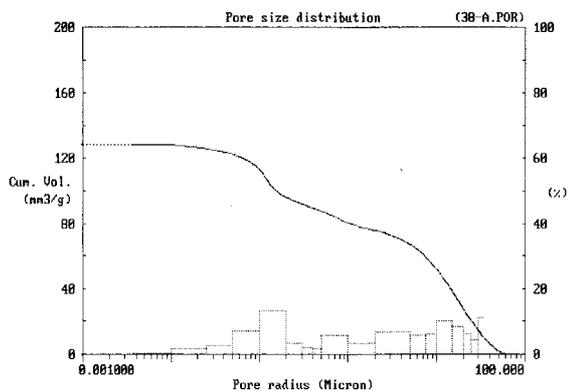


Figura 11.7. Distribución del sistema poroso en muestras pertenecientes a probetas sometidas a la acción de distintas soluciones salinas. Curvas porosimétricas: volumen acumulado de Hg intruido. Histogramas: volumen relativo de Hg intruido. Continuación en las páginas siguientes.





12 DISCUSION Y CONCLUSIONES

Se recogen en este capítulo las conclusiones aportadas por cada una de las técnicas de estudio empleadas en el experimento de cristalización de sales. De la consideración global o integradora de estas conclusiones parciales se han obtenido unas conclusiones principales sobre el comportamiento y acción de las diversas soluciones salinas ensayadas en probetas de calcarenita. No obstante la exposición de conclusiones que se hace, no puede tener vocación de cerrada o definitiva. En efecto, el volumen de datos presentado y las posibilidades de correlación entre los mismos es tal, que el lector de este Trabajo podrá comprobar que pueden ser mayores las consideraciones y conclusiones que de este estudio pudieran obtenerse.

Se presentan en primer lugar las conclusiones del estudio de *visu* del grado de alteración que ejercen las soluciones salinas en las calcarenitas. A continuación se discuten las conclusiones sobre los tipos de flujos que actúan en los distintos casos detectados de cristalización de sales, y las conclusiones obtenidas de las diferentes técnicas de análisis aplicadas sobre las probetas de calcarenita. Los resultados obtenidos en los ensayos realizados en este Trabajo se comparan con otros modelos y experimentos de cristalización de sales propuestos por diversos autores. Ello es así porque tras consultar la bibliografía, se pone de manifiesto que la reproducibilidad de estos ensayos es limitada. Es decir, al existir una elevada dependencia entre los datos obtenidos en las experiencias y determinadas variables, como son la naturaleza y características texturales del soporte pétreo ensayado, las condiciones medioambientales del experimento, la concentración de las soluciones salinas utilizadas, etc., lo interesante y necesario es la aportación de nuevos y más variados datos obtenidos con diferentes experiencias. Estos ensayos permiten la comprobación empírica de las teorías

e hipótesis, así como la evaluación y seguimiento de los procesos y efectos de alteración en el material pétreo con una precisión que normalmente es imposible conseguir en la realidad del monumento. Por tanto, del estudio comparativo de diversos experimentos se obtendrán las explicaciones y conclusiones más aproximadas que justifiquen los casos específicos que se presentan en esta realidad. Los experimentos de laboratorio complementan los trabajos realizados en el campo, pero no los reemplazan (Goudie and Cooke, 1983).

12.1 OBSERVACIONES DE VISU DE LAS PROBETAS DE CALCARENITA

- El comportamiento de las soluciones salinas sobre las calcarenitas es distinto dependiendo de su grado de concentración. Las soluciones simples no originan eflorescencias (excepto el $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) y su pauta de actuación en la calcarenita es relativamente similar en todas ellas, en cuanto a velocidad de ascenso capilar y tiempo de secado. En las soluciones concentradas se detectan grandes diferencias de comportamiento según su naturaleza.
- Se comprueba que el lugar de aparición de las eflorescencias en las probetas no es acorde con el patrón de Arnold (1982) de evolución de un sistema salino en una pared por ascenso capilar. Según este modelo los sulfatos (menos móviles) deben cristalizar en las zonas más bajas, y los nitratos y cloruros (más higroscópicos) deben precipitar a mayores alturas. Las limitadas dimensiones de la probeta deben haber influido en ello, dimensiones que no son las usuales en los monumentos, y que por tanto introducen una objeción adicional en la correcta interpretación de correspondencia con los hechos que se producen en la naturaleza.
- Tampoco se cumple el esquema de crecimiento cristalino sobre sustrato poroso rígido propuesto por García-Ruiz et al. (1981). Ello es lógico ya que la distribución de los hábitos depende sobremanera de las características texturales del material soporte, de las condiciones ambientales reinantes y de la cantidad y modo de suministro de la solución salina, siendo estos parámetros en el modelo mencionado distintos a los del experimento realizado en este Trabajo.
- Se detecta formación de fracturas en las calcarenitas y su consiguiente desprendimiento con las siguientes soluciones salinas concentradas: NaCl , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{NaNO}_3$, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$, $\text{NaNO}_3 + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{NaNO}_3$. Desde este punto de vista, las soluciones mencionadas son las que ejercen un efecto destructivo más intenso en las calcarenitas.
- De la acción de las soluciones salinas simples sobre las probetas de calcarenita debe resaltarse:
 - únicamente se aprecia evolución temporal y espacial en el hábito de los cristales de nitrato sódico, nitrato magnésico, sulfato sódico y cloruro potásico;
 - las soluciones salinas concentradas de naturaleza sulfatada desarrollan escasas eflorescencias (excepto la de sulfato de sodio), pero originan fracturación en la calcarenita que suele derivar en pulverización;
 - las soluciones sódicas concentradas desarrollan las eflorescencias más espectaculares, y;
 - las soluciones salinas de magnesio son las más higroscópicas (e.g. MgCl_2 y $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).
- De la acción sobre las probetas de las soluciones salinas mezcla de otras dos soluciones se concluye que dichas soluciones compuestas tienen un comportamiento sobre la calcarenita distinto al de las correspondientes soluciones simples, especialmente evidente en las soluciones concentradas. No obstante, se constata que en determinados casos es dominante la acción de una de las soluciones mezcla, sirva como ejemplo la solución de $\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ donde es patente la mayor

influencia del NaCl. En general, la presencia de NaCl inhibe la acción cristalizadora de otras soluciones salinas presentes en la mezcla ensayada sobre la calcarenita. El diferente comportamiento de las soluciones salinas (simples y mezclas) sobre la calcarenita es lógico, ya que los parámetros físicos de las soluciones varían, parámetros que son precisamente los que controlan la dinámica de migración de la solución salina en el seno de la calcarenita, y por tanto, en el modelo de cristalización de sales por evaporación.

12.2 EVOLUCIÓN DE LAS SOLUCIONES SALINAS

Uno de los objetivos de este experimento de cristalización de sales es la determinación del tipo de flujo/s que actúa/n en las probetas de calcarenita, a través del análisis de la variación de la concentración de los iones presentes en las soluciones salinas remanentes en los cristalizadores. La correcta interpretación de estos valores supone el conocimiento de la mecánica de fluidos. Esta se ocupa del movimiento de los mismos y de los factores que lo afectan, de tal modo que la cinemática considera la geometría del movimiento (velocidad, aceleración, deformación, vorticidad, etc.), y la dinámica se ocupa de las fuerzas que actúan sobre los fluidos, como son las de rozamiento o viscosidad, las de presión, y las debidas a campos externos como el gravitatorio. En este Trabajo sólo se aborda el estudio dinámico de los fluidos.

Dependiendo del tipo de flujo (térmico, eléctrico, de fluido, y de partículas) y de las fuerzas desencadenantes (gradiente de temperatura, de potencial, de presión y de concentración) se originan diversos procesos de flujo. En el experimento llevado a cabo únicamente se considera que intervienen el flujo de fluido y el flujo de iones provocados por un gradiente de presión, de concentración y/o de temperatura, de modo que los procesos de flujo que pueden estar actuando en el seno de la calcarenita son: flujo capilar, filtración, ósmosis, difusión, termoósmosis y termodifusión. Estos procesos de flujo pueden actuar simultáneamente y en sentido opuesto. Como ejemplos se pueden mencionar que en presencia de un gradiente térmico los iones de una sal migrarán hacia las zonas más calientes mientras que el agua se moverá hacia las partes más frías o, que en sentido contrario a la difusión iónica actúa la ósmosis provocada por la presión osmótica.

Debido a la complejidad que para la correcta interpretación del proceso de cristalización de sales supone considerar todos los fenómenos, procesos de flujo y parámetros físicos que en él intervienen, se suelen elaborar modelos simplificados que explican el proceso de cristalización por fases, y considerando sólo determinadas variables (e.g. modelo de Lewin, 1981). No obstante, las simplificaciones asumidas hacen incurrir necesariamente en errores que impiden explicar de un modo satisfactorio las distintas experiencias desarrolladas en el laboratorio, además de que los resultados experimentales difícilmente se corresponden con los datos de la realidad del monumento (Dohene, 1996).

En este Trabajo debe realizarse una aclaración previamente a la exposición del proceso de cristalización propuesto: de la consideración de los datos analíticos correspondientes a la evolución de las concentraciones de cationes y aniones en las soluciones remanentes (apartado 11.2), se ha optado por considerar como modelo más adecuado el que dichas concentraciones permanecen constantes. Las escasas diferencias absolutas en los valores correspondientes a una misma solución (ya sea para los aniones, o para los cationes) induce a ello. Por otra parte, las propias circunstancias del análisis impiden dar significado a estas diferencias. En efecto, las concentraciones de las soluciones que actuaron sobre las probetas debían permitir observar el posible deterioro de la probeta y la aparición de eflorescencias y/o subeflorescencias. En cualquier caso (incluso en el de las soluciones diluidas) las concentraciones a las que hubo que recurrir han sido demasiado elevadas desde un punto de vista analítico. Como se ha comentado, fue necesario realizar diluciones de 1/5000 para poder adaptarse al rango de detección de las técnicas analíticas seguidas. Por tanto se comprenderá que mínimos errores de manipulación (pipeteo, enrase, etc.) enjugaran sobradamente las oscilaciones de valores que aparecen. No obstante, la posibilidad de que

algunos iones presenten peculiaridades en su difusión por la probeta, habría que comprobarla a partir de soluciones diseñadas al efecto. Es decir, ensayar con soluciones mucho más diluidas, puesto que en este caso ya no se requerirían para la observación de los otros fenómenos citados (deterioro del material poroso, cristalización de sales...).

Las condiciones que gobiernan la cristalización de sales (y su localización en el sustrato) dependen fundamentalmente de : i) la naturaleza de la sal, ii) la textura del material poroso (distribución del sistema poroso), y iii) las condiciones de evaporación. Teniendo en cuenta estos condicionantes y tomando como referencia el modelo citado de Lewin (1981), en este Trabajo se presenta un mecanismo de cristalización de sales que justifica los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados. El modelo propuesto supone alcanzar un estado tal que, el suministro de solución salina del cristizador se ve contrarrestado por la difusión de vapor de agua a través de la probeta, es decir por la evaporación, momento en el que se produce la cristalización de la sal. En el mecanismo de cristalización concursan las fuerzas de ascenso capilar y difusión molecular, el movimiento difusivo del solvente (ósmosis) y la evaporación, así como diversos parámetros físicos de las soluciones salinas. Han sido tres las fases diferenciadas en el proceso de cristalización que afecta a las probetas.

1) En los primeros minutos del experimento, y de acuerdo con Mamillan (1966), la penetración de la solución a través de la calcarenita está gobernada principalmente por la permeabilidad de ésta. La solución salina asciende por los capilares de la roca debido a la tensión superficial (gradiente de presión), de modo que por flujo capilar y filtración la solución (soluteo y solvente) migra por el seno de la calcarenita hacia las zonas altas. Para ello, la fuerza capilar debe contrarrestar a la fuerza de la gravedad (presión hidrostática) haciendo que el fluido ascienda por los poros. En los diversos ensayos se ha comprobado que el ascenso de la solución salina por capilaridad es de tal magnitud que debe enmascarar la posible difusión de materia (iones). A este respecto hay que recordar que la velocidad a la que se produce un flujo advectivo (e. g. flujo capilar o filtración) es muy superior a la velocidad de los procesos de difusión de la materia sólida, de tal modo que se considera despreciable, en este modelo de cristalización, la difusión de iones de la solución salina hacia la probeta.

2) En una segunda fase se produce la precipitación de la sal al alcanzarse un estado en que la evaporación del material pétreo prevalece sobre el suministro de solución salina al mismo. Es condición indispensable para que se produzca la cristalización de la sal que se alcance su límite de solubilidad. En este estado se produce un equilibrio encadenado entre la fase precipitada y la solución disociada (la solución sin disociar es muy pequeña y se considera constante), siendo, por tanto, muy elevado el grado de saturación de la solución que impregna la roca.

3) Alcanzado este estado de continua sobresaturación de la solución que empapa la roca debe producirse difusión iónica de la solución de la probeta hacia la solución del cristizador. Simultáneamente y en oposición a este proceso debe existir un movimiento u ósmosis del disolvente del cristizador hacia la calcarenita. Si se considera el alto grado de saturación de la solución que moja la roca, el gradiente de difusión hacia la solución del cristizador debe ser elevado, apreciándose en tal caso un aumento de la concentración iónica en la solución remanente. No obstante, debe tenerse en cuenta (como ya se ha comentado) que el movimiento de los iones (materia sólida) se considera despreciable respecto al movimiento del solvente (líquido), de modo que al ser superior este último los procesos se compensarían. El resultado es que la concentración de la solución salina del cristizador permanece constante. La cristalización de sales se producirá en el seno de la calcarenita (subeflorescencias) o en su superficie (eflorescencias) dependiendo de las condiciones termohigrométricas ambientales y de las propiedades físicas de las soluciones. Durante el proceso de secado (evaporación) intervienen dos gradientes de concentración opuestos de vapor de agua y de aire seco (difusioferesis y termoforesis), gobernados por la primera ley de la difusión de Fick (Camufo, 1993).

De lo expuesto se concluye que la cristalización de sales por evaporación de una solución salina a través de un material poroso está gobernada principalmente por la transferencia de materia en un medio fluido, detectándose dos tipos de flujo de materia que dependen de la ausencia o presencia de un gradiente de concentración.

- En ausencia de un gradiente de concentración, se produce un flujo advectivo por diversas causas (diferencia de presión, densidad, altura, etc.). En este caso la migración del fluido se aborda desde el punto de vista mecánico (transporte por cantidad de movimiento), no de transferencia de materia. Este tipo de flujo es el dominante en todo momento durante el contacto de la probeta con la solución salina, y muy especialmente en la primera fase. La magnitud del ascenso capilar de la solución salina es tal que enmascara el posible proceso difusivo de iones que se da en un primer momento.
- En presencia de un gradiente de concentración la transferencia de materia se debe únicamente a la difusión molecular (el flujo de materia resultante se denomina de forma genérica *flujo o transporte molecular*). En la tercera fase del modelo propuesto debe producirse difusión molecular hacia la solución del cristizador habida cuenta de la sobresaturación alcanzada en la probeta, oponiéndose fuertemente a este movimiento la ósmosis del disolvente. Los procesos de difusión originados a lo largo de la probeta están regidos por la primera ley de Fick de la difusión, que se verifica en sistemas en los que el recorrido libre medio de las moléculas sea notablemente inferior al diámetro del sistema (en este caso la dimensión de los poros o capilares).

Justificar mediante modelos termodinámicos y cinéticos los mecanismos involucrados en la cristalización de sales es una labor muy difícil (¡casi imposible!) según han puesto de manifiesto numerosos autores (Pühringer, 1985 ; Dohene, 1994), siendo empíricas la mayoría de las explicaciones al respecto. Aún así, se han planteado fórmulas matemáticas para calcular el balance de contenido de humedad y su movimiento en un sustrato poroso, las cuales consideran la difusión de humedad debido a diferentes gradientes tales como los debidos a la presión de vapor de agua, a la presión hidráulica, a la temperatura, al ascenso capilar, etc., además de consignar parámetros como el tiempo, la altura del frente de agua o el contenido en humedad (Garrecht et al., 1991). Sin embargo, no contemplan la presencia de sales solubles, y por tanto no consideran la influencia de la difusión de las sales disueltas en el agua. Dicha influencia de las sales en los fenómenos de transporte de humedad en materiales porosos fue planteada por Gummerson y colaboradores (1980), quienes definieron una difusividad intrínseca de la solución que tenía en cuenta la influencia de los cambios de densidad y ángulo de contacto, la viscosidad y la tensión superficial de la solución.

No obstante lo expuesto, hasta ahora la resolución numérica del comportamiento hídrico real de los elementos constructivos, sólo es posible bajo el supuesto de la ausencia de sales. Es por ello que el avance en el conocimiento de los factores involucrados en el mecanismo de cristalización de sales se produce introduciendo más variables en los experimentos de laboratorio. En los experimentos realizados en este Trabajo se han identificado muy diversas pautas de actuación de las soluciones salinas, confirmándose que el comportamiento de cada solución sobre el soporte de calcarenita depende sobremanera de las particulares características físico-químicas de las soluciones. En consecuencia, es diferente la velocidad de migración de las soluciones salinas a través de las probetas así como la altura que alcanzan, la velocidad de su evaporación (en similares condiciones medioambientales de T y HR), y su efecto alterológico sobre la calcarenita.

En los diferentes ensayos aquí realizados se ha comprobado cualitativamente que la variación de los parámetros físicos mencionados (tensión superficial, viscosidad, ángulo de contacto y la densidad de la solución) son responsables directos de las diferentes conductas de actuación de las soluciones en las probetas. El aumento de la concentración de las soluciones supone un incremento de estos parámetros (según la ecuación de Washburg), de modo que la velocidad de ascenso capilar de la solución salina es más lenta en la calcarenita y menor la altura del frente respecto a las velocidades y alturas alcanzadas por

las correspondientes soluciones diluidas. Por lo que respecta al diferente comportamiento de secado de las probetas según la concentración de la solución salina, éste debe relacionarse con el coeficiente de conductividad de vapor (δ) y con el contenido crítico de agua (Ψ)¹ (Vos, 1976, 1978 ; Lewin, 1989). Así, al tener las probetas impregnadas con soluciones diluidas un coeficiente δ más alto, la movilidad del vapor de agua en el seno de la calcarenita es más rápida, y por consiguiente su evaporación. El proceso de secado se favorece porque las fuerzas cohesivas de las soluciones diluidas son menores que las correspondientes fuerzas de las concentradas, al ser las primeras menos densas y tener una viscosidad más baja. Se ha comprobado en los ensayos que el secado es constante durante los primeros momentos del proceso, pues existe un aporte suficiente de solución desde el cristizador hacia la superficie de la calcarenita, tal que la presión de vapor en la superficie se mantiene en su máximo valor. Gradualmente, el aporte de solución hacia la probeta disminuye hasta alcanzarse el contenido crítico de humedad, momento en el que no se produce más transferencia de agua (en estado líquido) hacia la zona superior de la calcarenita. En consecuencia, la presión de vapor en la superficie desciende rápidamente disminuyendo también la evaporación, produciéndose sólo en el interior de la calcarenita.

Según las evidencias alterológicas *de visu* observadas en las probetas de calcarenita, así como el volumen remanente en los cristizadores de las soluciones ensayadas, se han diferenciado *grosso modo* 5 casos en los que la pauta de actuación de las soluciones salinas sobre la calcarenita es similar. Las semejanzas se han establecido entre probetas ensayadas con soluciones de igual grado de concentración, de modo que se han diferenciado dos grupos de probetas tratadas con soluciones diluidas, y tres grupos ensayadas con soluciones concentradas.

Probetas ensayadas con soluciones salinas diluidas

Caso A

- Sólo hay desarrollo de subeflorescencias.
- Casi no queda solución salina en el cristizador o se ha evaporado del todo, por lo que ha sido elevada la migración de la solución a través de la roca. Debido a la baja viscosidad de las soluciones (diluidas), el solvente se evapora con rapidez, de tal modo que no le da lugar a alcanzar la superficie de la roca y originar eflorescencias. El ascenso capilar de solución hacia la probeta es constante hasta consumirse del cristizador.
- Se han constatado estos hechos en las probetas ensayadas con las soluciones de NaNO_3 , $\text{NaNO}_3+\text{KNO}_3$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{SO}_4+\text{KNO}_3$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{KCl}+\text{KNO}_3$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}+\text{NaNO}_3$, $\text{NaCl}+\text{KCl}$, KCl , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}+\text{NaNO}_3$, $\text{NaCl}+\text{KNO}_3$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}+\text{MgCl}_2$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}+\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaCl}+\text{NaNO}_3$ y $\text{NaNO}_3+\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Caso B

- Solo hay desarrollo de subeflorescencias.
- Queda 1/3 parte del volumen inicial de la solución salina en el cristizador, por lo que la migración de la solución a través de la roca ha sido alta. Cabe una explicación semejante al caso anterior, pero la presencia de mayor volumen de solución en el cristizador es indicativo de una mayor viscosidad de la solución que evita una rápida evaporación de la misma, y la imposibilidad de acceder a la superficie de la calcarenita para cristalizar como eflorescencia.

¹ En un material la transferencia de agua por su sistema poros únicamente puede ocurrir si su contenido en agua es superior a cierto valor, valor que se denomina *contenido crítico de agua*. Esta transferencia de agua se produce por las fuerzas de ascenso capilar.

- Se han constatado estos hechos en las probetas ensayadas con soluciones de NaCl, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaNO}_3 + \text{KNO}_3$, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$, MgCl_2 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, K_2SO_4 y KNO_3 .

Probetas ensayadas con soluciones salinas concentradas

Caso C

- Sólo hay desarrollo de subeflorescencias.
- Casi todo el volumen de solución salina permanece en el cristalizador, por lo que la migración de la solución a través de la roca es mínima. En este caso el volumen de solución en el cristalizador permanece constante desde las primeras horas del experimento y además es abundante, es decir, la calcarenita casi no ha absorbido solución. La elevada viscosidad de la solución (concentración) dificulta la migración hacia zonas elevadas de la probeta, lo que unido a la alta velocidad de la evaporación favorece la cristalización de la sal en el interior de la calcarenita. Los poros de la zona inferior de la probeta se taponan e impiden la evaporación adicional de la solución remanente en el vaso de precipitado.
- Estos hechos se han detectado en las probetas de calcarenita ensayadas con soluciones de KNO_3 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, MgCl_2 y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{MgCl}_2$. Las probetas ensayadas con estas dos últimas soluciones permanecen mojadas pasada 1 semana, debido a la elevada higroscopicidad del MgCl_2 .

Caso D

- Hay desarrollo de eflorescencias, lo que no excluye la existencia de subeflorescencias.
- Casi todo el volumen de solución salina permanece en el cristalizador, indicativo de que la migración de la solución a través de la roca ha sido mínima. Los procesos sucedidos en el seno de la calcarenita se pueden explicar de forma similar al caso anterior, con la diferencia de que la velocidad de migración de la solución salina por la roca ha sido mayor tal que ha alcanzado su superficie cristalizando como eflorescencias. La mayor velocidad de migración de las soluciones salinas debe relacionarse con su menor viscosidad, pues la variación de las condiciones ambientales se despreciable, y por tanto la diferencia de velocidad de evaporación de un experimento a otro no es tan relevante.
- Estos hechos se han detectado en las probetas de calcarenita ensayadas con soluciones de K_2SO_4 , NaNO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaCl} + \text{NaNO}_3$, $\text{NaCl} + \text{KNO}_3$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaNO}_3 + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{NaNO}_3$, $\text{NaCl} + \text{KCl}$, y $\text{KCl} + \text{KNO}_3$.

Caso E

- Hay desarrollo de eflorescencias, lo que no excluye la existencia de subeflorescencias.
- Casi todo el volumen de solución salina se ha consumido en el cristalizador, por lo que ha sido elevada la migración de la solución a través de la roca. En estos casos en los que el contenido de la solución salina en el cristalizador ha disminuido hasta casi desaparecer, es evidente que la migración de la solución (tanto soluto como solvente) ha sido continua hacia el interior de la probeta. La tensión superficial y por tanto el ángulo de contacto de la solución con el sólido, deben ser lo suficientemente bajos como para que el fluido ascienda con facilidad por la red de capilares de la roca.

- Estos hechos se han detectado en las probetas de calcarenita ensayadas con soluciones de $K_2SO_4+KNO_3$, $NaNO_3+KNO_3$, KCl , $CaSO_4 \cdot 2H_2O+NaCl$, $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$, $NaNO_3$, $NaCl$, $NaCl+Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$, $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O+NaNO_3$ y $MgSO_4 \cdot 7H_2O+Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$.

La formación de cristales dendríticos durante las primeras horas del experimento, en las paredes del cristalizador que contiene la solución de $NaCl$ concentrado, se justifica por un movimiento de reptación (*creeping*) de la solución (Arnold & Kueng, 1985a). Los cristales esqueléticos y morfologías dendríticas se han formado en unas condiciones de sobresaturación de la solución muy elevadas, con alta velocidad de crecimiento de sus cristales.

Respecto a la presencia del ión Ca^{2+} en las soluciones remanentes, la no variación en su concentración se justifica por la precipitación de calcita secundaria y/o yeso en la calcarenita, y ello a pesar de la disolución del cemento calcítico y/o áridos que indudablemente se está produciendo como consecuencia de la acción corrosiva de las soluciones. En el caso de la solución remanente de $CaSO_4 \cdot 2H_2O + NaCl$, los elevados valores absolutos de Ca^{2+} se justifican por un incremento de su concentración en la solución, habida cuenta del mínimo volumen de solución salina remanente en el cristalizador, y la naturaleza de las eflorescencias cristalizadas exclusivamente de $NaCl$.

Salvo excepciones en las que siempre está involucrado el sodio, las soluciones salinas concentradas ascienden más lentamente por las probetas de calcarenita, siendo la altura máxima alcanzada menor que la de las soluciones diluidas. Este hecho debe relacionarse con la mayor viscosidad de las soluciones concentradas, y que a mayor concentración aumenta la tensión superficial del fluido, que supone el incremento del ángulo de contacto líquido-sólido que hace que el líquido moje con más dificultad al sólido.

12.3 PROPAGACIÓN DE IMPULSOS ULTRASÓNICOS

Resulta difícil establecer un modelo o patrón de evolución general sobre cómo se modifica la velocidad de transmisión de ultrasonidos en las calcarenitas según la solución salina ensayada, ya que dicha variación suele ser diferente según la naturaleza de cada solución. El comportamiento de dichas soluciones sobre los bloques de calcarenita, y por consiguiente su efecto cementante o disruptivo, difiere según sea una solución salina simple o mezcla, concentrada o diluida. No obstante, en líneas generales se puede establecer una relación entre el grado de cementación o disgregación de la calcarenita y la concentración de la solución salina ensayada en la probeta. En general, las soluciones diluidas que no suelen desarrollar eflorescencias pero sí subeflorescencias provocan una cementación de la roca, puesta de manifiesto por el incremento en la velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas. Por el contrario, las soluciones concentradas suelen generar fracturas en el material pétreo observadas *de visu* y cristalización de eflorescencias (en ocasiones de forma abundante) originando con frecuencia una arenización de la calcarenita tal que las velocidades de propagación de pulsos ultrasónicos se atenúan e incluso no se detectan. No obstante lo comentado, las valoraciones sobre la acción ejercida por las soluciones en el material pétreo soporte deben hacerse de forma específica. Sirva como ejemplo el caso de la probeta sometida a la acción de $NaCl$ concentrado, en la que se registra una disminución de la velocidad de ultrasonidos, no obteniéndose datos en la probeta ensayada con solución de $NaCl$ diluido, por lo que los resultados son incongruentes con la generalización antes planteada.

Como conclusión final, y a la luz de los resultados obtenidos con esta técnica y su comparación con otras técnicas de análisis (como la microscopía óptica petrográfica), resulta cuanto menos arriesgado utilizar este ensayo de transmisión de ultrasonidos como herramienta eficaz en la caracterización del grado de cementación de un material pétreo por cristalización de sales. Ello queda justificado por los resultados obtenidos de velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos que claramente son contradictorios (en algunos casos) con las observaciones del sistema poroso y grado de alteración de la calcarenita realizadas mediante microscopía óptica y electrónica de barrido. A este respecto hay que

mencionar los resultados obtenidos por autores como Calleja et al. (1989) en relación a la acción que ejerce el $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ en bloques de material calizo. Dichos autores detectaron (con sorpresa) controlando la evolución de la acción alterológica de dicha solución en las probetas, que después de 20 ciclos de cristalización mejoraban los parámetros ultrasónicos. En consecuencia, propusieron una revisión crítica del ensayo de cristalización de sales, pero no se cuestionaron el por qué de dicha mejoría en términos de efectos (e.g. texturales) inducidos por dicha cristalización.

12.4 COMPOSICION Y TEXTURA DE LAS SALES

12.4.1 Naturaleza y hábito de las sales determinados con XRD y LB

Del análisis de los datos obtenidos pueden derivarse las siguientes conclusiones:

- la acción corrosiva de determinadas soluciones salinas (e. g. sulfato de Mg o sulfato de Na) induce la formación de otras sales, tales como yeso y carbonato magnésico, como consecuencia del proceso de disolución del cemento calcítico y a veces de los áridos de la calcarenita;
- en las soluciones salinas mezcla (de dos soluciones simples), se comprueba el poder dominante de una de las soluciones, en el sentido de disminuir o inhibir la capacidad de la otra solución para precipitar cristales. Es de destacar la acción dominante del NaCl frente a la mayoría de otras soluciones salinas ensayadas, entre ellas la de sulfato magnésico. Este hecho debe relacionarse, entre otros aspectos, con las condiciones termohigrométricas de cristalización de las diferentes sales, y con el potencial iónico de cada solución para precipitar, y;
- cada tipo de sal presenta un patrón determinado de desarrollo de hábitos en los bloques de calcarenita. Estas morfologías y el estado de agregación de sus cristales se justifican según las mismas teorías expuestas en el apartado 9.5. En la mayoría de las probetas las eflorescencias cristalizan como agregados no compactos de cristales granulares duros, agregados compactos en forma de costra (de pequeños cristales granulares subhédricos) o como un tapiz (película que recubre la superficie del sustrato), detectándose raramente eflorescencias pulverulentas y *wiskers*.

Según Arnold & Zenhder (1989), uno de los factores externos que mayor influencia ejercen en el hábito de los cristales y su forma de agregarse es la humedad del sustrato poroso. Considerando este parámetro las costras se desarrollan en las zonas más húmedas del sustrato, donde el aporte de solución es mayor. Todas las sales (simples monofásicas, simples polifásicas, dobles, etc.) son susceptibles de cristalizar en forma de costra siempre que se cumplan estas condiciones, como de hecho se confirma en los ensayos llevados a cabo en este Trabajo y en los diversos experimentos realizados en laboratorio a lo largo del siglo XX (Lewin, 1981; Arnold & Kueng, 1985), en los que las probetas pétreas sistemáticamente se han impregnado con un aporte elevado de soluciones salinas saturadas.

Las costras desarrolladas en las calcarenitas ensayadas en este Trabajo pueden haber cristalizado directamente a partir de la solución salina, o por reacción química entre dos sales solubles (caso de las soluciones mezcla). Su ubicación en las probetas y el distinto espesor (a veces tan delgado como una película) debe relacionarse con las diferentes solubilidades de las sales. Así, las sales menos solubles necesitan para su transporte más cantidad de agua, y por lo tanto un sustrato más húmedo que las soluciones más solubles, lo que justifica la cristalización a diferentes alturas. Sirva como ejemplo la precipitación del sulfato de Mg y del sulfato de Na como costras sólo en las zonas más bajas de las probetas. Por otro lado, las soluciones saturadas de las sales más solubles contienen más soluto, por lo que el espesor de las costras formadas será más grueso en las mismas condiciones de humedad, lo que justifica el gran grosor de la costra de NaCl. Las secuencias en espacio y tiempo de costras y agregados no compactos de cristales duros, son debidas a cambios en las condiciones de suministro de la solución. Dada la heterogeneidad textural de la calcarenita no es de extrañar estas secuencias espaciales en una dimensión

tan reducida como es el bloque de calcarenita. Por otra parte, las costras pueden transformarse a eflorescencias sueltas por un proceso natural de envejecimiento, siendo ésta la causa que justificaría la no correspondencia entre las eflorescencias pulverulentas de epsomita del Monasterio, y la costra desarrollada en la calcarenita del experimento. Se observa por tanto, que el factor tiempo es decisivo en el hábito de las sales y en su poder destructivo como agentes de alteración.

Por lo que respecta a las eflorescencias pulverulentas, únicamente se ha detectado su formación a partir de tres soluciones salinas: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ diluido y concentrado y NaNO_3 concentrado, comprobándose que dichas masas pulverulentas han aparecido al final de una evolución temporal de las mismas.

La cristalización de *wiskers* sólo se ha producido con las soluciones salinas concentradas de $\text{NaCl} + \text{KCl}$, K_2SO_4 , KCl y $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. En este último caso cristalizaron cristales de Tenardita (Na_2SO_4) que evolucionaron a formas subhédricas de tamaño muy pequeño. El resto de las soluciones generadoras de cristales aciculares son potásicas, hecho también detectado en la composición de los *wiskers*, triquitos y agregados aciculares de las sales del Monasterio. De acuerdo con las ideas de Arnold et al., (1985), la formación de cristales aciculares exige un sustrato escasamente húmedo y un bajo suministro de solución salina.

12.4.2 Textura de las sales determinada con MOP y su efecto en las calcarenitas

De la aplicación de esta técnica de análisis se ha concluido que:

- Frente a la observación *de visu* de fracturas y pulverización en las calcarenitas tratadas con soluciones salinas concentradas, se ha detectado generación de fisuras a nivel microscópico en calcarenitas ensayadas con soluciones diluidas. Por tanto, las soluciones diluidas igualmente comprometen la estabilidad físico-mecánica del soporte pétreo. En cualquier caso, la formación de estas grietas debe relacionarse con las presiones generadas por la cristalización de las sales solubles, confirmándose que el incremento de concentración en las soluciones salinas provoca un aumento de las presiones de cristalización que se manifiesta por las grietas y arenizaciones observadas *de visu* de las calcarenitas (Correns, 1949; Winkler et al., 1987). En este punto es necesario mencionar que la magnitud de las fuerzas disruptivas generadas por una sal viene determinada por la cantidad de núcleos de cristales que se forman y de su velocidad de crecimiento, no por el volumen específico del cristal. La frecuencia de nucleación y la velocidad de crecimiento dependen de la solubilidad, concentración de los iones, la energía de red del cristal y la presencia de promotores o inhibidores, y no del grado de hidratación del cristal (Charola et al., 1979). Así, el que la sal cristalizada a partir de una solución saturada de sulfato de sodio sea $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ no significa que sea más destructiva para el soporte que si cristaliza, en similar cantidad, una sal anhidra como la thenardita o la halita. De hecho, la cristalización de thenardita es más perjudicial que la de mirabilita, ya que conforme más hidratada es una sal menor es la presión de cristalización que ejerce (Sperling et al., 1985).
- Las sales cristalizan en poros de distinto tamaño, aunque en general lo hacen en los de mayor tamaño. Efectivamente se observa que existen microporos sellados por sales, mientras que persisten grandes poros cuyas paredes apenas aparecen tapizadas por sales. Ello es incongruente con el hecho de que lo esperable termodinámicamente es que la cristalización ocurra preferentemente en los poros de radio más grande, ya que supone la formación de un material con un potencial químico más bajo (Rossi-Manaresi et al., 1990). Durante este crecimiento debe existir un transporte de solución salina de los poros más pequeños a los de mayor tamaño. Una vez sellados los poros grandes, y si todavía existe solución salina en los poros más pequeños, se produce la cristalización en éstos.

12.4.3 Hábito de las sales determinado mediante SEM

La aplicación de esta técnica ha permitido estudiar con detalle los diversos hábitos de los cristales desarrollados en la calcarenita, hábitos que proporcionan información acerca de las condiciones de formación de las sales. Como ya se ha comentado en el apartado 9.5., el hábito de un cristal y su estado de agregación está controlado por condiciones externas de formación (naturaleza, forma y suministro de la solución salina, grado de saturación, temperatura y humedad relativa del ambiente, etc.), así como por sus características cristalográficas (estructura cristalina, defectos, etc.). En dicho apartado también se exponen las diversas teorías de cristalización que explican de forma satisfactoria el crecimiento de los cristales a partir de una solución salina sobre un sustrato poroso, motivo por el que no se van a volver a referenciar dichos planteamientos. El análisis cuantitativo de los cristales efectuado con SEM ha posibilitado conocer qué fenómeno ha dado lugar a la sal precipitada. Por ejemplo, debido a la interacción entre dos soluciones salinas, por el efecto de *ión común*, o por reacción entre la solución salina “inyectada” en la probeta de calcarenita y el cemento calcítico de la misma.

Las conclusiones más relevantes son :

- Las sales cristalizan como costras formadas por cristales subhédricos en la mayoría de las probetas. Dadas las condiciones de suministro de la solución salina, era de esperar este desarrollo. Las costras se forman cuando la cantidad de solución salina es elevada, lo que se traduce en un sustrato poroso muy húmedo. Las costras pueden cristalizar directamente a partir de la solución salina, pero también como consecuencia de la reacción química entre dos sales solubles (Arnold et al. 1985b). Tal es el caso de la costra de darapskita ($\text{Na}_3(\text{SO}_4)(\text{NO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$) identificada en la probeta ensayada con $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{NaNO}_3$.
- Son pocos los casos en los que se han identificado *wiskers*. Es importante distinguir una forma de crecimiento en *wiskers* como consecuencia de un mecanismo de crecimiento debido a factores externos, de la forma de los cristales que presentan hábito fibroso debido a su estructura cristalina interna. Este último caso es el de los cristales aciculares de $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ agrupados en agregados radiales, en oposición a las acículas de thenardita identificadas en la probeta ensayada con $\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (ver Fig.11.3). El lugar de crecimiento de los *wiskers* ha sido en las zonas altas de las probetas, allí donde el aporte de solución es menor (sustrato más seco), pero también cristalizan sobre la costra ya formada. En este caso los cristales son largos, delgados y tortuosos, evidenciando un crecimiento sobre una superficie relativamente densa (más que el sustrato poroso que constituye la calcarenita), débilmente húmeda, y con un grado de evaporación moderadamente lento. Un caso particular de crecimiento de *wiskers* a partir de un gel se ha reconocido en la probeta ensayada con $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.
- Por lo que respecta a la calidad de los cristales, aquellos que han precipitado en el interior de la calcarenita aparecen deformados debido a una falta de espacio durante su formación. Las morfologías estructurales (e. g. cubos de NaCl y KCl) y los cristales con caras cristalinas visibles se desarrollan en la superficie, donde no hay impedimento para su libre crecimiento. Un aspecto interesante a considerar es la dimensión de los cristales de las sales. Los tamaños pequeños permiten, por una parte, la penetración del vapor de agua y la película de agua en zonas cada vez más profundas de la sal; por otra, la penetración de la sal en los poros del sustrato (Dohene, 1994). En cualquier caso se está favoreciendo el proceso de alteración.
- No se observan formas directas de crecimiento (tampoco se aprecian en la Iglesia de San Jerónimo), detectándose fenómenos de disolución en los bordes de los cristales, escalones de crecimiento, grietas de desecación, etc., debido a que cualquier fluctuación o variación en las condiciones externas de crecimiento del cristal se refleja en su hábito.

- En cuanto a la naturaleza de las sales cristalizadas, se han detectado varios fenómenos que han inducido dicha precipitación. En cualquier caso, siempre se cumple que en presencia de varios solutos que pueden precipitar por su escasa solubilidad, lo hace en primer lugar el de producto de solubilidad menor. Los fenómenos identificados son los siguientes:
 - la reacción entre la solución salina ensayada y el cemento carbonatado de la calcarenita, de tal modo que un ión de la solución forma una sustancia insoluble con un ión del CaCO_3 . Así se han formado las sales de sulfato cálcico, sulfato cálcico-magnésico, cloruro cálcico, carbonato magnésico y carbonato sódico;
 - la interacción entre dos soluciones salinas con un ión común, tal que por el efecto del mismo nombre (efecto de *ión común*) se produce una disminución de solubilidad de una de las sales, que es la que precipita. Sirva como ejemplo la cristalización de KCl en presencia de NaCl. A 20°C la solubilidad (g soluto/100 g H_2O) del NaCl (en una solución de NaCl) es de 35,8 y la del KCl (en una solución de KCl) es de 34,3. En una solución mezcla de NaCl + KCl, la solubilidad del NaCl es de 30,4 y la del KCl de 14,8. Otro ejemplo es el de la cristalización de KCl a partir de una solución de KCl + KNO_3 , y;
 - la reacción entre dos sales solubles, de modo que el ión de una sal forma con el ión de la otra una sustancia insoluble. Este sería el caso de la cristalización de la darapskita ($\text{Na}_3(\text{SO}_4)(\text{NO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$). La darapskita es un mineral relativamente raro, no obstante se ha identificado como eflorescencia en algunas iglesias alemanas (Holtkampetal, 1991) y suizas (Arnold et al., 1990).

12.5 MODIFICACION DEL SISTEMA POROSO

En líneas generales se ha comprobado que la porosidad total determinada en las muestras ensayadas es similar a la de la calcarenita de cantera. Aunque esta coincidencia pueda parecer incongruente con el hecho evidente de la cristalización de sales en las probetas, y más aún con la observación de reventones y desprendimiento de material en las mismas, el fenómeno es acorde con lo obtenido por Accardo et al. (1978) y Fitzner (1990) entre otros autores. Estos, tras realizar la medición del sistema poroso en un material pétreo antes y después de ser sometido a un experimento de cristalización de sales, constataron que la porosidad total de las rocas ensayadas permanecía invariable, no así la distribución de su sistema poroso. Se vuelve a constatar, una vez más, la importancia de realizar un detallado estudio del sistema poroso de los materiales pétreos (Delgado Rodríguez, 1978, 1993).

El efecto de la cristalización de sales en rocas ha sido investigado y discutido particularmente en dos casos generales.

- El primero, cuando la migración de la solución hacia la superficie es más rápida que el grado de evaporación de la roca, depositándose las sales en la superficie en forma de eflorescencias (que no entrañan peligro a la roca). En este supuesto no se detectaría variación del sistema poroso del sustrato.
- El segundo caso se produce cuando el proceso de secado de la roca es más veloz que la migración de la solución a la superficie, de modo que las sales cristalizan en el interior del sustrato pétreo. En este supuesto se podría detectar un descenso de la porosidad total, si las sales no ejercen la suficiente presión como para sobrepasar el límite mecánico de la roca (e.g. si cristalizan en poros de gran tamaño), o un incremento en el caso contrario, en el que se desarrollasen fuertes presiones de cristalización.

Consideraciones teóricas y observaciones experimentales han establecido el posible efecto cementante o disruptivo de la cristalización de sales. Así, el modelo de Lewin (1981) postula la formación de escamas

y desmoronamiento de la superficie de una roca cuando las sales cristalizan a 1-2 mm de distancia de la superficie. Otros autores como Rossi-Manaressi y colaboradores (1989, 1991) han puesto de manifiesto el efecto endurecedor de las sales cuando cristalizan cerca de la superficie, siempre y cuando precipiten en macroporos.

Es indiscutible que el aumento de la porosidad total en una roca supone la generación de nuevos huecos y/o fracturas, y por contra, una disminución de dicho valor significa la reducción de la porosidad (inducida por ejemplo por una cristalización de sales). En cambio, a la luz de los resultados obtenidos en este Trabajo para las calcarenitas con porosidad total similar a la de las rocas de cantera, se concluye que no se puede utilizar exclusivamente este parámetro para determinar el efecto alterológico causado por las sales. Se ha comprobado que la no variación de la porosidad total no significa que dichas calcarenitas no hayan sufrido degradación alguna, y por tanto, que las soluciones salinas en ellas introducidas apenas les hayan afectado. El estudio de detalle de la distribución del sistema poroso ha permitido concluir que esta afirmación es totalmente falsa, a la vez que posibilita determinar los posibles fenómenos que se han producido en el seno de las rocas. En todos los casos estudiados se comprueba que existe cementación, y que ésta es parcial y selectiva en los distintos rangos de poro seleccionados. El descenso del volumen de poros superior a 10 μm es el más patente y se justifica por el sellado parcial de dichos huecos, provocando el aumento de volumen de los poros de tamaño inmediatamente inferior, esto es, los poros de rango de radio entre 10-1 μm . En éstos, y en los poros más pequeños, también debe haberse producido sellado por precipitación de sales, ya que es el único fenómeno que puede justificar la reducción del porcentaje de microporos inferior a 0.01 μm (valores de 0% en la muestra 36A, de 0.15% en la muestra 12 y de 0.23% en la muestra 38A).

Por otra parte, hay que tener en cuenta que las sales ejercen otros efectos sobre las calcarenitas, además de los mencionados. Uno de estos fenómenos es la disolución del cemento calcítico debido a la acción corrosiva de las soluciones con un pH ácido o ligeramente ácido (un pH < 4 incrementa la solubilidad del CaCO_3). La consecuencia inmediata es la generación de nuevos poros (de pequeño tamaño), que coadyuva el aumento de la microporosidad detectada en casi todas las muestras analizadas. El aumento de microporosidad en las calcarenitas las vuelve más vulnerables frente a los procesos de alteración, por lo que en aquellos casos en los que el volumen de microporos ha aumentado, inevitablemente el proceso de cristalización conducirá a la desintegración de la probeta.

En términos termodinámicos lo esperable es que la cristalización de sales comience en los poros de mayor tamaño (puesto que supone la generación de un cristal con menor potencial químico) y, una vez sellados éstos, y siempre que exista aporte de solución salina adicional, la cristalización continúe en los poros pequeños. No obstante, en el experimento realizado en este Trabajo se ha comprobado que el proceso de cristalización no sigue este patrón, justificado por los siguientes motivos: 1) en tal caso habría desaparecido o disminuido ostensiblemente el volumen de macroporos, 2) no se hubieran producido las variaciones detectadas en los rangos de poro inferiores a 10 μm , 3) no habrían desaparecido los poros inferiores a 0.01 μm (que sólo se justifica por su sellado con sales).

Respecto al efecto que ejercen las distintas soluciones salinas sobre las calcarenitas hay que destacar cinco puntos.

- Las probetas ensayadas con $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$ y $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$ son las únicas en las que se detecta un aumento de la porosidad total (pero en una proporción muy baja), que se explica por el desarrollo de fracturas observadas *de visu*.
- En la probeta tratada con $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ se aprecia un aumento de la porosidad (27,44%) en la zona superior, justo donde se observan fisuras *de visu* y no hay desarrollo de eflorescencias. En cambio en la zona baja donde es patente la existencia de sales, la porosidad disminuye (21,67%).

- En el resto de las probetas ensayadas la porosidad total disminuye ligeramente o permanece constante, incluso en aquellos casos en que las muestras se han cogido de zonas de la probeta con desarrollo de eflorescencias (que se supone sólo cristalizan en superficie y por lo tanto no deben producir variación en el sistema poroso del sustrato).
- No se puede generalizar acerca de la acción disruptiva o cementante de las soluciones salinas según su grado de concentración, ya que en algunos casos las soluciones concentradas son las que provocan cementación (NaCl , $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ y $\text{NaCl} + \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y en otros casos las diluidas ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).
- De la comparación de los resultados obtenidos en este Trabajo de Investigación con los obtenidos por otros autores (Fitzner, 1990; Rodríguez Navarro, 1996) sobre la acción de la cristalización de sales en materiales pétreos, se confirma que el efecto de una solución salina en relación a la variación del sistema poroso del sustrato pétreo, depende de la composición y textura de este último.

Se concluye que, el aumento de la porosidad total de las calcarenitas ensayadas se debe a la generación de fracturas y/o poros inducidos por presiones de cristalización de las sales y/o la disolución del cemento calcítico. La disminución de dicho valor se debe a una acción cementante de las sales, que no supone necesariamente una mejoría de sus propiedades mecánicas. Es más, el estudio de la distribución del sistema poroso constata un aumento del volumen de microporos que hace más vulnerable a las calcarenitas.

12.6 CONCLUSIONES GLOBALES

De los datos y conclusiones parciales derivadas de cada una de las técnicas de estudio aplicadas en este ensayo de cristalización de sales, se destacan las siguientes conclusiones globales.

- 1) El grado de alteración que una solución salina induce sobre un material pétreo no puede ni debe valorarse empleando un sólo parámetro como enteramente satisfactorio, siendo imprescindible el concurso de los resultados proporcionados por varias técnicas para expresar su efecto alterológico. En este Trabajo la valoración del efecto alterológico de las distintas soluciones salinas es el resultado del estudio comparativo de los datos obtenidos con las técnicas analíticas presentadas: observación *de visu* del efecto de las soluciones salinas sobre la calcarenita, análisis de la concentración de dichas soluciones en el tiempo, estudio del hábito y naturaleza de las sales mediante LB, MOP y SEM, análisis del sistema poroso del soporte mediante MIP, determinación de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en las probetas antes y después del ensayo de cristalización de sales, y determinación composicional de las calcarenitas y las sales en ellas desarrolladas.
- 2) La naturaleza de las soluciones salinas ensayadas, el tipo de soporte pétreo, el protocolo seguido en el experimento, y las condiciones medioambientales en que éste se desarrolla, son parámetros determinantes en el efecto que la cristalización de sales tiene sobre el sustrato poroso. Esto explica el que en este Trabajo se obtengan discrepancias y analogías con los resultados obtenidos por otros investigadores (Goudie et al., 1970; Kwaad, 1970; Goudie, 1974; Lewin, 1981; Smith et al., 1983; Goudie, 1986 y Rodríguez et al., 1996).
- 3) las soluciones salinas concentradas son las que provocan una mayor acción destructora sobre la calcarenita en los experimentos de cristalización de sales llevados a cabo en este Trabajo, efectos que se aprecian a simple vista. Por el contrario, los daños son mínimos en las probetas tratadas con soluciones salinas diluidas.

- 4) En general, las soluciones salinas simples provocan un efecto alterológico superior al de las soluciones que se han obtenido por mezcla de otras dos.
- 5) Las soluciones en cuya composición interviene el sulfato magnésico (e.g. $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{NaNO}_3$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y el nitrato magnésico (e.g. $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{NaNO}_3$) son las más dañinas. Las primeras originan fisuras que revientan la calcarenita; las segundas provocan la pulverización (disgregación) más intensa. Le siguen en efectividad la acción de las soluciones con sulfato sódico ($\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{NaNO}_3$ y $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$) y las soluciones con cloruro sódico (NaCl y $\text{NaCl} + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
- 6) En las probetas ensayadas con soluciones mezcla precipita la sal cuyo proceso cinético de cristalización es más rápido, inhibiendo así el poder cristalizador de la otra sal soluble presente en la solución.
- 7) El incremento del grado de sobresaturación de una solución salina supone una tasa de crecimiento mayor, que a su vez se relaciona con un tamaño de cristal más pequeño. Por tanto, y considerando que en este experimento el mayor efecto destructivo lo originan las soluciones concentradas, se concluye que las velocidades de nucleación elevadas son las que originan los mayores daños en los sustratos donde precipitan las sales.
- 8) No se puede afirmar taxativamente que el desarrollo de eflorescencias en un soporte pétreo sólo origina un bajo grado de deterioro (siendo su efecto principalmente de tipo estético), y que la precipitación de subeflorescencias y/o criptoflorescencias provocan un efecto desastroso en el seno de los sustratos donde se encuentran. En el experimento desarrollado en este Trabajo algunas de las probetas más alteradas presentan un extenso desarrollo de eflorescencias (lo que no exime la existencia de subeflorescencias). Por su parte, parece inexistente la acción de las soluciones diluidas sobre la calcarenita, e incluso de algunas soluciones concentradas (incluso aunque se haya detectado presencia de subeflorescencias en las probetas en las que actúan). Ello sugiere que la cristalización de sales en el seno de un material poroso puede tener una acción cementante o disruptiva, y que (como se ha comprobado en este Trabajo) se relaciona con el grado de saturación de la solución salina.

13 CONCLUSIONES FINALES

Con este capítulo final sólo se pretende establecer aquellas consideraciones que surgen como consecuencia del estudio conjunto de los resultados y conclusiones relativos al estado de conservación y evolución alterológica de los materiales del Monasterio de San Jerónimo (Parte I), y los resultados y conclusiones proporcionados por el experimento de cristalización de sales (Parte II). No se trata por tanto de volver a reiterar o destacar consideraciones o conclusiones de los apartados anteriores citados, sino presentar nuevos planteamientos fruto del comentado estudio conjunto, y que en aras de esa intención de síntesis considero deben ser lo más genéricos y globales posibles. De ahí lo sucinto de los mismos frente a las conclusiones desarrolladas para las Partes I y II.

De acuerdo con lo argumentado se considera oportuno resaltar varias hechos.

- A) Los estudios sobre los fenómenos alterológicos en el Monasterio y los datos obtenidos sobre la actuación de soluciones salinas en las probetas de calcarenita son coincidentes al establecer como más nocivas aquellas soluciones que contienen sulfato de magnesio y cloruro sódico. Así mismo, y por lo que respecta al efecto destructivo de las formas de cristalización, se confirma la acción que, en términos generales, provocan tanto las eflorescencias como las subeflorescencias.
- B) Las diferencias observadas en cuanto a la forma de alteración del sustrato y la morfología de las sales cristalizadas, entre la realidad del monumento y los resultados obtenidos en el laboratorio, confirman la dificultad de trasladar un modelo experimental general a la realidad

específica de un determinado monumento. En el caso presentado en este Trabajo las discrepancias se deben a varias limitaciones impuestas en el experimento, entre las que destacan:

- en el ensayo no ha existido un suministro continuo y prolongado en el tiempo de solución salina a la calcarenita. La evidencia del monumento confirma que el efecto alterológico de la cristalización de sales es un fenómeno acumulativo en el tiempo, con un aumento sustancial en el grado de deterioro del sustrato, hecho corroborado por diversos autores (Goudie, 1986). Así por ejemplo, la acción del sulfato de magnesio sobre la calcarenita en el experimento origina abundante fracturación del soporte, a diferencia del desarrollo masivo de eflorescencias pulverulentas detectadas en la Iglesia de San Jerónimo;
 - el tamaño de las probetas empleadas en los ensayos no es fiel reflejo de las dimensiones de los materiales sobre los que, en la realidad de un monumento, actúan las soluciones salinas. Esto incide de manera decisiva en la capacidad de evaporación y en la localización de las sales en el sustrato, y;
 - en los experimentos no se ha considerado la influencia de la interacción entre varios soportes porosos, tal y como ocurre en la Iglesia de San Jerónimo. En el monumento las sales precipitan en la interfase entre calcarenita y morteros de revestimiento o pintura mural.
- C) Destacar la importancia del grado de conocimiento que ensayos como los desarrollados en este Trabajo aportan sobre el comportamiento de las soluciones salinas en un determinado material, ya que permiten una evaluación de efectos y control de factores que normalmente no se puede alcanzar en un monumento. En este caso, los resultados aquí expuestos deben marcar la pauta para el desarrollo de futuras investigaciones previas a intervenciones de restauración del Patrimonio Monumental de Granada, en el que la biocalcarenita y la presencia de sales son elementos constantes. En efecto, los datos aquí presentados deben ser el punto de partida para abordar en este caso la posibilidad de incidir o modificar el comportamiento de estas soluciones en la biocalcarenita, ya sea actuando sobre las condiciones medioambientales, o mediante la adición de sustancias que modifiquen sus mecanismos de cristalización (capacidad de migración, velocidad de nucleación...).

Bibliografía

- Públicas, Transportes y Medio Ambiente. Madrid. 350pp.
- Alvarez Galindo, J.I.; Martín Pérez, A. y García Casado, P.J. (1995). Historia de los morteros. *Boletín Informativo del IAPH*, Consejería de Cultura, Junta de Andalucía. nº13, 52-59.
- Amadora, M.L.; Lazzarini, L. y Massa, S. (1989). Il deterioramento da sodio cloruro di rocce compatte e porose a Venezia. *Atti del 1° Symp. Intr. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo*. Bari, 83-89.
- Amoroso, G.G. y Fassina, V. (1983). Stone decay and conservation. *Material Science. Monographs* 11. Elsevier. N.Y, 453pp.
- Arnold, A. (1976). Behaviour of some soluble salts in stone deterioration, in: N. Beloyannis, *Proc. 2nd Int. Symp. on the Deter. of Building Stone*. Athens. 1.
- Arnold, A (1982). Rising damp and saline minerals. *4th Int. Congr. on the Deter. and Preserv. of the Stone Objects*. Louisville, 11-28.
- Arnold, A y Zehnder, K. (1985a). Crystallization and habits of salt efflorescences on walls I. Methods of investigation and habits. *Vth Int. Congr. on Deter. and Conserv. of Stone*. Lausanne, vol 1, 255-267.
- Arnold, A y Zehnder, K. (1985b). Crystallization and habits of salt efflorescences on walls II. Conditions of Crystallization. *Vth Int. Congr. on Deter. and Conserv. of Stone*. Lausanne, vol 1, 269-277.
- Arnold, A. y Kueng, A. (1985). Crystallization and habits of salt efflorescences on walls I: Methods of investigation and habits. *Vth Int. Congr. on Deter. and Conserv. of Stone*, Lausanne, 1, 255-267.
- Arnold, A. y Zehnder, K. (1989). Salt weathering on monuments. *Atti del 1° Symp. Inter. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo*. 31-58. Bari.
- Arnold, A. y Zehnder, K. (1990). Salt weathering on monument. *Advanced workshop: Analytical methodologies for the investigation of damaged stones*. Pavia (Italy), 31-58.
- Ashurst, J. y Dimes, G. (1977). *Stone in building*. The Architect. Press. London.
- Accardo, G.; Laurenzi Tabasso, M.; Massa, S. y Rossi-Doria, P. (1978). Measurements of porosity and mechanical resistance in order to evaluate the state of deterioration of some stones. *Int. Symp. on Deter. and Protect. of Stone Monuments*. Paris, 1-22.
- Aguirre, E. (1958). Novedades Paleomastológicas de la depresión de Granada y estratigrafía de su borde NE (Alfacar). *Est. Geol.* XIV, 38, 107-130.
- Alessandrini, G. (1992). The electronic microscopy in art and archaeometry: the up-date knowledges. *Electron Microscopy, 2. EUREM 92*. Granada. Spain. 765-769.
- Alonso, J.; Esbert, R.M. y Ordaz, J. (1987). Caracterización del sistema poroso de calizas y dolomías. *Bol. Geol. Min.* 226-237.
- Alvarez de Buergo, M. y González Limón, T. (1994). *Restauración de edificios monumentales. Estudio de materiales y técnicas instrumentales*. Ministerio de Obras

- Ashurst, J. y Ashurst, N. (1988). Mortars, plasters and renders. In *Practical building conservation*. English Heritage Technical Handbook, vol. 3. 85pp.
- ASTM (1986). Annual Book of ASTM Standards. Section 4. Construction Vol 04.08. Soil and Rocks. Building stones. ASTM ed. Philadelphia, 1078pp.
- Aubert, M. (1964). *Trionfo del gotico*. Milano, 71-74.
- Auger, F. (1987). *Altération des roches sous influence marine, dégradation des pierres en oeuvre, simulation accélérée en laboratoire*. Thèse Doctorat d'état es Sciences. Université de Poitiers. 3 Vol.
- Auger, F. (1988). Simulation accélérée de la dégradation des matériaux de construction an ambiance aérienne saline. *Symp. Inter. Athens*, In: *La géologie de l'ingénieur appliquée aux travaux anciens, monuments et sites historiques, préservation et protection*. vol.2, 797-804.
- Auger, F. (1989). World limestone decay under marine spray conditions. *1st Inter. Symp. The conservation of monuments in the Mediterranean Basin*. 65-69.
- Baldassarre, G., Fanuli, A., Mongelli, F., Nuovo, G., Walsh, N. y Zito, G. (1989). Influenza delle variazioni dei parametri fisici sulla valutazione dello stress termico di rocce carbonatiche pugliesi. *1st Inter. Symp. The conservation of monuments in the Mediterranean Basin*. 289-294.
- Bartrum, J.A. (1936). Honeycomb weathering of rocks near the shore line. New Zeland. *J. of Science and Technology*. 18 (7) 593-600.
- Beaumont, P. (1968). Salt weathering on the margin of the Great Kavir, Iran. *Geol. Soc. Amer. Bull*, 79, 1683-1684.
- Bennema, P. (1974). Crystal growth from solution - theory and experiment-. *Journal of Crystal Growth*. 25, 76-83.
- Birkett, H.G. y Rooney, J. (1997). Study of paint films by electron microscopy. *Pigment and resin technology*. 6, 14-18.
- Biro, P. (1954). *Désagrégation des roches cristallines sous l'action du sel*. C.R. Acad. Sci. Paris. 238, 10, 1145-1146.
- Bontcé, J. (1989). *Técnicas y secretos de la pintura*. Edit. LEDA, Barcelona. 176pp.
- Bradley, G.W. y Grim, R.E. (1961). *The X ray identification of crystal structure of clay minerals*. Mineral. Soc., London, 544pp.
- Braga, J.C.; Martín, J.M. y Alcalá, B. (1990). Coral reefs in coarse-terrigenous sedimentary environments (Upper Tortonian, Granada Basin, southern Spain). *Sed. Geol.*, 66, 135-150.
- Brard, P. (1874). In Larousse "Grand dictionnaire universel du XIX e siècle". T 12, 976pp.
- Cabrera, J.M. (1979). Causas de alteración y métodos de conservación aplicables a los monumentos hechos en piedra. *Materiales de Construcción* 174, 1-38.
- Cacace, C. (1991). *Valoración y control continuado de los parámetros físicos*. La Carta del Riesgo. ICR, Granada, 48-58.
- Calleja, L.; Montoto, M.; Pérez García, B.; Suárez del Río, L.M.; Martínez Hernando, A. y Menéndez Villar, B. (1989) An ultrasonic method to analyse the progress of weathering during cyclic salt crystallization laboratory test. *Atti del 1^o Symp. Inter. La Conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo*. Bari. 313-318.
- Camón Aznar, J. (1981). "Summa Artis", Historia General del Arte, dirigido por J. Pijoán. "La escultura y la rejería española del siglo XVI". Vol. XVIII, 4^a ed. Espasa-Calpe, S.A. Madrid.
- Camuffo, D. (1991). Physical weathering of monuments. In: *Weathering and air pollution. Community of Mediterranean Universities. 1^o course*. 51-66. Lago di Garda (Portese)-Venezia-Milano (Italy).
- Camuffo, D.; Del Monte, M. y Sabbioni, C. (1983). Origin and growth mechanisms of the sulfated crusts on urban limestone. *Water, Air and Solid Pollution* 19, 351-359.
- Camuffo, D.; Del Monte, M.; Sabbioni, C. y Vittori, O. (1982). Wetting, deterioration and visual features of stone surfaces in an urban area. *Atmospheric Environment* 16, 2253-2259.
- Camuffo, D. y Bernardi, A. (1991). Análisis microclimática al cenacolo vinciano. *Bollettino geofisico*, 3, 126p.
- Canttoni, V. (1984). X ray diffraction and SEM microanalysis of the degraded marble of

- statue. *Proc. Symp. Sc. Method in work of art*, 182-184.
- Cardell Fernández, C. (1994). Estudio composicional y estructural de las escayolas policromadas de la Alhambra de Granada. *III Curso Inter. de Conserv. y Restaur. del Patrimonio: yeserías y estucos*. Universidad de Alcalá de Henares (Madrid), 1-8.
- Cardell Fernández, C. y Rodríguez Gordillo, J. (1992). Formación de sales en materiales pétreos (Monasterio de San Jerónimo, Granada). Origen y procesos de deterioro asociados. *III Congr. Geol. de España y VIII Congr. Latinoamericano de Geol.* 3, 46-48.
- Carroll, D. (1970). *Rock weathering*. Monograph in Geoscience. Plenum Press. Ed. New York. 203p.
- Castillo Martín, A. (1986). *Estudio hidroquímico del acuífero de la Vega de Granada*. Tesis Doctoral. Servicio de publicaciones de la Universidad de Granada, 658p.
- Cennini, C. (1988). *El libro del arte*. Comentado por Franco Brunello. Edit. Akal, Madrid. 264 pp.
- Charola, A. y Lewin, S. (1979). Examples of stone decay due to salt efflorescence. *3rd Int. Congr. on the Deterior. and Preserv. of Stones*. Venezia, 153-163
- Charola, A.; Rossi-Manaresi, R.; Koestler, G.; Wheeler, G. y Tucci, A. (1984). SEM examination of limestone treated with silanes or prepolymerized silicone resin in solution. *Paris Congres*, 180-184.
- Charola, E.; Dupas, M.; Sherryll, R. y Freund, G. (1984). Characterization of ancient mortars: chemical and instrumental methods. *Proc. Symp. Sc. Method applied to work of art*, 28-34.
- Cheng, R.J. Hwu, J.R.; Kim, J.T. y Leu S. (1987). Deterioration of marble structure: the role of acid rain. *Analytical Chemistry* 59, 104A-106A.
- Cigni, G. y Codacci-Pisanelli, B. (1987). *Umidità e degrado negli edifici. Diagnosi e rimedi*. Ed. Kappa. Roma. 151pp.
- Cobb, J.W. (1909). In: Evans, I.S. (1969). Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue de géomorphologie dynamique*, nº4. 155-177.
- Coleman, J.M.; Gagliano, S.M. y Smith W.G. (1966). Chemical and physical weathering on saline high tidal flats. N. Queensland, Australia. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 77 (2), 205-206.
- Colina Munguía, S. (1964). *En Granada surge una torre*. En diario "Patria", Granada, 13 de Noviembre de 1964.
- Colina Munguía, S. (1986). *Monasterio de San Jerónimo de Granada*. Edit. Everest, S.A., 61.
- Cooke, R.U. y Smalley, I.J. (1968). Salt weathering in desert. *Nature* 220 (5173), 1226-1227.
- Cooke, R.U. (1979). Laboratory simulation of salt weathering processes in arid environments. *Earth Surface Proc. and Landforms*, 4, 347-359.
- Correns, C.W. (1949). Growth and dissolution of crystal under linear pressure. *Discussions of the Faraday Society*, 5, 267-271.
- Crevello, P.D.; Rine, J.M. y Yanesky, D.F. (1981). A method for impregnating unconsolidated cores and slabs of calcareous and terrigenous muds. *J. Sedim. Petr.*, 51, 658-660.
- De Angelis D'Ossat, G. (1972-1982). *Guida allo studio metodico dei monumenti a delle loro cause di deterioramento*. ICCROM. Roma, 1-24.
- De la Torre, M.J. (1995). *Estudio de los materiales de construcción de la Alhambra*. Monografía Arte y Arqueología ed. Univ. Granada, 213.
- De Tommasi, G. y Laurenzi Tabasso, M. (1989). La Cattedrale di Trani: influenza di condizioni ambientali controllate sul degrado del paramento interno. *1st Inter. Symp. The conservation of monuments in the Mediterranean Basin*. 397-406.
- Del Monte, M.; Sabbioni, C. y Vittori, O. (1984). Urban stone sulphation and oil-fired carbonaceous particles. *Atmospheric Environment* 15, 645-652.
- Del Monte, M.; Sabbioni, C.; Ventura, A. y Zappia, G. (1984). Crystal growth from carbonaceous particles. *The Science of the Total Environment* 36, 369-376.
- Delbourgo, S. (1971). Note technique sur l'utilisation de la microsonde électronique dans l'analyse des éléments constitutifs de la couche picturale. *Annales du LRM*, 35-44.

- Delgado Rodríguez, J. (1978). *About the quantitative determination of rock weatherability. A case history*. Memoria nº499. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil. Ministerio da Habitacao e Obras Públicas. Lisboa.
- Delgado Rodríguez, J. (1982). Laboratory study of thermally fissured rocks. *4th Int. Congr. on Deterior. and Preserv. of stone objects*, Louisville, Kentucky (Eds: Gauri & Gwinn) Univ. of Louisville, Kentucky, 281-294.
- Delgado Rodríguez, J. (1983). Laboratory study of thermally-fissured rocks. *Memories du LNEC*. 583, 13p.
- Delgado Rodríguez, J. (1993). Measurement and significance of physical properties on granitic rocks. *2º curso: Stone material in monuments: diagnosis and conservation*. C.U.M. Univ. School of Monument Conservation. Greece. 71-81.
- Diakumaku, E.; Ausset, P.; Sterflinger, K.; Wollenzien, U.; Krumbein, W. y Lefebvre, R.A. (1994). On the problem of the rock blackening by fly-ash, fungal and other biogenic particles, and their detection in Mediterranean marbles an monuments. *Atti del 3º Simp. Inter. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo. Venezia*, 305-310.
- Díaz Martos, A. (1978). *Restauración y conservación del arte pictórico*. Arte Restauro, S.A. Madrid. 213pp.
- Doerner, M. (1921). *Los materiales de pintura y su empleo en el arte*. Edit. Reverté, S.A. Barcelona. 4º edición. 460 pp.
- Dohene, E. (1994). In situ dynamics of sodium sulfate hydration and dehydration in stone pores: observations at high magnification using the environmental scanning electron microscope. *III Int. Symp. Conserv. of Monuments in the Mediterranean Basin*. Venice (Italy). 143-150.
- Dohene, E. y Stulik, D.C. (1990). Application of the environmental scanning electron microscope to conservation science. *Scanning Microscopy*, 4, 275-286.
- Dohene, E. y Stulik, D.C. (1991). Dynamics studies of materials using the environmental scanning microscope. *Material Research Soc. Symp.Proc.*, 185, 31-37.
- Dunn, E.J. (1915). In: Evans, I.S. (1969). Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue de géomorphologie dynamique*, nº4. 155-177.
- Durán Suárez, J.A. (1996). *Estudio de consolidantes y protectivos para la restauración de material pétreo*. Universidad de Granada, Tesis Doctoral, 359.
- Durán Suárez, J.; García Casco, A.; Sánchez Navas, A. y Rodríguez Gordillo, J. (1992). Estudio de alteración en travertinos (Iglesia del Salvador, Granada). Propuesta restauradora. *III Congr. Geol. Esp. y VIII Congr. Latinoamericano Geol.* Salamanca, 3, 80-84..
- Durán Suárez, J.; García Casco, A.; Sánchez Navas, A. y Rodríguez Gordillo, J. (1993). Caracterización de las alteraciones en pilares de travertino de La Iglesia del Salvador (Granada). Propuestas restauradoras. *Bol. Soc. Esp. Min.* 16, 1-12.
- Durán Suárez, J.A. y Rodríguez Gordillo, J. (1995). Colorimetric cataloguing of stone materials (biocalcarenite) and evaluation of the chromatic effects of different restoring agents. *Science of the Total Environment* 167, 171-180.
- Efes, Y. (1979) Investigations on correlations between the porosity and corrosion of natural stones. *3rd Inter. Congr. on the Deter. and Preserv. of Stones*, Venezia, 231-243.
- Esbert, R.M.; Ordaz, J.; Alonso, F.J. y Valdeón, L. (1984). Influencia de las características petrofísicas en la durabilidad de areniscas utilizadas en Monumentos. *I Congr. Español Geología*. Tomo II, 921-931.
- Evans, I.S. (1969). Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue de géomorphologie dynamique*, nº4. 155-177.
- Fernández, J. y Rodríguez Fernández, J. (1991). Facies evolution of nearshore marine clastic deposits during the Tortonian transgression -Granada Basin, Betic Cordilleras, Spain-. *Sed. Geol.* 71, 5-21.
- Ferrari da Passano, C y Zezza U. (1986). Explotation and properties of the Candoglia marble. In: *Meeting of advanced methods and techniques for the study of stone decay, cleaning and conservation*, Pavia (Eds.

- Veniale & Zezza). ICOMOS. Univ. Pavia, 29-64.
- Firestone, F.A. (1945). Supersonic reflectoscope, an instrument for inspecting the interior of solid parts by means of sound waves. *J. Acoust. Soc. Amer.* 17, 287-299.
- Fitzner, B. (1990). Porosity analysis - A method for the characterization of building stones in different weathering states. *Proc. of an Int. Symp: Engin. Geol. of Ancient Works, Monuments and Historical Sites.* Athens. 2031-2037.
- Fitzner, B. (1991). *Mapping, measurements and microstructure analysis - combined investigations for the characterization of deteriorated natural stones.* University School Monument Conservation. Portese (Italy).
- Fitzner, B.; Heinrichs, K. y Kowtnatzki, R. (1992). Classification and mapping of weathering forms. *VII Int. Cong. of Stone,* Lisbon. 1, 957-968.
- Freestone I.C. y Middleton, A.P. (1987). Mineralogical applications of the analytical SEM in archaeology. *Mineral. Magazine,* 51-1, 21-31.
- Furlan, V. (1990). Causes, mechanisms and measurement of damaged in cultural heritage materials. The state of the art: mortars, bricks and renderings. In: *Analytical methodologies for the investigation of damaged stones.* Pavia, Italy.
- Galán, E. (1989). Carbonate rocks; alteration and control of stone quality: some considerations. *1st Inter. Symp. The conservation of monuments in the Mediterranean Basin.* 249-254.
- Galán, E. (1991). The influence of temperature changes on stone decay. In: *Weathering and air pollution. Community of Mediterranean Universities. 1^o course.* pp 119-129. Lago di Garda (Portese)-Venezia-Milano (Italy).
- Galán, E.; Guerrero, M.A.; Vázquez, M.A. y Zezza, F. (1992). Progressive deterioration of marble columns by thermal changes in relation to their state of superficial decay. *7th Inter. Congr. on Deter. and Conserv. of stone.* 2, 905-913. Lisbon, Portugal.
- Gallego y Burín, A. (1982). "Granada, guía artística e histórica de la ciudad". Edit. Don Quijote. Madrid, 433.
- Gárate Rojas, I. (1993). *Artes de la Cal.* Ministerio de Cultura. ICRBC. Madrid. 330p.
- García-Ruiz, J.M. (1986). Growth history of PbS single crystals at room temperature. *Journal Crystal Growth.* 75, 441-453.
- García-Ruiz, J.M.; López Acevedo, V. y Tavira, P. (1981). Crecimiento de triquitos sobre gel de sílice. Aplicación al KBr. *Estudios geológicos.* 37, 3-8.
- Garrecht, H., Hildorf, H.K. y Kropp, J. (1991). Hygroscopic salts - influence on the moisture behaviour of structural elements. *5th Int. Conf. of durability of building materials and components.* U.K. 313-325.
- Gauri, A.S. (1986). Laboratory simulation of the "wick effect" in salt weathering of rock. *Earth surface Processes and Landforms,* vol. 11, 275-285.
- Gauri, K. y Punuru, A. (1989). Characterization and durability of limestones determined through mercury intrusion porosimetry. *1^o Symp. Inter. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo.* Bari, 255-258.
- Gauri, K.L.; Chowdhury, A.N.; Kulshreshtha, N.P. y Punuru, A.R. (1990). Geologic features and durability of limestones at the Sphinx. *Environ. Geol. Water Sci.* Vol. 16. N^o 1, 57-62.
- Gibbs, R.J. (1967). Quantitative X-ray diffraction analysis using clay minerals standards extracted from the samples to be analysed. *Clay Min.* 7. 79-90.
- Gómez-Moreno Calera, J.M. (1989). *La arquitectura religiosa granadina en la crisis del Renacimiento (1560-1650).* Monografía de Arte y Arqueología. Univ. Granada-Diputación Provincial, 486p.
- Gómez-Moreno Calera, J.M. (1992). *El arquitecto Ambrosio de Vico.* Univ. de Granada. Servicio de Publicaciones, 247p.
- Gómez-Moreno González, M. (1892). "Guía de Granada". Imp. Indalecio Ventura. Granada, 530.
- Gómez-Moreno Martínez, M. (1973). "Diego Siloé" (Homenaje en el IV centenario de su muerte). Universidad de Granada.

- Gómez-Moreno Martínez, M. (1983). *Las águilas del Renacimiento español*. 2ª edición. Edit. Xarit, Madrid.
- González, R.; Pareja, R., y Ballesteros, C. (1991). *Microscopía electrónica*. Textos de apoyo de la Universidad Complutense de Madrid.
- Goodhew, P.J. y Humphrey, F.J. (1988). *Electron microscopy and analysis*. Taylor & Francis, London, 232 p.
- Goudie, A.S. (1974). Further experimental investigation of rock weathering by salt and other mechanical processes. *Zeitschrift für Geomorphologie supplementband*, 21, 1-12.
- Goudie, A. y Cooke, R.U. (1983). Salt weathering simulation -some comments-. *Geografiska Annaler*, 65A, 296-298.
- Goudie, A.S.; Cooke, R.U. y Evans, I.S. (1970). Experimental investigation of rock weathering by salt. *Area*, 2, 42-48.
- Guardia Olmedo, J.J. (1987). The present state of the stone of Saint Jerome Church, Granada, Spain. *7th Meet. of the Europ. Clay Groups*. 22-29.
- Guardia Olmedo, J.; Gómez Moreno, J.M.; López Guzmán, R. y Prieto Moreno, J. (1986). *Arte y deterioro en los monumentos granadinos. Catedral, Chancillería y Palacio de Carlos V*. Universidad de Granada. Junta de Andalucía.
- Guardia Olmedo, J.J. ; Palacios, J. y Palomino Urdá, P. (1987). *Estado actual en que se encuentran las fachadas de piedra de la Iglesia de San Jerónimo*. Cuadernos de Arte. Univ. Granada. 135-149.
- Guerrero, M.A.; Vázquez, M.A.; Galán, E. y Zezza, F. The physical-mechanical properties and ultrasonic data as criteria for evaluation of calcareous stone decay. *1º Symp. Inter. La Conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo*. Bari. 309-312.
- Gummerson, R.J.; Hall, C. y Hoff, W.D. (1980). Water movement in porous building materials - II. Hydraulic suction and sorptivity of brick and another masonry materials. *Building and Environment*, vol. 17, 101-108.
- Hammecker, C.; Esbert, R.M. y Jeannette, D. (1992). Geometry modifications of porous network in carbonate rocks by ethyl silicate treatment. *7th Int. Congr. on Deter. and Conserv. of stone*, Lisbon (Portugal), 3, 1053-1062.
- Handbook of Chemistry and Physics. (1978-79). 59th Edit. CRC Press, Inc. Florida. I-57.
- Harris, W.H. y Matthewes, R.K. (1968). Subaerial diagenesis of carbonate sediments: efficiency of the solution-precipitation process. *Science*, 160, 77-79.
- Hearle, J.W.S.; Sparrow, J.T. y Cross, P.M. (1972). *The use of scanning electron microscope*. Pergamont Press. Oxford, 278 p.
- Hollan, H.D.; Holland, H.J. y Muñoz J.L. (1984). The coprecipitation of cations with CaCO₃ II. The coprecipitation of Sr²⁺ with calcite between 90°C and 100°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 28, 1287-1301.
- Holt, D.B.; Muir, M.D.; Grant, P.R. y Boswana, I.M. (1974). *Quantitative scanning electron microscopy*. Academic Press. London, 570 p.
- Holtkamp, M.H.P.C. y Heijnen, W.M.M. (1991). The mineral darapskite in the efflorescence on two dutch churches. *Studies in Conservation* 36, 175-178.
- Honeyborne, D.B. y Harris, P.B. (1958). The structure of porous building stone and its relation to its chemical behavior. *10th Colston Symp. "Structures and properties of porous materials"*. Everett and Stone Eds. Butterworth's, London, 343-363.
- Huisman H.F. (1983). Contact angle and Rootare-Preuzlow equation in Mercury Intrusion Porosimetry. *Jour. Coll. Interface Sci.*, 94, 25-36.
- Jiménez Salas, J.A. y De Justo Alpañás, J.L. (19..). *Geotecnia y cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas*. 2ª ed. Edit. Rueda. Apto. correos 43001, 466pp.
- Kwaad, F.J.P. (1970). Experiments on the granular desintegration of granite by salt action. Univ. of Amsterdam. *Phys. Geogr. and Soil Sci. Lab. Publ.* 16, 67-80.
- Kelly, J.G. (1985). Geological aspects of the decay of Irish granitic building materials. *5th Int. Congr. on Deter. and Conserv. of stone*, Lausanne, 431-442.
- Kinsman, D.J. (1969). Interpretation of Sr²⁺ concentrations in carbonate minerals and rocks. *Journal Sed. Petrol.*, 39, 486-508.

- Klemm, D. y Snethlage, R. (1978). Research on surface-conservation of corroded pentelish marble of the akropolis in Athens. *Int Symp. Alter. et Protect. des monuments en pierre*, Paris, 1-10.
- Klingspor, M. y Kwiatkowski, D. (1992). Protection of dense limestone and marble with microcrystalline waxes. *7th Int. Congr. on Deter. and Conserv.* 25. 1-13.
- Knöfel, D.K.; Hoffman, D. y Snethlage, R. (1987). Physico-Chemical weathering reactions as a formulary for time-lapsing ageing tests. *Materials and structures*, 127-135.
- Komar, A. (1979). *Building materials and components*. Mir publishers. Moscow, 503pp. Traslated from the Russian by I. Savin.
- Kretz, R. (1983). Symbols for rocks forming minerals. *Amer. Miner.* 68, 277-279.
- Laborda, F.; Ortiz, M.L. y Arroyo, I. (1994). Microbiological study carried out on the roman aqueduct at Segovia (Spain). *3^o Symp. Inter. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo*. Venezia, 359-363.
- Laurenti Tabasso, M. (1986). La conservazione delle pietre naturali ed artificiali. In: *Il restauro della pietra*, Ed. Cedam, Padova (Italy), 21-30.
- Laurie, A.P. (1925). Stone decay and the preservation of buildings. *J. Soc. Chem. Indust.* (London). 44B pp. 86-92T.
- Lazarini, L. y Laurenzi Tabasso, M. (1986). *Il restauro della pietra*. Ed. Cedam, Padova.
- Lewin, S. (1989). The susceptibility of calcareous stones to salt decay. *1^o Symp. Inter. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo*. Bari (Italy). 59-63.
- Lewin, S.Z. (1981). The mechanism of masonry decay through crystallization. In: S.M. Barkin (Ed.). *Preprints Conservation of Historic Stone Building and Monuments*, Washington. National Academy of Science, Washington, D.C.
- Loretto, M.H. (1984). *Electron beam analysis of materials*. Chapman & Hall, London, 210pp.
- Lowell, S. y Shields, J.E. (1981) Influence of contact angle on hysteresis in mercury porosimetry. *Jour. Coll. Interface Sci.*, 80, 192-196.
- Lucas, A. (1902) In: Evans, I.S. (1969). Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue de géomorphologie dynamique*, n^o4. 155-177.
- Mahan, B.H. (1964). *Elementary chemical thermodynamics*. Amsterdam: W.A. Benjamin, Inc. 155 pp
- Maltese, C. (coordinador) (1973). *Las técnicas artísticas*. Manuales Arte Cátedra. Madrid. 479pp.
- Mamillan, M. (1966). Le mouvement de l'eau dans les murs. *Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics*. Supplement 19 (217), 132-141.
- Martín Ramos J.D. (1990). *Programa de control y análisis del difractorómetro de rayos X*. Dep. Legal M-11719.
- Martín, L., Bello, M.A. y Martín, A. (1992). Accelerated alteration test on the stones used in the Cathedral of Granada (Spain). *7th Inter. Congr. on Deter. and Conserv. of stone*. Vol. 2. 845-850.
- Matteini, M. y Moles, A. (1989). *La chimica nel restauro. I materiali dell' arte pittorica*. Edit. Nardini. 379 pp.
- Mayer, R. (1988). *Materiales y técnicas del arte*. Edit. Hermann Blume, Madrid, 687p.
- McGreevy, J.P. (1981). "Frost and salt" weathering : further experimental results. *Earth Surface Proc. and Landforms*, 7, 475-488.
- McMahon, D.J.; Sandberg, P.; Folliard, K. y Metha, P.K. (1992). Deterioration mechanisms of sodium sulfate. *Int. Congr. on Deter. and Conserv. of Stone*. 705-714.
- Merrifield, M.P. (1967). *Original treatises on the arts of painting*. Dover Publications. New York, 182-257.
- Ministerio de Cultura. (1989). *Fuentes documentales para el estudio de la Restauración de Monumentos en España*. Madrid.
- Montoto, M; Suárez del Río, L. M. y Rodríguez Rey, A. (1987). El empleo de técnicas no destructivas en el estudio de la restauración de monumentos de piedra. *Jornadas sobre restauración de materiales pétreos en monumentos*. 17p. Madrid.
- Moreno Olmedo, M^a A. 1994. *Catálogo del Archivo histórico de la Alhambra*. Junta de Andalucía - Patronato de la Alhambra y Generalife. Granada.

- Mortensen, H. (1933) In: Auger, F. (1989). World limestone decay under marine spray conditions. 1º *Simp. Inter. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo*. Bari. 65-69.
- Nabarro, F. y Jackson, P. (1958). Growth of crystal whiskers.-Growth and perfection of crystal. *Int. Conf. Crystal Growth*. Cooperstown, 13-101.
- Navagero, A. (1524-1526). *Viaje por España*. Traducido y anotado por Antonio M^a Fabié. Ed. Turner, S.A. Madrid, 1983.
- Navarrete Aguilera, C. (1989). *Metodología en un trabajo de restauración: Portada de La Casa de Castril*. Monográfica Arte y Arqueología. Univ. Granada, 121p.
- Nichols, R.L. (1953). In: Evans, I.S. (1969). Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue de géomorphologie dynamique*, nº4. 155-177.
- Nieto García, F.; López Galindo, A. y Peinado Fenoll, E. (1989). *Manual del usuario para los programas de utilización del difractor de rayos X*. Universidad de Granada. D.L. GR.132/1989.
- NORMAL 4/80 CNR-ICR (1980). *Distribuzione del volumen dei pori in funzione del loro diametro*. Roma, 10pp.
- NORMAL 22/86 CNR-IC (1987). *Misura della velocità di propagazione del suono*. Roma 7pp.
- NORMAL 1/88 CNR-IC (1980). *Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico. Raccomandazioni* Roma, 8pp
- Núñez, R.; Capel, J.; Delgado, R. y Crespo, P-V. (1992) *EUREM 92*, 793-794.
- Ollier, C. (1984). Weathering. In: *Geomorphology texts*. Clayton R.M. Edit. Logman. London. 270.
- Ordaz, J. y Esbert, R.M. (1988). Glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción. *Materiales de Construcción*, Vol. 38, nº209. 39-45.
- Ordúñez, Bartolomé. (1941). *Las águilas del Renacimiento español: Diego Siloé, Pedro Machuca, Alonso Berruguete*. Instituto Diego Velazquez, CSIC. Madrid.
- Ortega Andrade, J. (1989). *Patología de la construcción. Humedades en la edificación*. Editan, S.A. Sevilla. 237pp.
- Paniagua, J.R. (1990). *Vocabulario básico de arquitectura*, 339p.
- Pauly, P.J. (1972). Les procédés de simulation et leurs rapports avec les phénomènes naturels. *Les colloque international sur la détérioration des pierres en oeuvre*. La Rochelle. 131-136.
- Pedro G. (1957). Mécanisme de la désagrégation du granite et de la lave de Volvic, sous l'influence des sels de crystallization. *C.R. Acad. Sci. Paris*. 245, 3, 333-335.
- Peltier, L. (1950). The geographic cycle in periglacial regions as ots related to climatic geomotphology. *Ann. Assoc. Am. Geol.* 40, 214-236.
- Pleanderleith, H.J. (1956). In: Evans, I.S. (1969). Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue de géomorphologie dynamique*, nº4. 155-177.
- Plesters, J. (1956). Cross-section and chemical analysisi of paint samples. *Studies in Conservation*, 1, 110-157.
- Plesters, J. y Lazzarini, L. (1976). *Preliminary observations on the technique and materials of Tintoretto. Conservation and restoration of pictorial art*. Ed. Butterworths.
- Potts, P.J.; Bowles, J.F.W.; Reed, S.J.B. y Cave, M.R. (1995). *Microprobe techniques in the earth Science*. The mineralogical Society Series, 6. Edit. Chapman & Hall. London. 419pp.
- Price, C. B. y Brimblecombe, P. (1994). Preventing salt damage in porous materials. In: *Prepints of the III Cong. on Preventive Conserv. Practice, theory and research*, 90-93.
- Pühringer, J. (1983). *Salt desintegration. Salt migration and degradation by salt - a hypothesis*. Swedish Council for Building research, Stockholm, 159p.
- Punuru, A.R.; Chowdhury, A.N.; Kulshreshtha, N.P. y Gaur, K.L. (1990). Control of porosity on durability of limestone at the Great Sphnix, Egipt. *Environ Geol. Water Sci*. Vol. 15, Nº3, 225-232.
- Rao, S.M.; Brinker, J. y Ross, T. (1996). Environmental microscopy in stone conservation. *Scanning*, 18, 508-514.

- RILEM MR 1-21, (1982). *Méthodes d'essai des mortiers et enduits*. Ed. Gauthier-Villars, Paris, 24pp.
- Ritter, H.I. y Drake, L.C. (1945). Pore-size distribution in porous materials, pressure porosimeter and determination of complete macropore-size distribution. *Indust. and Engin. Chem. Analytical Edition*, 17, 782-786.
- Rodríguez Gallego, M., Martín Pozas, J.M. y Martín Vivaldi, J.L. (1969). Análisis cuantitativo de filosilicatos de la arcilla por difracción de rayos X. Influencia de las sustituciones isomórficas y cristalinidad. *Ann R. Soc. Esp. Fis. Quim.* 65, 25-29.
- Rodríguez Gordillo, J; Navarrete Aguilera, C. y Gárate Rojas, I. (1990). Estudio de materiales, procesos de alteración y metodología restauradora en la portada de La Casa de Castril (Museo Arqueológico de Granada). *Bol. Soc. Esp. Min.* 3, 115-121.
- Rodríguez Navarro, C. (1994). *Causas y mecanismos de alteración de los materiales calcáreos de las catedrales de Granada y Jaén*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 442 pp.
- Rodríguez Navarro, C.; Sebastián, E.; Zezza, U.; De la Torre M. J. y Cardell Fernández, C. (1991). Caracterización mineralógica y petrofísica de los materiales biocalcareníicos utilizados en la construcción de monumentos históricos de Granada. *Bol. Soc. Esp. Min.* 14-1, 25-26.
- Rodríguez Navarro, C. y Sabastián Pardo, E. (1992). *EUREM* 92, 799-800.
- Rodríguez Navarro, C.; Cardell Fernández, C.; García Ruiz, J.M. y Rodríguez Gordillo, J. (1993). Experimental study of salting out processes on biocalcarenite. *III Reunión Nacional de Crecimiento Cristalino*. 23.
- Rodríguez Navarro, C. y Sebastián Pardo, E. (1996). Role of particulate matter from vehicle on porous building (limestone) sulfation. *The Science of the Total Environment* 187, 79-91.
- Rodríguez Navarro, C.; Dohene, E. y Ginnell, W.S. (1996). Salt growth in capillary and porous media. *Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*. Granada, 509-514.
- Rosenthal, E. (1966). *Diego Siloé, arquitecto de la Catedral de Granada*. Dpto. de Historia del Arte. Granada.
- Rosenthal, E. (1990). *La Catedral de Granada*. Monográfica Arte y Arqueología. Univ. de Granada, Servicio de Publicaciones, 328.
- Ross, M. y McGee, E. (1989). Chemical and mineralogical effects of acid deposition on Shelburne Marble and Salem Limestone test samples placed at four NAPAP weather-monitoring sites. *Am. Min.* 74, 367-383.
- Rossi-Doria, P. (1985). Il problema della porosità in rapporto al degrado ed alla conservazione dei materiali lapidei. *Bolletino d'Arte*. Materiali Lapidari, I. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato. Licreria dello Stato. Ed. Roma. 11-14.
- Rossi-Manaresi, R. (1987). Considerazioni tecniche sulla scultura monumentale policromata, romanica e gotica. *Bolletino d'arte*. Supplemento nº41. Vol. II, 173-186. Ministero per i beni culturali e ambientali.
- Rossi-Manaresi, R. (1992). SEM examination in stone and painting conservation. *EUREM* 92. 2,771-772. Granada.
- Rossi-Manaresi, R. y Ghezzi, C. (1978). The biocalcarenite of the Agrigento Greek Temples: causes of alteration and effectiveness of conservation treatments. *Sym. Inter. Deter. and Protect. of stone monuments*. Paris, 1-31.
- Rossi-Manaresi, R. y Tucci, A. (1983). Ultrasonic test for the evaluation of the effectiveness of sandstone consolidation. *1ª Confer. Inter. Le prove non distruttive nella conservazione delle Opere d'arte*. III/11.1-III/11-15. Roma.
- Rossi-Manaresi, R. y Tucci, A. (1985). SEM examination of a biocalcarenite treated with acrylic polymers, silane or silicone resins. *Vth Int. Congr. Det. Cons. Stone*. Lausanne, 2, 871-880.
- Rossi-Manaresi, R. y Tucci, A. (1989). Pore structure and salt crystallization: "salt decay" of Agrigento biocalcarenite and "case hardening" in sandstone. *1º Symp. Inter. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo*. Bari. 97-100.

- Rossi-Manaresi, R. y Tucci, A. (1991). Pore structure and the disruptive or cementing effect of salt crystallization in various types of stone. *Studies in Conservation*, 36, 44-52.
- RR. MM. Jerónimas. Folleto informativo del Monasterio de San Jerónimo de Granada. C/. Rector López Argüeta, 9. Granada.
- Sabbioni, C. (1992) Characterization of atmospheric particles on monuments by scanning microscopy energy dispersive X ray analyses. *Electron Microscopy*, 2, 773-7
- Sánchez Navas, A.; Cardell Fernández, C. y García Ruiz, J.M. (1992). Conservational study of ornamental tiles of the "Hospital de San Juan de Dios" Cloister (Granada, Spain). *7th Int. Congr. on Deter. and Conserv. of stone*. Lisbon (Portugal), 3, 1527-1535.
- Sebastián, E.; Rodríguez Gordillo, J.; Soriano, J.; Velilla, N.; Navarrete, C. y Zezza, U. (1989). Studio dei materiali, processi di degrado e proposte di restauro nel "Patio de la Capilla" (Hospital Real, Granada, España). In: *Mineralogia applicata: problemi, progressi e prospettive Societa'italiana di mineralogia e petrologia. Congr. Ann. Padova, Italy*, 75-76.
- Sebastián, E.; Zezza, U.; Rodríguez Navarro, C.; De la Torre M. J. y Cardell Fernández, C. (1992). La piedra franca (biocalcarenita) en la construcción de monumentos históricos de Granada (España). *I Congr. Inter. Rehab. del Patrim. Arquitect. y Edificación*, 328-336.
- Sigüenza, Fray Luis. (1909). *Historia de la Orden de San Jerónimo*. 2^a ed. Libro I, tomo II, cap. X, 45. Madrid.
- Smith, B.J. y McGreevy, J.P. (1983). A simulation study of salt weathering in hot desert. *Geografiska Annaler*, 65A, 127-133.
- Soriano, J. (1996). Aplicación de la microscopía electrónica de barrido al estudio de la durabilidad de morteros y hormigones. En: *Técnicas de diagnóstico aplicadas a la conservación de los materiales de construcción en los edificios históricos*. Cuadernos técnicos. I.A.P.H. Junta de Andalucía.
- Soriano, J. (1996). Morteros de restauración y morteros de reparación. Tipos y técnicas de estudio. En *Técnicas de diagnóstico aplicadas a la conservación de los materiales de construcción en los edificios históricos*. Cuadernos Técnicos, I.A.P.H. Junta de Andalucía. 72-77.
- Soriano, J.; Riesgo, L. y De la Peña Quevedo, C. (1984). Influencia de la naturaleza de los áridos en el comportamiento del hormigón. *I Congr. Esp. Geol.* Tomo II, 959-969.
- Southworth. H.N. (1975). Scanning electron microscopy and microanalysis. In: *Physicochemical methods of mineral analysis*. Nicol, AW. Edit. Plenum Press, New York, 421-450.
- Sperling, C.H.B. y Cooke, R.U. (1985). Laboratory simulation of rock weathering by salt crystallization and hydration processes in hot, arid environments. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol 10, 541-555.
- Stambolov, T. (1976). The corrosive action of salts. *Lithoclastia* 1, 5-8.
- Sunagawa, I. (1981). Characteristics of crystal growth in nature as seen from the morphology of mineral crystal. *Bull. Min.* 104, 81-87.
- Tavira, P. y Amorós, J.L. (1980). Crecimiento de triquitos sobre sustrato poroso. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Geol.)*, 78, 189-200.
- Thompson, B.R. y Thompson, D.O. (1985). Ultrasonic in non destructive evaluation. *Proc. IEEE*, 1716-1755.
- Tite, M.S. y Maniatis, Y. (1975). Examination of ancient pottery using the scanning electron microscope. *Nature*, 257, 122-123.
- Tourenq, C; Fourmaintraux, D. y Denis, A. (1971). Propagation des ondes et discontinuités des roches. *Proc. Int. Soc. Rock Mech.*, I-1, 15p. Nancy.
- UNE 83-308-86 (1986). *Ensayos de hormigón. Determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos*. 12p.
- Valdeón, L.; King, M.S. y Freitas, M, H. (1992). Ultrasonic methods for quantifying the degradation of building stones. *7th Int. Congr. on Deter. and Conserv. of stone*. 2, 697-704.
- Van Grieken, R. y Fobe, B. (1990). Advanced micro-analytical techniques for the study of material deterioration. In: *Advanced Workshop. "Analytical Methodologies for the*

- Investigation of Damaged Stone*". Pavia (Italy). 13pp.
- Vázquez, M.A., Galán, E. y Alcalde, M. (1987). The Cathedral of Cadiz: deterioration state. *6th Meeting of the European Clay Groups*, Sevilla, Soc. Esp. Arc. 49-52.
- Veniale, F. y Zezza, U. (1988). Nuove indagini sull' arenaria della Basilica di San Michele in Pavia. *Atti. Ticinensi de Science della Terra*, 31, 253-268.
- Washburn, E.W. (1921). Note on a method of determining the distribution of pore size in a porous material. *Proc. Natt. Acad. Science. US*, 7, 115-116.
- Weinert, H.H. y Clauss, K.A. (1967). In: Evans, I.S. (1969). Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue de géomorphologie dynamique*, n°4. 155-177.
- Wellman, H.W. y Wilson, A.T. (1965). Salt weathering a neglected geological erosive agent in coastal and arid environments. *Nature* 205 (4976), 1097-10989.
- Wendler, E; Klemm, D.D. y Snethlage, r. (1990). Contour scaling on building facades. Dependence on stone type and environmental conditions. In: *Advanced workshop: "Analytical methodologies for the investigation of damaged stones"*. Pavia (Italy), 1-7.
- White, J.C. (1987). Short course in application of electron microscopy in the Earth Science. *Miner. Assoc. Canada*, 11. 213pp.
- Wilhelmy, H. (1964). Cavernous rock surfaces (tafoni) in semiarid and arid climates: Pakistan. *Geogr. Rev.* 19 (2) 9-13.
- Wilkinson, L. (1990). SYSTAT. *The system for statistics*. Evanston, II. SYSTAT Inc.
- Winkler, E.M. (1965). Weathering rates as exemplified by Cleopatra's Needle in New York City. *J. Geol. Education* 13, 50-52.
- Winkler, E. M. (1973). *Stone: properties, durability in man's environment*. Springer-Verlag, New York. 230p.
- Winkler, E.M. (1979). Effect of the case hardening in stone. *2nd Int. Cong. on Deter. and Conserv. of Stone*. Venice, 1, 55-63.
- Winkler, E.M. y Wilhelm, E.J. (1970). Salt burst by hydration pressures in architectural stone in urban atmosphere. *Geol. Soc. of Amer. Bull.* 81, 567-572.
- Winkler, E. y Singer, P. (1972). Crystallization pressure of salts in stone and concrete. *Geol. Soc. of Amer. Bull.*, 83, 3509-3514.
- Winter, J. (1983). The characterization of pigments based on carbon. *Studies in Conservation*, 28-2, 49-66.
- Zehnder, K. (1979). Weathering of molasse sandstones on monuments and natural outcrops. *3rd Int. Congr. on the Deter. and Preserv. of Stones*. Venezia. 91-105.
- Zehnder, K. (1982). Verwitterung von molassensandsteinen au bauwerken mird in naturaufschlüssen. *Beitr. Geol. Schweiz-Geotechn*, 61, 130p.
- Zehnder, K. y Arnold, A. (1988). New experiments on salt crystallization. *6th Int. Congr. on Deter. and Conserv. of Stone*. Torun. 320-329.
- Zehnder, K y Arnold, A. (1989). Crystal growth in salt efflorescences. *Journal of Crystal growth*. 97, 513-521.
- Zeza, F. (1981). *The weathering of the limestone of Trani Cathedral*. The conservation of stone, II Bologna, 315-332.
- Zeza, U. (1990). Physicalmechanical properties of quarry and building stones. In: *Advanced workshop "Analytical methodologies for the investigation of damaged stones"*. Pavia (Italy), 1-21.
- Zeza, U.; Previde, E.; Massa, V. y Venchiarutti, D. (1985). Effect of temperature on intergranular descohesion of the marbles. *7th Int. Congr. on Deter. and Conserv. of Stone*. Lausanne. Vol. 1, 131-140.

*Anexo I: Relación de Muestras
extraídas de la Iglesia del
Monasterio de San Jerónimo,
Hospital de San Juan de Dios e
Iglesia del Perpetuo Socorro*

CALCARENITAS (San Jerónimo)

Exterior de la Iglesia

#	Descripción	Situación
SJC40	Superficie ennegrecida.	Zona baja fachada NW.
SJC41	Idem.	Idem.
SJC23	Con eflorescencias.	Idem.
SJC19	Superficie ennegrecida.	Zona baja fachada E.
SJC22	Idem.	Idem.
SJC21	Arenización.	Idem.
SJC18	Bajo grado alteración.	Idem.
SJC1	Idem.	Zona baja fachada SE.
SJC1A	Calcarenita desprendida.	Idem.
SJA1	Idem.	Zona alta fachada SE.
SJA2	Idem.	Idem.
SJA3	Idem.	Idem.
SJA4	Idem.	Idem.
SJA5	Idem.	Idem.
SJA6	Idem.	Idem.
SJA7	Idem.	Idem.
SJA8	Idem.	Idem.
SJC14	Grado medio alteración.	NW cimborrio.
SJC15	Idem.	Idem.
SJC16	Idem.	Idem.
SJC3	Idem.	E del cimborrio.
SJC4	Idem.	Idem.
SJC5	Idem.	Idem.
SJC6	Superficie ennegrecida.	1ª cornisa fachada SE.
SJC7	Idem.	Idem.
SJC8	Idem.	Idem.
SJC9	Idem.	Idem.
SJC11	Idem.	Idem.
SJC12	Idem.	Idem.
SJC13	Idem.	Idem.
SJC17	Idem.	Idem.
SJC2	Idem.	SW del cimborrio.
SJC4	Idem.	Idem.

Interior Iglesia

#	Descripción	Situación
<i>Habitación E</i>		
SJC27	Alto grado alteración.	Sillar bajo balaustrada E.
<i>Habitación W</i>		
SJC25	Con eflorescencias.	Acceso habitación.
<i>Altar</i>		
SJC39	Grado medio alteración.	Altar E.
SJC33	Arenización.	Idem.
<i>Retablo E</i>		
SJC31	Bien conservada.	Sillar bajo escultura I.
SJC32	Idem. Con enlucido.	Festón bajo escultura I.
SJC30	Muy alterada.	Pie escultura I.
SJCS5	Idem.	Manto escultura I.
<i>Retablo W</i>		
SJC28	Con eflorescencias.	Trozo desprendido.
SJC29	Idem.	Idem.
SJC34	Idem.	Idem.
SJC35	Idem.	Idem.
SJCS1	Con sales.	Pared hornacina escultura VI.
SJCS2	Idem.	Sillar bajo escultura VI.
SJC37	Idem	Hornacina escultura IV.

MORTEROS (San Jerónimo)

Exterior Iglesia

#	Descripción	Situación
SJM4	Mortero unión original gris.	Zona baja fachada NW.
SJM5	Idem.	Idem.
SJM6	Idem.	Idem.
SJM7	Idem.	Idem.
SJM85	Idem.	Idem.
SJM80	Mortero unión original.	Zona baja fachada SE.
SJM20	Mortero unión original gris. Alteración avanzada.	Zona baja fachada E.
SJM16	Idem.	Idem.
SJM9	Idem. Grado medio alteración.	Idem.
SJM10	Idem.	Idem.

SJM13	Idem.	Idem.
SJM15	Idem.	Idem.
SJM11	Idem. Con pátina negra.	Idem.
SJM14	Idem.	Idem.
SJM1	Enlucido beige sobre mortero unión.	Idem.
SJM2	Idem.	Idem.
SJM3	Idem.	Idem.
SJM8	Idem.	Idem.
SJM12	Idem.	Idem.

Interior Iglesia

#	Descripción	Situación
<i>Habitación E</i>		
SJM64	Mortero unión original.	Baldosas suelo.
SJM62	Mortero unión original entre sillares de calcarenita.	Idem.
SJM63	Idem.	Idem.
SJM68	Mortero unión original entre losas de mármol.	Escalinata E.
SJM40	Enlucido beige (interior rojo).	Acceso habitación.
SJM36	Revoco gris oscuro.	Pared S de habitación.
SJM65	Idem.	Idem.
SJM66	Idem.	Idem.
SJM18	Enlucido gris fino.	Pared E de habitación.
SJM17	Revoco rojizo.	Idem.
SJM20	Idem.	Idem.
SJM38	Idem.	Idem.
SJM67	Idem.	Idem.
SJM37	Enlucido blanco fino.	Idem.
SJM39	Enlucido gris claro.	Idem.
<i>Habitación W</i>		
SJM53	Mortero unión gris entre sillares calcarenita. No original.	Pared S.
SJM34	Mortero unión original entre calcarenitas.	Acceso habitación.
SJM61	Idem.	Idem.
SJM71	Mortero unión original entre losas de mármol.	Escalinata W.
SJM72	Revestimiento gris sobre SJM71. No original.	Idem.
SJM27B	Revoco beige. Textura fina. Espesor (E) = 8mm.	Medallón.
SJM27G	Enlucido gris claro sobre SJM27B.	Idem.
SJM28B	Revoco beige. Textura fina.	Pared E.
SJM28G	Enlucido gris claro sobre SJM28B	Idem.

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

SJM33B	Revoco beige.	Acceso habitación.
SJM33A	enlucido gris claro sobre SJM33B	Idem.
SJM35	Revoco beige. Textura fina.	Idem.
SJM31	Revoco gris oscuro. No original.	Pared W.
SJM30	Enlucido gris claro del anterior. No original.	Idem.
SJM26	Enlucido gris claro. No original.	Pared E.
SJM29	Idem.	Pared W.
SJM32	Idem.	Idem.
Altar		
SJM21	Mortero unión original gris claro	Altar E.
SJM60	Idem.	Idem.
SJM47	Revoco beige, muy alterado.	Idem.
SJM59	Revoco ocre rojizo sobre SJM47.	Idem.
SJM48	Revoco gris oscuro, con eflorescencias.	Idem.
SJM73	Idem.	Idem.
SJM49	Revoco gris oscuro sobre SJM48.	Idem.
SJM50	Mortero unión original.	Altar W.
SJM74	Revoco gris con eflorescencias.	Idem.
SJM75	Idem.	Idem.
SJM51	Revoco beige-marrón muy alterado.	Idem.
SJM76	Enlucido beige.	Idem.
SJM77	Idem.	Idem.
Retablo E		
SJM84	Enlucido beige	Muro entre esculturas II y III.
SJM44	Mortero unión original alterado.	Bajo escultura II.
SJM45	Revoco del anterior.	Idem.
SJM58	Mortero beige.	Trozo caído.
SJM82	Revoco ocre oscuro, alterado.	Hornacina escultura I.
SJM83	Enlucido beige sobre calcarenita	Bajo escultura II.
Retablo W		
SJM81	Revoco ocre oscuro muy alterado.	Hornacina escultura IV
SJM46	Revoco ocre claro, muy alterado.	Idem.
SJM55	Revoco beige.	Trozo caído.
SJM57	Idem.	Idem.
SJM41	Revestimiento gris no original.	Idem.
SJM42	Revestimiento beige sobre calcarenita.	Sillar bajo escultura VI.
SJM43	Mortero unión calcarenita. Bien conservado.	Retablo central.
SJM54	Revoco beige bien conservado.	Idem.

SALES (San Jerónimo)**Interior Iglesia**

#	Descripción	Situación
<i>Habitación E</i>		
SJS11	Eflorescencia pulverulenta traslúcida.	Entre baldosas suelo.
SJS12	Idem.	Idem.
SJS31	Idem.	Idem.
SJS66	Idem.	Idem.
SJS113	Idem.	Idem.
SJS10	Idem. Opaca.	Pared E. Altura (h) = 20cm.
SJS30	Idem.	Idem.
SJS67	Subeflorescencia cristalina.	Idem. h = 50cm.
SJS70	Costra cristalina dura.	Sobre SJM17. Pared E. h = 30cm.
SJS71	Idem.	Sobre SJM18. Pared E. h = 50cm.
SJS72	Eflorescencia pulverulenta cristalina.	Pared E. h = 80cm.
SJS7	Costra dura, opaca. E = 2-3cm.	Pared S. h = 1m.
SJS73	Idem.	Idem. Sobre SJM36. h = 1.9m.
SJS114	Costra y eflor. pulverulenta cristalina.	Idem. h = 1m.
SJS115	Idem.	Idem. h = 1m.
SJS62	Eflorescencia pulverulenta traslúcida.	Tapiza policromía acceso habitación. h = 1.4m.
SJS85	Idem.	Idem. h = 50cm.
SJS86	Idem. Cristalina.	Idem. h = 85cm.
SJS63	Eflor. pulverulenta traslúcida.	Idem. h = 1.4m.
SJS64	Idem.	Idem. h = 1.5m.
SJS65	Idem.	Idem. h = 7cm.
SJS60	Idem.	Idem. h = 20cm.
SJS116	Idem cristalina.	Idem. h = 1.3m.
SJS117	Idem.	Idem. h = 50cm.
SJS61	Idem opaca.	Entre losas mármol. Escalinata altar. Orientación E. h = 1.5m.
SJS57	Idem.	1ª capilla zona E. h = 30cm.
SJS58	Idem.	Idem. h = 20cm.
SJS90	Idem.	Idem. h = 25cm.
<i>Habitación W</i>		
SJS15	Subeflor. pulverulenta cristalina.	Sobre mortero unión calcarenita, acceso habt. h = 85cm.
SJS13	Idem. traslúcida.	Entrada habt. h = 35cm.
SJS108	Idem. opaca.	Bajo SJM27. h = 70cm.

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

SJS16	Costra traslúcida	Sobre revoco gris oscuro. h = 20cm.
SJS33	Subeflor. pulverulenta traslúcida	Idem. h = 75cm.
SJS87	Eflor. pulverulenta cristalina.	Idem. h = 50cm.
SJS106	Idem.	Sobre SJM30. h = 10cm.
SJS107	Costra cristalina.	Sobre SJM31. h = 30cm.
SJS32	Eflor. pulverulenta cristalina.	Sobre SJM29. h = 20cm.
SJS14	Idem.	Idem. h = 5cm.
SJS84	Idem.	Idem. h = 10cm.
SJS82	Costra fina cristalina muy adherida al sustrato.	Idem. h = 1.8m.
SJS83	Idem.	Sobre SJM28. h = 1.7m.
SJS104	Eflor. pulverulenta cristalina.	Idem. h = 1.5cm.
SJS105	Idem.	Idem. h = 10cm.
SJS119	Costra cristalina.	Idem. h = 2m.
Altar E		
SJS118	Costra fina opaca, dura, frágil.	H = 40cm.
SJS75	Idem.	Idem. sobre ladrillo. h = 50cm.
SJS74	Eflor. pulverulenta cristalina.	Idem. sobre SJM48. h = 50cm.
SJS76	Idem.	Idem. h = 75cm.
SJS19	Eflor. y costra cristalina muy duras, adheridas al sustrato.	Idem. h = 50cm.
SJS111	Costra dura.	Idem. sobre SJM49. h = 30cm.
SJS112	Eflor. pulverulenta.	Idem. h = 75cm.
Altar W		
SJS17	Idem. cristalina.	Sobre mortero unión. h = 25cm.
SJS81	Idem.	Idem. h = 20cm.
SJS89	Idem. traslúcida.	Idem. h = 25cm.
SJS77	Idem.	Sobre SJM51. h = 30cm.
SJS18	Idem.	Sobre sillar. h = 30cm.
SJS80	Idem. cristalina.	Idem. sobre sillar. h = 25cm.
SJS88	Idem. traslúcida.	Idem. h = 60cm.
SJS109	Idem. opaca.	Idem. h = 20cm.
SJS78	Idem.	Idem. sobre SJM74. h = 10cm.
SJS79	Idem.	Idem. h = 20cm.
SJS110	Idem.	Idem. h = 10cm.
Retablo E		
SJS5	Eflor. pulverulenta traslúcida.	Base hornacina escultura I.
SJS6	Idem.	Base hornacina escultura II.
SJS9	Idem.	Base hornacina escultura III.
SJS36	Subeflor. pulverulenta cristalina.	Hornacina escultura II.
SJS51	Eflor. pulverulenta cristalina.	Sillar bajo escultura II.

SJS52	Idem.	Idem.
SJS53	Idem.	Pie escultura I.
SJS100	Idem.	Festón bajo escultura I.
SJS103	Idem.	Pie escultura I.
SJS37	Subeflor. pulverulenta cristalina.	Hornacina escultura III.
SJS38	Idem.	Idem.
SJS39	Idem.	Columna entre esculturas II y III
SJS40	Idem.	Pie escultura II.
SJS41	Idem.	Manto escultura II.
SJS42	Idem.	Idem.
SJS43	Idem.	Hornacina escultura I.
SJS44	Idem.	Idem.
SJS45	Idem.	Festón bajo escultura I.
SJS46	Idem.	Sillar bajo escultura I.
SJS47	Idem.	Mortero unión sillares bajo escultura I y II.
SJS48	Idem.	Festón bajo escultura II.
SJS49	Idem.	Sillar bajo escultura II.
SJS50	Idem.	Sillar bajo escultura III.
Retablo W		
SJS24	Subeflor. pulverulenta traslúcida	Festón bajo escultura VI.
SJS25	Eflor. pulverulenta cristalina.	Sillar bajo escultura VI.
SJS3	Idem. opaca.	Idem.
SJS26	Idem. traslúcida.	Sillar bajo escultura V.
SJS8	Eflor. y costra cristalina.	Idem.
SJS27	Eflor. pulverulenta traslúcida.	Sillar bajo escultura IV.
SJS28	Idem.	Sillar esquina retablo central y W.
SJS20	Subeflor. pulverulenta cristalina	Columna escultura VI.
SJS22	Idem.	Pared hornacina escultura VI.
SJS1	Eflor. pulverulenta opaca.	Idem.
SJS23	Subeflor. pulverulenta traslúcida	Idem.
SJS29	Idem.	Pared hornacina escultura IV.
SJS4	Eflor. pulverulenta opaca.	Repisa hornacina escultura IV.
SJS101	Idem. traslúcida.	Idem.
SJS102	Eflor. dura opaca.	Idem.
SJS21	Eflor. pulverulenta traslúcida.	Pie escultura V.
SJS34	Subeflor. pulverulenta traslúcida	Faldón escultura V.
SJS2	Eflor. pulverulenta traslúcida.	Hornacina escultura V.

OTROS MATERIALES (San Jerónimo)

Exterior Iglesia

#	Descripción	Situación
<i>SJT1</i>	Travertino bien conservado.	Zona basal fachada NW.
<i>SJT2</i>	Idem.	Idem.
<i>SJT3</i>	Idem.	Idem.
<i>SJL1</i>	Ladrillo rojizo muy alterado.	Zona basal fachada E.
<i>SJL2</i>	Ladrillo rojizo bien conservado.	Idem.
<i>SJL3</i>	Ladrillo rojo con sales.	Idem.
<i>SJL4</i>	Idem.	Idem.
<i>SJL5</i>	Ladrillo amarillento.	Idem.

Interior Iglesia

#	Descripción	Situación
<i>Habitación E</i>	Policromías (color en superficie)	
<i>SJEP22</i>	Gris oscuro	Acceso habitación.
<i>SJEP23</i>	Verde.	Idem.
<i>SJEP24</i>	rojo oscuro.	Idem.
<i>Habitación W</i>	Policromías (color en superficie)	
<i>SJEP27</i>	Gris.	Pared NW.
<i>SJEP30</i>	Gris.	Pared E.
<i>SJEP32</i>	Gris.	Pared W.
<i>Altar</i>		
<i>SJL6</i>	Ladrillo rojo intenso.	Altar E.
<i>Retablo E</i>	Policromías (color en superficie)	
<i>SJEP13</i>	Gris azulado.	Festón bajo escultura III.
<i>SJEP15</i>	Amarillo.	Idem.
<i>SJEP17</i>	Rojo.	Pie escultura I.
<i>Retablo W</i>	Policromías (color en superficie)	
<i>SJEP1</i>	Ocre muy oscuro.	Hornacina escultura VI.
<i>SJEP2</i>	Dorado.	Idem.
<i>SJEP3</i>	Rojo.	Festón bajo escultura VI.
<i>SJEP5</i>	Gris.	Idem.
<i>SJEP6</i>	Gris.	Pie escultura V.
<i>SJEP7</i>	Azul celeste.	Festón bajo escultura VI.
<i>SJEP8</i>	Amarillento.	Hornacina escultura IV.
<i>SJEP9</i>	Idem.	Idem.
<i>SJEP10</i>	Gris amarillento.	Sillar bajo escultura IV.
<i>SJEP11</i>	Gris.	Festón bajo escultura IV.

Muestras del Hospital San Juan de Dios

#	Descripción	Situación : 2° patio.
JDE1	Eflor. pulverulenta traslúcida.	Vena caliza gris. Pared E.
JDE2	Idem.	Pared E.
JDE3	Idem.	Pared N.
JDE4	Idem.	Pared N.
JDE5	Idem.	Pared W.

Muestras de la Iglesia del Perpetuo Socorro

#	Descripción	Situación
PSE1	Eflor. dura, muy adherida a pared.	Calcarenita original pared E. h = 20cm.
PSE2	Subeflor. pulverulenta.	Entre sillar y revoco. Pared N.
PSE3	Idem.	Idem.
PSE4	Eflor. pulverulenta.	Calcarenita original. Pared N.
PSE5	Subeflor. pulverulenta.	Entre sillar y revoco. Pared N.
PSE6	Idem.	Idem.
PSE7	Eflor. dura, cristalina, muy adherida pared.	Calcarenita original. Pared S.
PSE8	Eflor. pulverulenta.	Pared W.
PSE9	Idem.	Pared S.
PSE10	Idem.	Idem.
PSE11	Idem.	Idem.
PSC12	Arenización.	Fachada N.

*Anexo II: Espectros EDX de
muestras pictóricas y sales del
Monasterio de San Jerónimo y del
Hospital de San Juan de Dios*

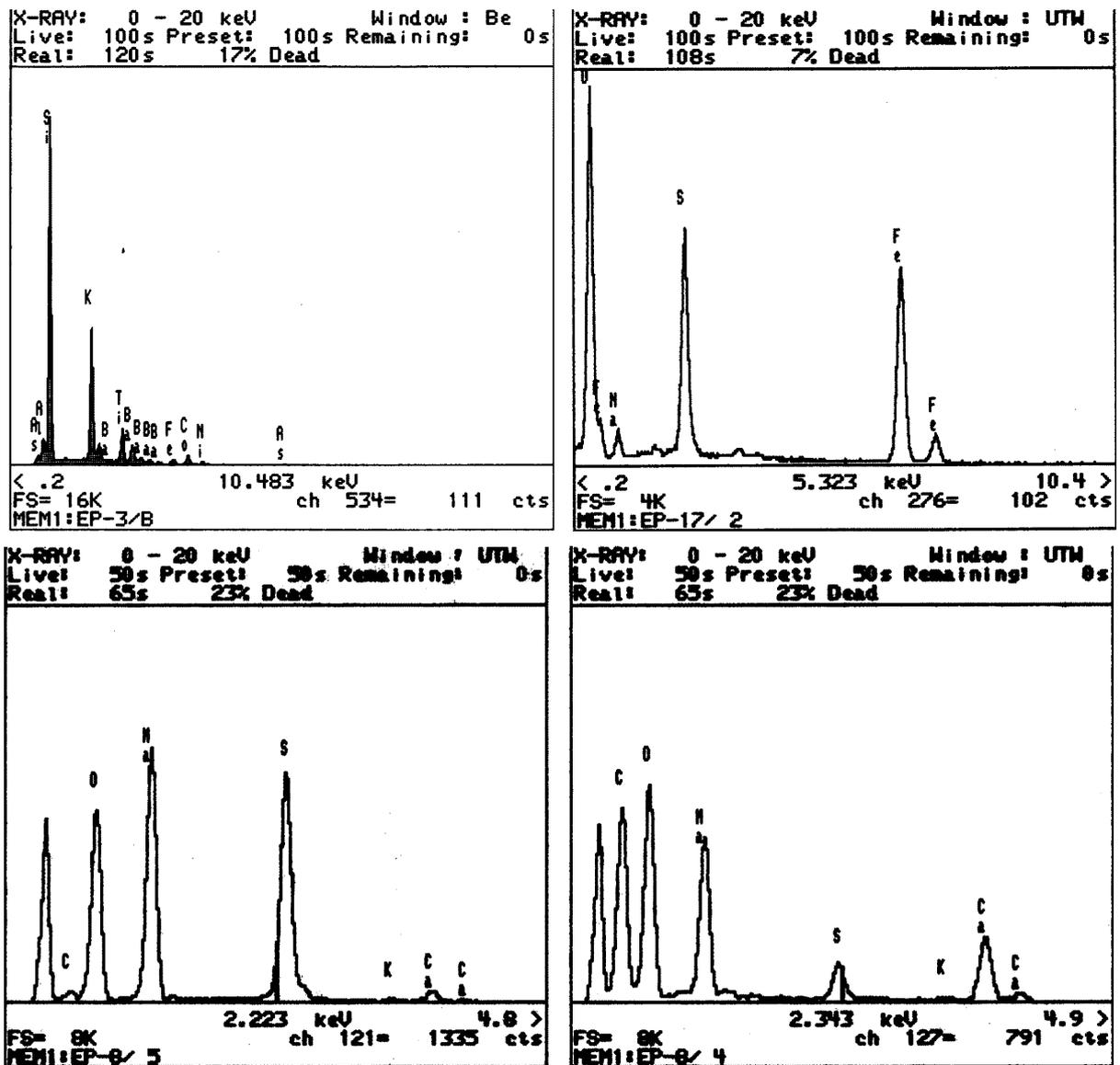


Figura II.1. Espectros de muestras pictóricas (de izquierda a derecha y de arriba a abajo). #1) pigmento "Azul de esmalte" (silicato de cobalto). #2) Sulfato de hierro (producto de alteración). #3) Sales de sulfato de sodio (producto de alteración). #4) Sales de carbonato sódico y sulfato sódico (producto de alteración).

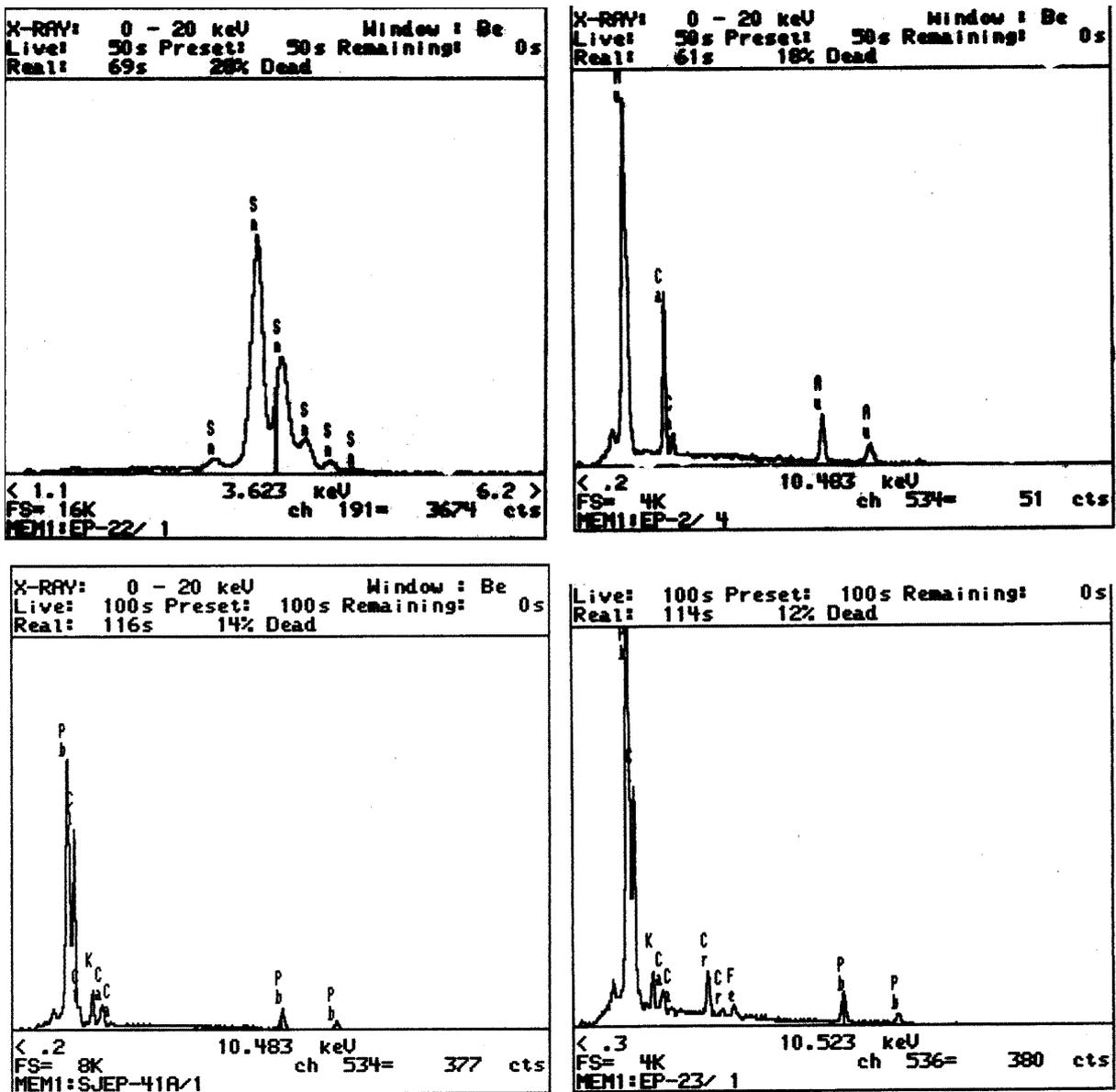


Figura II.2. Espectros de muestras pictóricas (de izquierda a derecha y de arriba a abajo). #5) Estaño (Sn). #6) Oro (Au). #7) Sales de cloruro de plomo (producto de alteración). #8) Cloro, cromo y plomo (producto de reacción entre NaCl y el pigmento "Amarillo de Cromo").

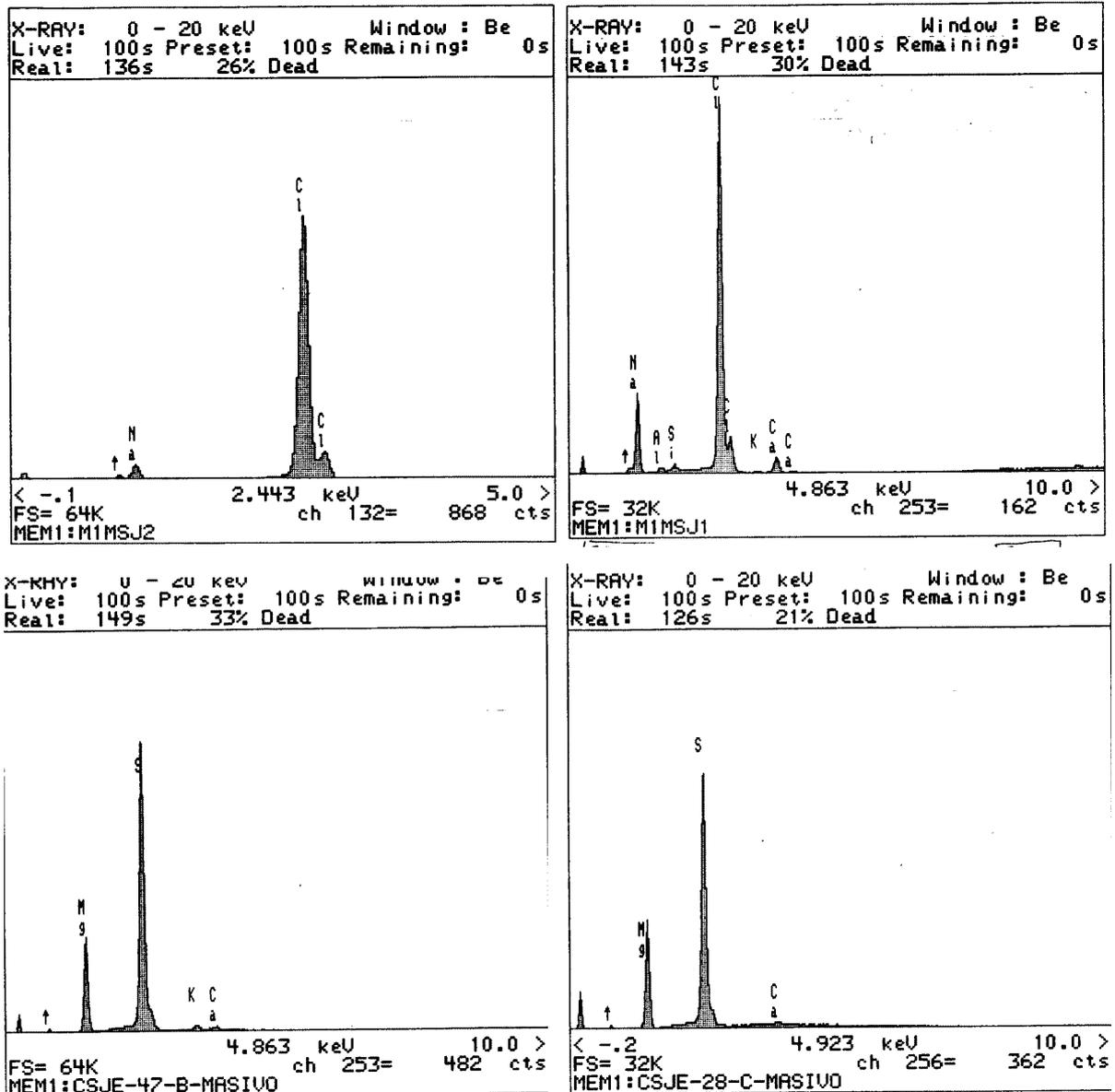


Figura II.3. Espectros de muestras de sales (de izquierda a derecha y de arriba a abajo). #9) Sodio y cloro. #10) Sodio, cloro, potasio y calcio. #11) Magnesio, azufre, potasio y calcio. #12) Magnesio, azufre y calcio.

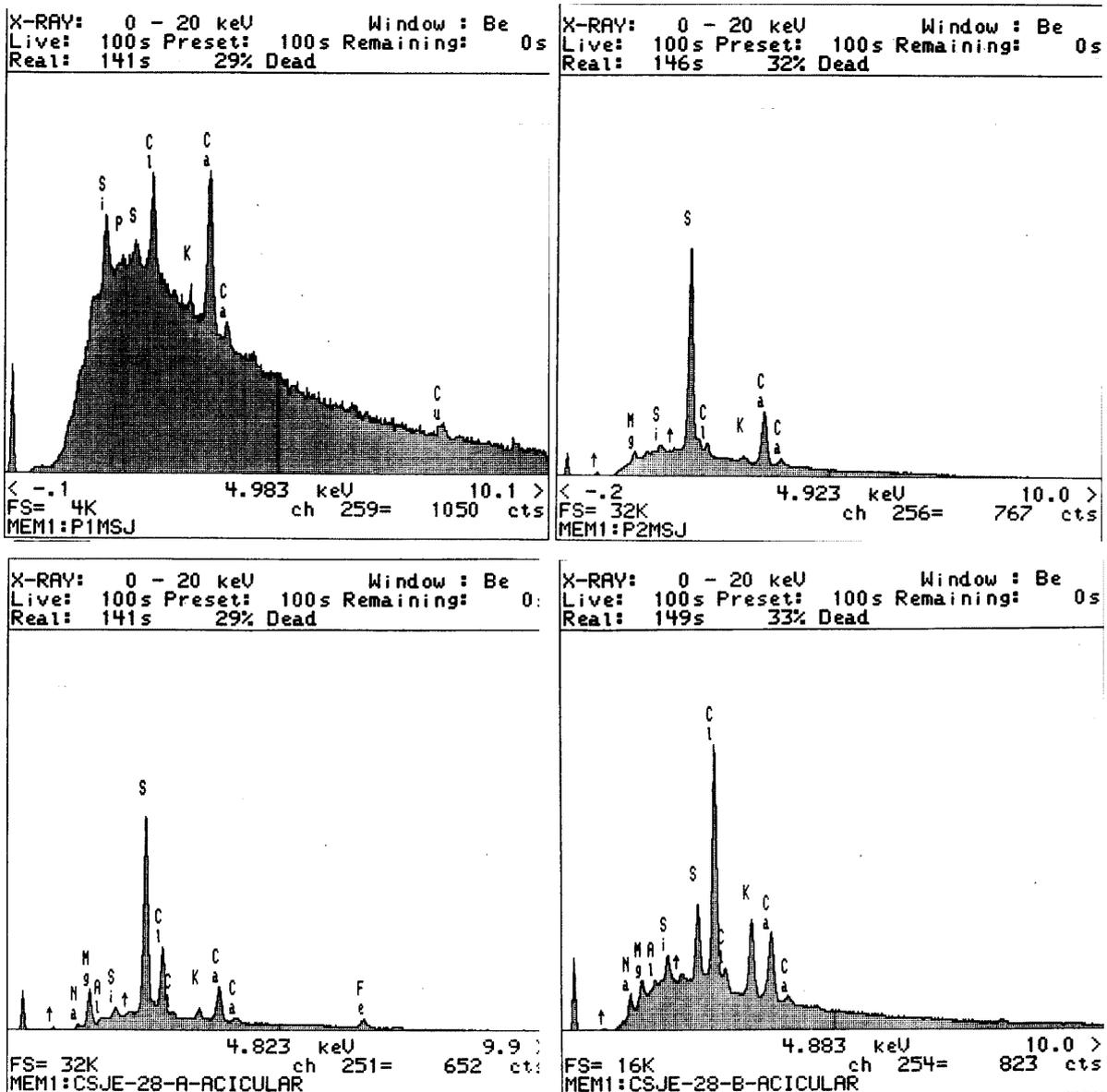


Figura II.4. Espectros de muestras de sales (de izquierda a derecha y de arriba a abajo). #13) Azufre, cloro, potasio y calcio. #14) Magnesio, azufre, cloro, potasio y calcio. #15) Sodio, magnesio, azufre, cloro, potasio y calcio. #16) sodio, magnesio, azufre, cloro, potasio y calcio.

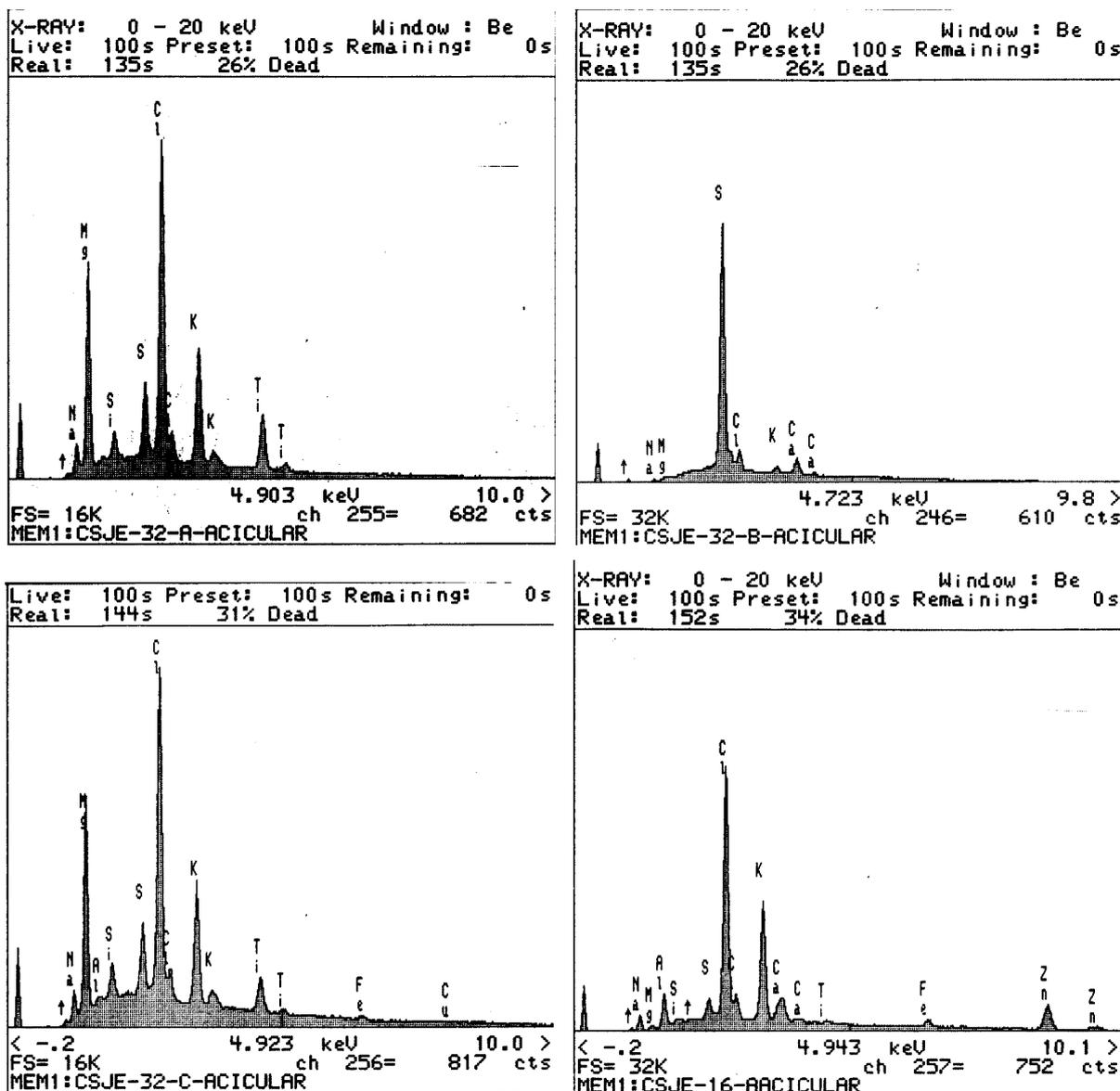


Figura II.5. Espectros de muestras de sales (de izquierda a derecha y de arriba a abajo). #17) Sodio, magnesio, azufre, cloro y potasio. #18) Sodio, magnesio, azufre, cloro, potasio y calcio. #19) Sodio, magnesio, azufre, cloro y potasio. #20) Sodio, magnesio, azufre, cloro, potasio y calcio.

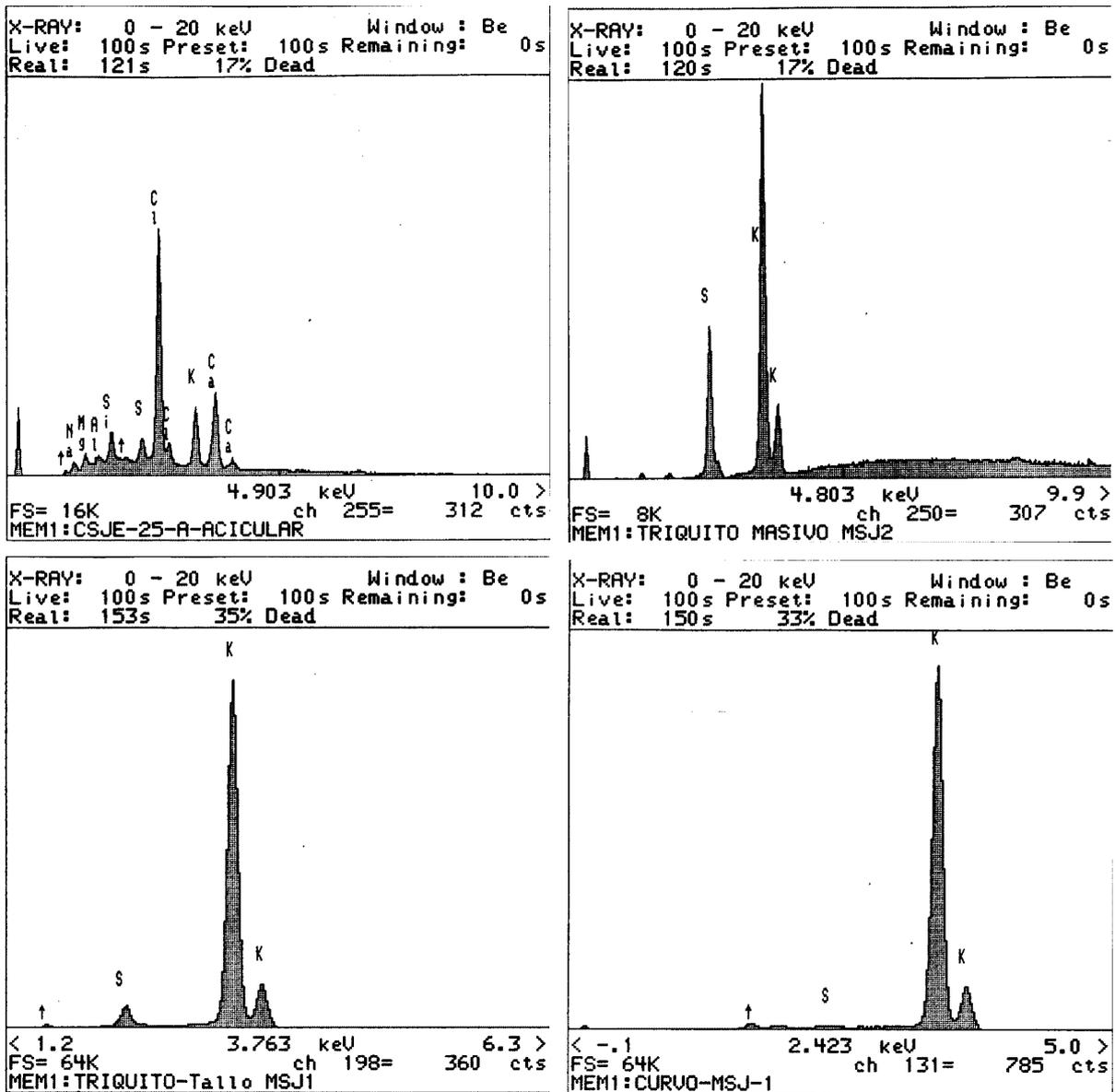


Figura II.6. Espectros de muestras de sales (de izquierda a derecha y de arriba a abajo). #21) Sodio, magnesio, azufre, cloro, potasio y calcio. #22) Azufre y potasio. #23) Azufre y potasio. #24) Azufre y potasio.

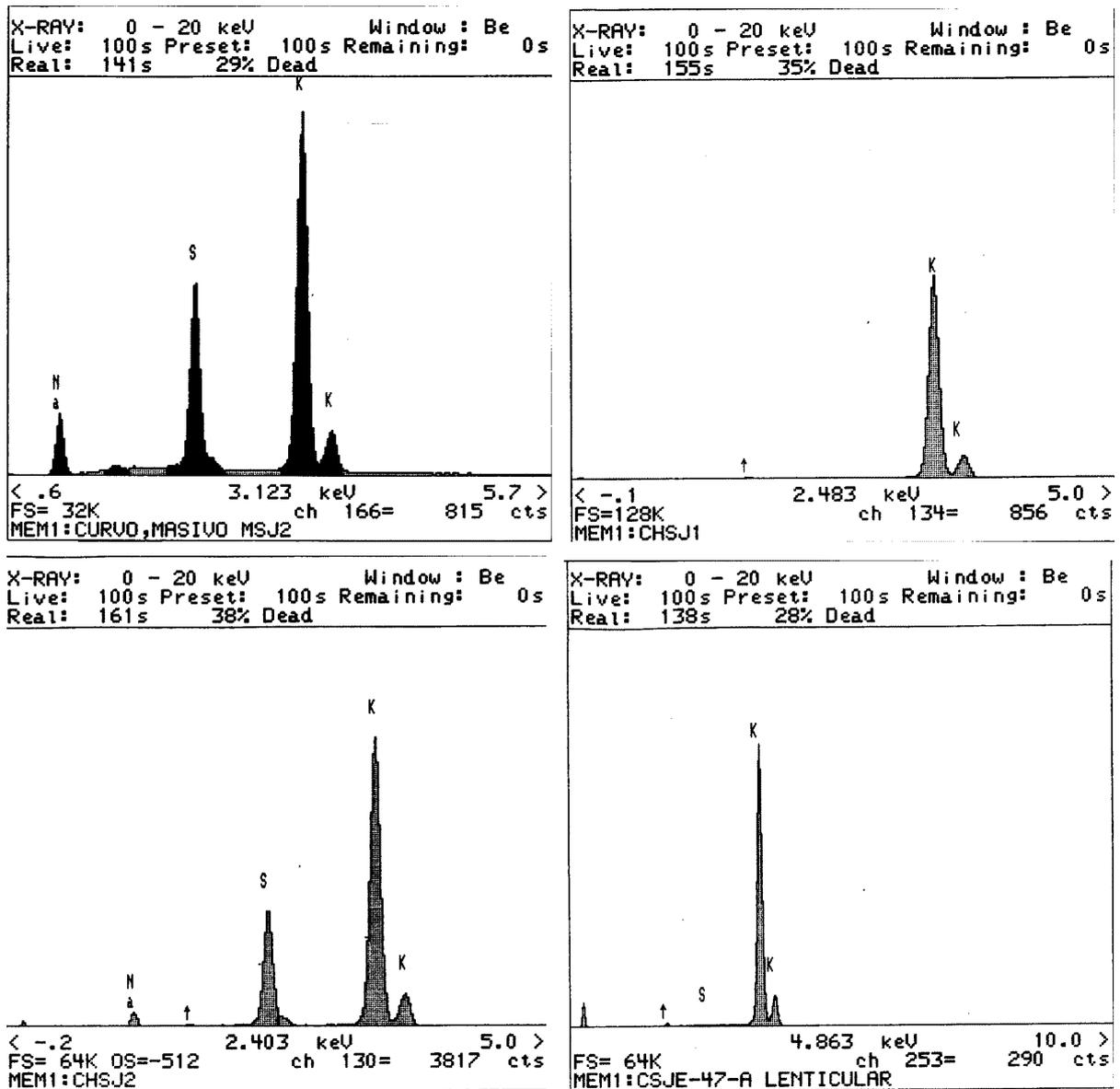


Figura II.7. Espectros de muestras de sales (de izquierda a derecha y de arriba a abajo). # 25) Sodio, azufre y potasio. # 26) Potasio. # 27) Sodio, azufre y potasio. # 28) Azufre y potasio.

*Anexo III: Observaciones realizadas
en las probetas de calcarenitas
sometidas al experimento de
cristalización de sales*

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

n° Pt: 5	L: 6-9*	n° experimento: 1	Solución salina: CaSO ₄ · 2H ₂ O (C)	Peso inicial: 162.29 g	Peso final: 165.45 g
----------	---------	-------------------	--	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probeta de calcarenita	Ensayos de soluciones salinas
00.33	5.00	23.55	24.66			
01.00	7.00	23.56	24.90			
04.00	10.0	21.33	25.50			
15.30	15.0	18.60	22.60			
16.15	15.0	19.10	23.70			
18.00	15.0	19.80	26.50			
20.15	15.0	21.00	25.50			
23.00	15.0	20.20	28.00		Color anaranjado en las aristas de la probeta.	
26.30	seca	19.90	24.20			
28.00	seca	16.30	23.90			
40.30	seca	18.70	22.80			
67.00	seca	19.80	19.80		Totalmente seca.	Queda un 1/3 de solución en el cristizador desde las 16.15 h.
71.00	seca	20.40	27.90	No hay desarrollo de eflorescencias.		

n° Pt: 9	L: 6-9	n° experimento: 1	Solución salina: CaSO ₄ · 2H ₂ O (D)	Peso inicial: 165.77 g	Peso final: 165.84 g
----------	--------	-------------------	--	------------------------	----------------------

t (h)	H (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Ensayos de soluciones salinas
00.33	5.00	23.55	24.66			
01.00	6.75	23.56	24.90			
04.00	10.0	21.33	25.50			
15.30	15.0	18.60	22.60			
16.15	15.0	19.10	23.70			
18.00	15.0	19.80	26.50			
20.15	15.0	21.00	25.50			
23.00	15.0	20.20	28.00		Color anaranjado en las aristas.	
26.30	seca	19.90	24.20			
28.00	seca	16.30	23.90			
40.30	seca	18.70	22.80			
67.00	seca	19.80	19.80	No se han desarrollado eflorescencias.	Totalmente seca.	
71.00	seca	20.40	27.90			Queda un 1/3 de solución en el cristizador desde las 16.15 h. (similar al ensayo con solución salina concentrada).

* L: 6-9 significa que se ha elaborado una lámina delgada entre los centímetros 6 y 9 de la probeta para posterior estudio petrográfico.

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

n° Pt:12 | **L: 11-13** | **n° experimento: 1** | **Solución salina: CaSO₄ · 2H₂O + MgSO₄ · 7H₂O (C)** | **Peso inicial: 153.25 g** | **Peso final: 163.38 g**

T (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Ensayos de soluciones salinas
00.33	4.00	23.55	24.66			
01.00	5.75	23.56	24.90			
04.00	9.00	21.33	25.50			
15.30	13.0	18.60	22.60			
16.15	13.0	19.10	23.70			
18.00	13.0	19.80	26.50			
20.15	13.0	21.00	25.50			
23.00	13.0	20.20	28.00			
26.30	seca	19.90	24.20			
28.00	seca	16.30	23.90			
40.30	seca	18.70	22.80	Hasta el cm 12 aparece una costra fina y frágil del mismo color que la calcarenita.		
67.00	seca	19.80	19.80		Cm 13 al 15 = superficie abombada. Sales con aspecto de ampollas.	Casi toda la solución ensayada está en el cristalizador desde las 16.15 hs. (3/4 partes del volumen original).
71.00	seca	20.40	27.90		Probeta seca y con tonalidad amarillenta.	

n° Pt:14 | **L: 6-9** | **n° experimento: 1** | **Solución salina: CaSO₄ · 2H₂O + MgSO₄ · 7H₂O (D)** | **Peso inicial: 153.85 g** | **Peso final: 154.08 g**

T (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Ensayos de soluciones salinas
00.33	4.75	23.55	24.66			
01.00	4.75	23.56	24.90			
04.00	10.00	21.33	25.50			
15.30	15.00	18.60	22.60			
16.15	15.00	19.10	23.70			
18.00	15.00	19.80	26.50			
20.15	15.00	21.00	25.50			
23.00	15.00	20.20	28.00			
26.30	seca	19.9.	24.20			
28.00	seca	16.30	23.90			
40.30	seca	18.70	22.80		Aristas con color anaranjado.	Queda menos de 1/3 de solución salina en cristalizador.
67.00	seca	19.80	19.80			
71.00	seca	20.40	27.90	No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta seca y con tono amarillento.	Cantidad de solución en cristalizador similar a la de la solución concentrada.

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

n° Pt: 15	L: 6-9	n° experimento: 1	Solución salina: MgSO ₄ · 7H ₂ O (C)	Peso inicial: 163.38 g	Peso final: 176.93 g
-----------	--------	-------------------	--	------------------------	----------------------

T (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Ensayos de soluciones salinas
00.33	2.00	23.55	24.66			
01.00	2.00	23.56	24.90			
04.00	2.75	21.33	25.50			
15.30	5.00	18.60	22.60			
16.15	5.00	19.10	23.70			
18.00	5.00	19.80	26.50			
20.15	5.50	21.00	25.50			
23.00	5.50	20.20	28.00			
26.30	tope seco	19.90	24.20			
28.00	idem.	16.30	23.90			
40.30	idem.	18.70	22.80	Pelusa de sales en la zona baja.	Humedad sólo visible en una de las caras.	Casi toda la solución permanece en el cristalizador.
67.00	idem.	19.80	19.80		Cm=8-9, abombamiento de la roca, formación de ampollas y descamación en los últimos cms secos. Cm=5-4, probeta húmeda con eflorescencias sólo detectables al tacto, muy duras. Grietas verticales en toda la probeta.	
En adelante	idem.			Costra dura hasta cm 4-5 a las 2 semanas de inicio ensayo.	Fracturas y reventones desde la costra hasta cm 15.	

n° Pt: 19	L: 6-9	n° experimento: 1	Solución salina: MgSO ₄ · 7H ₂ O (D)	Peso inicial: 150.29 g	Peso final: 153.68 g
-----------	--------	-------------------	--	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Ensayos de soluciones salinas
00.33	4.00	23.55	24.66			
01.00	4.00	23.56	24.90			
04.00	9.00	21.33	25.50			
15.30	15.00	18.60	22.60			
16.15	15.00	19.10	23.70			
18.00	15.00	19.80	26.50			
20.15	15.00	21.00	25.50			
23.00	seca	20.20	28.00			
26.30	seca	19.90	24.20			
28.00	seca	16.30	23.90			
40.30	seca	18.70	22.80			Menos de 1/3 de volumen de solución permanece en el cristalizador (cantidad inferior a la concentrada).
67.00	seca	19.80	19.80	No hay eflorescencias.	.	

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

n° Pt: 20 | **L: 6-9** | **n° experimento: 1** | **Solución salina: MgSO₄ · 7H₂O + MgCl₂ (C)** | **Peso inicial: 149.30 g** | **Peso final: 167.62 g**

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Ensayos de soluciones salinas
00.33	5.00	23.55	24.66			
01.00	5.00	23.56	24.90			
04.00	8.00	21.33	25.50			
15.30	13.00	18.60	22.60			
16.15	13.00	19.10	23.70			
18.00	13.50	19.80	26.50			
20.15	14.00	21.00	25.50			
23.00	14.00	20.20	28.00			
26.30	14.00	19.90	24.20			
28.00	14.00	16.30	23.90			
40.30	14.00	18.70	22.80			
67.00	14.00	19.80	19.80	No hay desarrollo de sales visibles.	Probeta muy húmeda, más que con solución diluída. Al tacto se aprecia pelusa de sales. Es el bloque más húmedo del experimento, además del ensayado con MgCl ₂ (C).	Casi toda la solución permanece en el cristizador. Aparentemente no hay migración de la solución por la probeta.
En adelante				Costra transparente justo encima de la parafina (cm 2).	Probeta totalmente mojada.	

n° Pt: 21 | **L: 6-9** | **n° experimento: 1** | **Solución salina: MgSO₄ · 7H₂O + MgCl₂ (D)** | **Peso inicial: 155.68 g** | **Peso final: 156.18 g**

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Ensayos de soluciones salinas
00.33	5.00	23.55	24.66			
01.00	5.00	23.56	24.90			
04.00	8.00	21.33	25.50			
15.30	13.00	18.60	22.60			
16.15	13.00	19.10	23.70			
18.00	13.00	19.80	26.50			
20.15	14.00	21.00	25.50			
23.00	14.00	20.20	28.00			
26.30	14.00	19.90	24.20			
28.00	14.00	16.30	23.90			
40.30	casi seca	18.70	22.80			Se ha evaporado casi toda la solución salina.
67.00	seca	19.80	19.80	No hay desarrollo de eflorescencias.		
En adelante	seca				Aristas amarillentas desde el cm 4 hasta el tope de la probeta. Probeta totalmente mojada.	

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

n° Pt: 22	L: 6-9	n° experimento: 1	Solución salina: MgCl ₂ (C)	Peso inicial: 152.82 g	Peso final: 167.14 g
-----------	--------	-------------------	--	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Ensayos de soluciones salinas
00.33	3.75	23.55	24.66			
01.00	3.75	23.56	24.90			
04.00	6.00	21.33	25.50		Muy húmeda	
15.30	10.00	18.60	22.60			
16.15	10.00	19.10	23.70			
18.00	10.00	19.80	26.50			
20.15	10.50	21.00	25.50			
23.00	11.50	20.20	28.00			
26.30	11.50	19.90	24.20			
28.00	11.50	16.30	23.90			
40.30	13.00	18.70	22.80		Muy mojada hasta cm 13 y totalmente seca hasta cm 15.	Casi toda la solución en cristalizador (más que en solución diluida).
67.00		19.80	19.80	No hay desarrollo de eflorescencias.		
En adelante					Es la probeta más mojada del experimento n°1.	

n° Pt: 24	L: 6-9	n° experimento: 1	Solución salina: MgCl ₂ (D)	Peso inicial: 166.29 g	Peso final: 167.04 g
-----------	--------	-------------------	--	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Ensayos de soluciones salinas
00.33	4.00	23.55	24.66			
01.00	4.00	23.56	24.90			
04.00	8.25	21.33	25.50			
15.30	13.00	18.60	22.60			
16.15	13.50	19.10	23.70			
18.00	14.00	19.80	26.50			
20.15	15.00	21.00	25.50			
23.00	15.00	20.20	28.00			
26.30	15.00	19.90	24.20			
28.00	15.00	16.30	23.90			
40.30	15.00	18.70	22.80			1 cm de solución permanece en cristalizador (menos cantidad que la concentrada).
67.00	15.00	19.80	19.80	No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta seca hasta cm 5.	
En adelante	15.00				Calcarenita con tonalidad amarillenta. Todavía permanece mojada.	

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

nº Pt: 27	L: 12-15	nº experimento: 1	Solución salina: Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (C)	Peso inicial: 155.67 g	Peso final: 157.70 g
-----------	----------	-------------------	---	------------------------	----------------------

T (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	5.00	23.55	24.66			
01.00	5.00	23.56	24.90			
04.00	9.50	21.33	25.50			
15.30	14.00	18.60	22.60			
16.15	14.25	19.10	23.70			
18.00	14.50	19.80	26.50			
20.15	15.00	21.00	25.50	Sales en aristas del cm=8-14		
23.00		20.20	28.00	Sales en aristas por encima de la parafina, sobre todo en cm 5. Diferente morfología según altura. Evolución espacial y temporal de las sales: - hasta cm 8 costra dura y transparente. - de cm 8 hacia arriba, tapiz duro y continuo de gránulos traslúcidos blanquecinos. - sobre el tapiz y más arriba, polvo blanco de cristales granulares y aciculares. - cm 13-15 (sólo en 1 cara) sales no compactas y <i>wiskers</i> , transparentes y/o amarillentos.	Arenización.	
26.30		19.90	24.20			
28.00		16.30	23.90			
40.30		18.70	22.80	Aumento de sales por todo el bloque. Morfologías diferentes según altura, y cantidad variable según localización. Más eflorescencias en aristas. A las 55 h toda la probeta está cubierta por sales.	Aumento de la arenización.	Más de 1 cm de solución en cristalizador.
67.00		19.80	19.80	Evolución de la morfología de las sales a pulverulenta. En cm 13-15 es un polvo más fino y anaranjado.	Aumento de la arenización y desarrollo de sales.	Disminución considerable de solución en cristalizador. La solución concentrada empapa antes que la diluida la probeta.
En adelante				Eflorescencia muy dura. Amarillenta del cm 11 al 15.		Desarrollo de cristales en la solución remante en el cristalizador. Patrón de actuación de la solución concentrada y diluida muy diferente.

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

n° Pt: 36	L: 9-12	n° experimento: 1	Solución salina: NaCl (C)	Peso inicial: 162.78 g	Peso final: 179.29 g
-----------	---------	-------------------	---------------------------	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.00	23.55	24.66			
01.00	4.0	23.56	24.90			
04.00	6.50	21.33	25.50			
15.30	12.00	18.60	22.60			
16.15	12.25	19.10	23.70			
18.00	12.50	19.80	26.50	Aparición de las primeras sales a las 17 h por encima de la parafina hasta el cm 4, principalmente en las aristas. A las 18.40 h desarrollo de sales hasta el cm 5. Morfologías granulares.		Desarrollo de sales con morfologías dendríticas en las paredes del cristalizador.
20.15	13.00	21.00	25.50			
23.00	13.00	20.20	28.00			
26.30	13.25	19.9.	24.20			
28.00	13.501	16.30	23.90			
40.30		18.70	22.80	Eflorescencias con morfología granular hasta cm 6 en las aristas.		Casi toda la solución permanece en el cristalizador.
67.00		19.80	19.80	Gran desarrollo de eflorscencias hasta el cm 14.	La zona superior de la probeta (con menos sales) se abomba por la presión de cristalización de la halita.	Disminución de la solución remanente en el cristalizador. Más solución en recipiente que la diluída.
71.00				Desarrollo espectacular de halita hasta el cm 7. Morfología granular.	Inicio del abombamiento de la calcarenita por las aristas.	Disminución de la solución remanente en el cristalizador (1/3 parte del volumen inicial experimentado). Más solución en recipiente que la diluída.
En adelante				Sal muy dura.	Abombamiento y grietas verticales en la zona superior del bloque. Desintegración.	Cristalización de cubos de halita en la solución remanente en el cristalizador.

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

nº Pt: 30	L: 6-9	nº experimento: 1	Solución salina: Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O (D)	Peso inicial: 164.78 g	Peso final: 164.91 g
-----------	--------	-------------------	---	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	5.00	23.55	24.66			
01.00	5.00	23.56	24.90			
04.00	9.00	21.33	25.50			Se moja antes la probeta con la solución concentrada.
15.30	14.00	18.60	22.60			
16.15	14.00	19.10	23.70			
18.00	14.00	19.80	26.50			
20.15	14.50	21.00	25.50			
23.00	14.50	20.20	28.00			
26.30	14.75	19.90	24.20	Desarrollo de las primeras sales.		
28.00	15.00	16.30	23.90			
40.30		18.70	22.80	Sal pulverulenta anaranjada, en aristas (cm 9-13), y por toda la cara (cm 13-15).		La mitad de la solución salina permanece en el recipiente.
67.00		19.80	19.80			Más de 1 cm de solución salina en el cristizador.

nº Pt: 38	L: 6-9	nº experimento: 1	Solución salina: NaCl (D)	Peso inicial: 160.08 g	Peso final: 160.49 g
-----------	--------	-------------------	---------------------------	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	6.00	23.55	24.66			
01.00	6.00	23.56	24.90			
04.00	10.00	21.33	25.50			
15.30	15.00	18.60	22.60			
16.15	15.00	19.10	23.70			
18.00	15.00	19.80	26.50			
20.15	15.00	21.00	25.50			
23.00	15.00	20.20	28.00			
26.30	15.00	19.90	24.20			
28.00	15.00	16.30	23.90			
40.30	15.00	18.70	22.80			Menos cantidad solución en el cristizador que en el ensayo con solución concentrada.
67.00	seca	19.80	19.80	No hay desarrollo de sales.		Idem.
En adelante	seca				Probeta aparentemente en perfecto estado.	

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

n° Pt: 51	L: 6-9	n° experimento: 2	Solución salina: NaNO ₃ (D)	Peso inicial: 157.94 g	Peso final: 158.63 g
-----------	--------	-------------------	--	------------------------	----------------------

T (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.00	21.50	28.60			
01.00	6.00	20.60	37.00			
04.00	10.00	19.80	26.40			
15.30	15.00	19.00	24.60	No hay desarrollo de eflorescencias.		
16.15	15.00	19.75	23.45			
18.00	15.00	20.10	22.90			
20.15	15.00	21.20	22.60			
23.00	15.00	21.40	22.30		En algunas zonas la probeta se amarillea.	Menos solución en cristalizador que con solución concentrada.
26.30	15.00	21.25	25.30			
28.00	15.00	21.30	27.90			
40.30	15.00	21.40	28.70	No hay desarrollo de sales.		Rotura de la parafina.
67.00	seca	22.00	29.10		Probeta seca.	
89.30	seca	21.50	28.50	No hay eflorescencias.	Probeta seca.	Igual cantidad de solución en cristalizador que con solución concentrada.

n° Pt: 53	L: 6-9	n° experimento: 2	Solución salina: KNO ₃ (C)	Peso inicial: 160.66 g	Peso final: 160.83 g
-----------	--------	-------------------	---------------------------------------	------------------------	----------------------

T (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.00	21.50	28.60			
01.00	6.50	20.60	37.00			
04.00	10.00	19.80	26.40			
15.30	15.00	19.00	24.60			
16.15	15.00	19.75	23.45			
18.00	15.00	20.10	22.90			
20.15	15.00	21.20	22.60			
23.00	15.00	21.40	22.30			
26.30	15.00	21.25	25.30			
28.00	15.00	21.30	27.90			
40.30	seca	21.40	28.70		Probeta de calcarenita seca.	
67.00	seca	22.00	29.10	No hay desarrollo de eflorescencias.		Igual cantidad de solución remanten en el cristalizador que solución diluída (la mitad del volumen inicial ensayado).
89.30	seca	21.50	28.50			

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

n° Pt: 50	L: 12-15	n° experimento: 2	Solución salina: NaNO ₃ (C)	Peso inicial: 158.63 g	Peso final: 189.91 g
-----------	----------	-------------------	--	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	3.50	21.50	28.60			
01.00	5.00	20.60	37.00			
04.00	7.00	19.80	26.40			
15.30	13.0	19.00	24.60	Primeras eflorescencias las 10 h. Morfologías granulares hasta cm 4.		
16.15	13.50	19.75	23.45			
18.00	13.80	20.10	22.90			
20.15	14.30	21.20	22.60	Mayor desarrollo de sales, principalmente en las aristas.		
23.00	14.75	21.40	22.30		Al tacto se aprecia cristalización de eflorescencias por toda la probeta.	
26.30	15.00	21.25	25.30			
28.00	15.00	21.30	27.90			
40.30	15.00	21.40	28.70	Evolución espacial y temporal de las eflorescencias. Tapizan toda la probeta, especialmente del cm 2 al 5. Sal pulverulenta y de aspecto húmedo.		Queda la mitad del volumen de solución salina añadida al cristizador.
67.00	seca	22.00	29.10			
89.30		21.50	28.50	Distintas morfologías según la altura y la orientación de las caras: * hasta cm 5, costra dura, blanca, húmeda, morfología granular. Del cm 6 al 9 cristales duros con hábito lenticular. Del cm 9 al 15 sal más suelta (poca cantidad). * hasta cm 5 sal con morfología granular, hasta el cm 15 la eflorescencia es menos compacta.		

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

n° Pt: 55	L: 6-9	n° experimento: 2	Solución salina: KN ₃ (D)	Peso inicial: 157.15 g	Peso final: 157.24 g
-----------	--------	-------------------	--------------------------------------	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	5.00	21.50	28.60			
01.00	8.00	20.60	37.00			
04.00	12.00	19.80	26.40			
15.30	15.00	19.00	24.60			
16.15	15.00	19.75	23.45			
18.00	15.00	20.10	22.90			
20.15	15.00	21.20	22.60			
23.00	15.00	21.40	22.30			
26.30	15.00	21.25	25.30			
28.00	15.00	21.30	27.90			
40.30	seca	21.40	28.70			
67.00	seca	22.00	29.10	No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta seca. Desde cm=7 aristas color anaranjado.	Mitad del volumen inicial de la solución ensayada en el cristalizador.

n° Pt: 48	L: 12-15	n° experimento: 2	Solución salina: K ₂ SO ₄ (C)	Peso inicial: 157.63 g	Peso final: 174.25 g
-----------	----------	-------------------	---	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	5.25	21.50	28.60			
01.00	8.00	20.60	37.00			
04.00	10.00	19.80	26.40			
15.30	15.00	19.00	24.60			
16.15	15.00	19.75	23.45		Probeta muy mojada. Al tacto los dedos se humedecen.	
18.00	15.00	20.10	22.90			
20.15	15.00	21.20	22.60			
23.00	15.00	21.40	22.30			Misma cantidad de solución remanente que con el ensayo de solución diluida.
26.30	15.00	21.25	25.30			
28.00	15.00	21.30	27.90			
40.30	15.00	21.40	28.70	Eflorescencias hasta cm=8. Detectables al tacto.	Superficie áspera, sales muy duras.	
67.00	15.00	22.00	29.10			
89.30	15.00	21.50	28.50	Sales aciculares y transparentes.	Es la probeta más húmeda del 2° experimento, similar a las probetas 20 y 22.	Más cantidad de solución en cristalizar que la diluida (la mitad del volumen añadido al cristalizador).

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

nº Pt: 44	L: 6-9	nº experimento: 2	Solución salina: K ₂ SO ₄ (D)	Peso inicial: 157.77 g	Peso final: 157.88 g
-----------	--------	-------------------	---	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	5.25	21.50	28.60			
01.00	7.75	20.60	37.00			
04.00	10.00	19.80	26.40			
15.30	15.00	19.00	24.60			
16.15	15.00	19.75	23.45			
18.00	15.00	20.10	22.90			
20.15	15.00	21.20	22.60			
23.00	15.00	21.40	22.30			Misma cantidad de solución remanente que en la concentrada.
26.30	15.00	21.25	25.30			
28.00	15.00	21.30	27.90			
40.30	seca	21.40	28.70		Las aristas de la probeta se han amarilleado.	
67.00	seca	22.00	29.10			
89.30	seca	21.50	28.50	No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta seca. Tacto liso, aristas amarillas.	Menos cantidad de solución en cristizador que la concentrada. Queda 1/3 parte del volumen original ensayado.

nº Pt: 49	L: 12-15	nº experimento: 2	Solución salina: Na ₂ SO ₄ · 10 H ₂ O + NaNO ₃ (C)	Peso inicial: 164.05 g	Peso final: 165.53 g
-----------	----------	-------------------	--	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	6.00	21.50	28.60			
01.00	7.25	20.60	37.00			
04.00	11.00	19.80	26.40			
15.30	15.00	19.00	24.60			
16.15	15.00	19.75	23.45			
18.00	15.00	20.10	22.90			
20.15	15.00	21.20	22.60			
23.00	15.00	21.40	22.30	Sales forman un tapiz blanco pulverulento que crece por las aristas en el cm 8 y se une formando un arco unos 3 cm más arriba.		
26.30	15.00	21.25	25.30			
28.00	15.00	21.30	27.90			
40.30	15.00	21.40	28.70	A partir del cm 7 cristalizan sales en las caras. Sales duras, secas y no compactas.	Arenización.	
67.00	15.00	22.00	29.10			
89.30		21.50	28.50			Igual cantidad de solución concentrada y diluída en cristizador. Se ha consumido casi por completo. Pauta de cristalización entre la solución concentrada y diluída muy diferente.

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

n° Pt:58 | **L: 11-14** | **n° experimento: 2** | **Solución salina: Na₂SO₄ · 10 H₂O + NaNO₃ (D)** | **Peso inicial: 162.04 g** | **Peso final: 177.96 g**

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	5.00	21.50	28.40			
01.00	6.00	20.60	37.00			
04.00	10.50	19.80	26.40			
15.30	14.00	19.00	24.60			
16.15	14.00	19.75	23.45			
18.00	14.00	20.10	22.90			
20.15	14.00	21.20	22.60	Eflorescencias en las aristas de cm 4-5.		
23.00	14.00	21.40	22.30	Sales en aristas cm 3 al 7 y una de las caras. Morfologías granulares. Costra fina en 1 cara.		Hay más solución diluída que concentrada en el cristalizador.
26.30	15.00	21.25	25.30			
40.30	15.00	21.40	28.70	Eflorescencias desde el cm 2 (encima de la parafina). Crecen por las aristas y se unen en el cm 4 formando un arco, de aquí hasta el cm 15 tapizan todas las caras. Sales sueltas, húmedas, pulverulentas (se deshacen al tacto). Cristales con hábito granular.		Esta es la mezcla de soluciones que ocasiona en las probetas ensayadas los efectos más diferentes según la mezcla ensayada sea diluida o concentrada.
89.30		21.50	28.50	La sal es ahora una costra frágil y fina, al tacto se desprende en conjunto		Igual cantidad de solución concentrada y diluída en cristalizador, casi se ha evaporado del todo.

n° Pt: 28 | **L: 6-9** | **n° experimento: 3** | **Solución salina: K₂SO₄ + KNO₃ (D)** | **Peso inicial: 159.08 g** | **Peso final: 159.16 g**

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.50	21.20	34.40			
01.00	6.00	21.30	34.45			
04.00	11.00	20.90	30.00			
15.30	15.00	19.70	28.20			
16.15	15.00	20.20	27.90			
18.00	15.00	20.90	28.00			
20.15	15.00	21.30	27.80			
23.00	15.00	21.70	28.00			
26.30	15.00	21.45	27.85			Casi no hay solución en el cristalizador.
28.00	15.00	21.00	26.75			
40.30	15.00	21.70	29.30	No hay desarrollo de eflorescencias.		Rotura de parafina. No hay casi solución en el cristalizador.
67.00	seca				Probeta totalmente seca.	
240.0				No hay desarrollo de sales.		No queda solución en el cristalizador.

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

n° Pt: 32	L: 7-10	n° experimento: 3	Solución salina: K ₂ SO ₄ + KNO ₃ (C)	Peso inicial: 155.23 g	Peso final: 161.28 g
-----------	---------	-------------------	--	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	5.00	21.20	34.40			
01.00	7.00	21.30	34.45			
04.00	7.75	20.90	30.30			
15.30	11.00	19.70	28.20			
16.15	11.00	20.20	27.90			
18.00	11.50	20.90	28.00			
20.15	12.00	21.30	27.80			
23.00	13.00	21.70	28.00	Sólo al tacto se aprecian eflorescencias hasta cm 10		
26.30	13.00	21.45	27.85	Aparecen las primeras sales hasta el límite húmedo de la probeta, pero son difíciles de apreciar.		
28.00		21.00	26.75			
40.30		19.70	20.30	Sales por todas las caras desde cm=3 (principalmente entre cm 4-7). Sales blancas, duras, no compactas.		Abundante cantidad de solución en el cristalizador.
240				Las sales aparecen desde la base de la parafina, y tapizan toda la superficie de la probeta, pero son escasas. Hay más sales del cm 4 al 8 y hacia arriba disminuyen.		No queda solución en el cristalizador.

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

n° Pt: 25	L: 9-12	n° experimento: 3	Solución salina: NaNO ₃ + KNO ₃ (C)	Peso inicial: 160.75 g	Peso final: 178.78 g
-----------	---------	-------------------	---	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.25	21.20	34.40			
01.00	6.00	21.30	34.45			
04.00	10.00	20.90	30.30			
15.30	14.00	19.70	28.20	Sales en aristas en cm 2-3. A partir cm 5 las sales tapizan todas las caras y evolucionan a costra blanca, lisa, translúcida y dura. En una de las caras la sal es opaca, dura y suelta entre cm 11-12. Del cm 12 al 14 está húmeda y seca a partir del cm 14.		Misma cantidad de solución remanente en cristalizador que la solución concentrada.
16.15	14.00	20.20	27.90			
18.00	14.15	20.90	28.00			
20.15	14.20	21.30	27.80	Mayor desarrollo de eflorescencias. En la zona baja crecen por las aristas uniéndose hacia arriba formando un arco, a distintas alturas según las caras de la probeta. Sal translúcida, dura, compacta. A partir del cm 10 la morfología de los cristales es granular..		
23.00	14.50	21.70	28.00			
26.30	15.00	21.45	27.85			Queda 1/3 parte del volumen original añadido al cristalizador.
28.00	15.00	21.00	26.75			
40.30	15.00	19.70	20.30	47 h: las sales aparecen desde el cm 3 por las aristas y se unen formando un arco en el cm 5, las morfologías son granulares. Entre cm 6-10 la sal es una costra lisa. Sobre ésta han crecido cristales sueltos granulares y blancos. Sales muy duras y al tacto no se desprenden.		
240.0				Sales con diferente morfología según altura. Cm 2-5: sal dura y de aspecto terroso. > cm 3: sales granulares en aristas que se unen en el centro de la cara formando un arco en el cm 5-6. Cm 5-11: costra blanca, translúcida, dura y frágil. Sobre la costra hay cristales granulares blancos y duros.		

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

n° Pt: 26	L: 6-9	n° experimento: 3	Solución salina: NaNO ₃ + KNO ₃ (D)	Peso inicial: 147.86 g	Peso final: 148.44 g
-----------	--------	-------------------	---	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.50	21.20	34.40			
01.00	6.00	21.30	34.45			
04.00	11.00	20.90	30.30			
15.30	15.00	19.70	28.20			Misma cantidad de solución remanente en cristizador que la solución concentrada.
16.15	15.00	20.20	27.90			
18.00	15.00	20.90	28.00			
20.15	15.00	21.30	27.80			
23.00	15.00	21.70	28.00			
26.30	15.00	21.45	27.85			
28.00		21.00	26.75			
40.30		19.70	20.30	No hay desarrollo de eflorescencias.		La solución del cristizador se ha evaporado casi por completo.
67.00				No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta totalmente seca.	

n° Pt: 37	L: 7-10	n° experimento: 3	Solución salina: NaCl + Na ₂ SO ₄ · 10 H ₂ O (C)	Peso inicial: 157.21 g	Peso final: 166.55 g
-----------	---------	-------------------	---	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	3.00	21.20	34.40			
01.00	4.00	21.30	34.45			
04.00	5.00	20.90	30.30			
15.30	8.00	19.70	28.20	Primeras sales sólo en cm 3, tapizando la probeta.		
16.15	8.15	20.20	27.90			
18.00	8.50	20.90	28.00			
20.15	9.00	21.30	27.80			
23.00		21.70	28.00	Desarrollo de sales del cm 3 al 4.	La probeta está mojada del cm 4 al 9, hasta el cm 15 permanece seca.	
26.30	9.50	21.45	27.85			Casi toda la solución permanece en cristizador.
28.00	10.00	21.00	26.75			
40.30	11.00	19.70	20.30	Las sales aparecen en el cm 3 en las aristas y se unen formando un arco en el cm 5. Sal blanca, dura, con morfología granulares.		
240.0				Mayor desarrollo en algunas caras. Del cm 7 al 10 las sales son de tonalidad amarillenta.	Los últimos 4 cm están secos y sin sales. Probeta estallada entre cm 6-11 debido a presiones de cristalización.	No hay solución en el cristizador.

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

n° Pt: 46	L: 6-9	n° experimento: 3	Solución salina: NaCl + Na ₂ SO ₄ · 10 H ₂ O (D)	Peso inicial: 158.62 g	Peso final: 159.01 g
-----------	--------	-------------------	---	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.00	21.20	34.40			
01.00	6.00	21.30	34.45			
04.00	9.00	20.90	30.30			
15.30	14.00	19.70	28.20			
16.15	14.00	20.20	27.90			
18.00	14.00	20.90	28.00			
20.15	15.00	21.30	27.80			
23.00	15.00	21.70	28.00			
26.30	15.00	21.45	27.85	No hay desarrollo de sales.		Queda 0.5 cm de solución en el cristalizador.
28.00	15.00	21.00	26.75			
40.30		19.70	20.30	No hay desarrollo de eflorescencias.		
67.00					A las 64.30 h la probeta está totalmente seca.	

n° Pt: 29	L: 6-9	n° experimento: 4	Solución salina: KCl + KNO ₃ (D)	Peso inicial: 157.28 g	Peso final: 157.85 g
-----------	--------	-------------------	---	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	6.00	21.20	34.40			
01.00	7.50	21.30	34.45			
04.00	10.50	20.90	30.30			
15.30	10.50	19.70	28.20			
16.15	10.50	20.20	27.90			
18.00	?	20.90	28.00			
20.15		21.30	27.80			
23.00		21.70	28.00			
26.30		21.45	27.85			
28.00		21.00	26.75			
40.30		19.70	20.30	No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta seca.	No queda solución en cristalizador.

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

n° Pt: 47	L: 6-9	n° experimento: 4	Solución salina: NaCl + KNO ₃ (D)	Peso inicial: 158.98 g	Peso final: 159.51 g
-----------	--------	-------------------	--	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	5.00	25.60	27.40			
01.00	11.00	25.80	28.00			
04.00	13.00	23.20	25.30			
15.30	15.00	21.70	23.80			
16.15	15.00	22.80	24.80			
18.00	15.00	24.90	23.90			
20.15	15.00	27.30	23.20			
23.00	15.00	28.50	22.90	No hay desarrollo de sales.		
26.30	15.00	26.90	23.40			
28.00	15.00	24.50	22.70			
40.30	seca	21.00	25.50	No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta seca.	No queda solución en cristalizador.

n° Pt: 45	L: 6-9	n° experimento: 4	Solución salina: NaCl + NaNO ₃ (D)	Peso inicial: 156.42 g	Peso final: 156.91g
-----------	--------	-------------------	---	------------------------	---------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	6.00	25.60	27.40			
01.00	12.00	25.80	28.00			
04.00	12.00	23.20	25.30			
15.30	12.00	21.70	23.80			
16.15	12.00	22.80	24.80			
18.00	12.00	24.90	23.90			
20.15	12.00	27.30	23.20			
23.00	15.00	28.50	22.90			
26.30	15.00	26.90	23.40			
28.00	15.00	24.50	22.70			
40.30	seca	21.00	25.50	No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta seca.	No queda solución en el cristalizador.

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

n° Pt: 43 | **L: 6-9** | **n° experimento: 4** | **Solución salina: MgSO₄ · 7 H₂O + Na₂SO₄ · 10 H₂O (D)** | **Peso inicial: 151.50 g** | **Peso final: 151.75g**

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	5.00	25.60	27.40			
01.00	8.00	25.80	28.00			
04.00	13.00	23.20	25.30			
15.30		21.70	23.80			
16.15		22.80	24.80			
18.00		24.90	23.90			
20.15		27.30	23.20			
23.00		28.50	22.90			
26.30		26.90	23.40			
28.00		24.50	22.70			
40.30	seca	21.00	25.50	No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta seca.	No queda solución en el cristizador.

n° Pt: 42 | **L: 10-13** | **n° experimento: 4** | **Solución salina: MgSO₄ · 7 H₂O + Na₂SO₄ · 10 H₂O (D)** | **Peso inicial: 158.19 g** | **Peso final: 175.68g**

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.00	25.60	27.40			
01.00	10.00	25.80	28.00			
04.00	10.00	23.20	25.30			
15.30	10.00	21.70	23.80			
16.15	10.00	22.80	24.80			
18.00	10.00	24.90	23.90			
20.15	10.00	27.30	23.20			
23.00		28.50	22.90		Probeta rugosa al tacto: evidencia de sales.	
26.30	?	26.90	23.40			Cristalizador con mayor cantidad de solución de todos los experimentos realizados.
28.00		24.50	22.70			
40.30		21.00	25.50	No hay desarrollo de eflorescencias.		
51.00					Eflorescencias sólo visibles con L.P.	
75.00					Probeta húmeda	Quedan 5 mm de solución remanente en el cristalizador.
339.0				Eflorescencias en superficie con. Se distinguen dos morfologías: * Desde la base de la parafina hacia arriba hay una costra delgada, dura y transparente, es como una capa de barniz. * En las aristas a partir del cm 4 hay una sal dura, blanca, sin relieve, que se une en el cm 12 formando un arco.		

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

n° Pt: 57	L: 9-12	n° experimento: 5	Solución salina: NaCl + KNO ₃ (C)	Peso inicial: 160.19 g	Peso final: 170.81 g
-----------	---------	-------------------	--	------------------------	----------------------

T (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.50	26.80	23.40			
01.00	7.50	26.90	24.30			
04.00	11.50	24.70	25.70			
15.30	15.00	22.90	28.50			Permanece casi toda la solución en el cristizador.
16.15	15.00	23.20	27.90	Costra dura, traslúcida en aristas desde cm=6-15		
18.00	15.00	25.30	30.20			
20.15	15.00	28.40	31.50			
23.00	15.00	29.50	27.80			
26.30	15.00	27.90	28.30			
28.00	15.00	25.90	29.20			Se ha evaporado toda la solución salina del recipiente.
40.30	seca	22.70	26.30			
64.00		23.00	27.50	Toda la probeta está tapizada por una sal blanca, dura, de morfología granular.		

n° Pt: 54	L: 6-9	n° experimento: 5	Solución salina: NaCl + KCl (D)	Peso inicial: 158.87 g	Peso final: 159.22 g
-----------	--------	-------------------	---------------------------------	------------------------	----------------------

T (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	5.00	26.80	23.40			
01.00	6.25	26.90	24.30			
04.00	10.00	24.70	25.70			
15.30	14.25	22.90	28.50			
16.15	15.00	23.20	27.90	No hay sales visibles ni al tacto.		Queda casi toda la solución en el cristizador.
18.00	15.00	25.30	30.20			
20.15	15.00	28.40	31.50			
23.00	15.00	29.50	27.80			
26.30	15.00	27.90	28.30			
28.00	15.00	25.90	29.20			
40.30	seca	22.70	26.30	No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta seca.	Casi no hay solución en el cristizador.

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

n° Pt: 52	L: 3-6	n° experimento: 5	Solución salina: NaCl + KCl (C)	Peso inicial: 154.88 g	Peso final: 172.11g
-----------	--------	-------------------	---------------------------------	------------------------	---------------------

T (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	5.00	26.80	23.40			
01.00	7.75	26.90	24.30			
04.00	10.50	24.70	25.70			
15.30	15.00	22.90	28.50	Toda la probeta está cubierta por un tapiz de sales traslúcidas y muy húmedas. Del cm 2-4 las sales son blancas, granulares y forman un arco en la cara de la probeta. Sólo hay sales en una de las caras. Desarrollo de <i>wiskers</i> .		
16.15	15.00	23.20	27.90			
18.00	15.00	25.30	30.20			
20.15	15.00	28.40	31.50			
23.00	15.00	29.50	27.80			
26.30	15.00	27.90	28.30			
28.00	15.00	25.90	29.20			
40.30	seca	22.70	26.30			Queda solución en el cristalizador.
64.00				Sal blanca en cm 2-4 en 1 cara, morfología granular y dura. En las otras caras entre cm 2-4 las sales son blancas, húmedas y en forma de tapiz. Encima del tapiz hay <i>wisker</i> cortos, largos y enrollados.		Queda 1/3 de solución en el recipiente.

n° Pt: 56	L: 6-9	n° experimento: 5	Solución salina: MgSO ₄ · 7 H ₂ O + NaNO ₃ (D)	Peso inicial: 158.03 g	Peso final: 158.55 g
-----------	--------	-------------------	---	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	6.00	26.80	23.40			
01.00	9.50	26.90	24.30			
04.00	11.00	24.70	25.70			
15.30	15.00	22.90	28.50			
16.15	15.00	23.20	27.90	No hay desarrollo de eflorescencias.		Casi toda la solución del cristalizador evaporada (queda 0.5 cm).
18.00	15.00	25.30	30.20			
20.15	15.00	28.40	31.50			
23.00	15.00	29.50	27.80			
26.30	15.00	27.90	28.30			
28.00	15.00	25.90	29.20			
40.30	seca	22.70	26.30	No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta seca.	

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

nº Pt: 17	L: 7-10	nº experimento: 5	Solución salina: KCl + KNO ₃ (C)	Peso inicial: 157.08 g	Peso final: 168.20 g
-----------	---------	-------------------	---	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.50	26.80	23.40			
01.00	6.00	26.90	24.30			
04.00	10.00	24.70	25.70			
15.30	15.00	22.90	28.50	Sales en los cm más bajos de la probeta.		
16.15	15.00	23.20	27.90	Las sales crecen en las aristas 1 cm por encima de la parafina uniéndose en forma de arco en el cm 9. Morfología granular y aspecto húmedo en las aristas; en las caras las sales forman un tapiz, son duras y no se desprenden al tacto.		Queda bastante solución en el cristizador.
18.00	15.00	25.30	30.20			
20.15	15.00	28.40	31.50			
23.00	15.00	29.50	27.80	Mayor desarrollo de sales. Costra traslúcida, húmeda y dura.		
26.30	15.00	27.90	28.30			
28.00	15.00	25.90	29.20			
40.30	seca	22.70	26.30	Es la probeta que más sales tiene del experimento nº5.		Quedan las ¾ partes del volumen inicial de solución ensayada.
64.00				En <u>aristas</u> las sales tienen morfologías granulares y son blancas y traslúcidas. En <u>caras</u> la sal forma un tapiz muy frágil que se rompe al tacto. La sal es más abundante en los cm inferiores y en los superiores.		

nº Pt: 1	L: 6-9	nº experimento: 6	Solución salina: NaNO ₃ + Mg(NO ₃) ₂ (D)	Peso inicial: 160.53 g	Peso final: 161.22 g
----------	--------	-------------------	--	------------------------	----------------------

T (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	5.00	27.30	25.60			
01.00	7.00	27.50	26.00			
04.00	9.50	25.90	25.80			
15.30	14.00	26.60	21.50			Queda la mitad de la solución en el cristizador.
16.15	14.00	26.70	21.90			
20.15	14.25	27.20	21.40			
23.00	14.50	27.20	21.40	No hay desarrollo de eflorescencias.		
26.30	15.00	27.00	22.30			
28.00	15.00	26.90	22.90			
40.30		26.70	23.00	No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta seca.	No queda solución en el cristizador.

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

n° Pt: 18	L: 7-10	n° experimento: 5	Solución salina: NaCl + NaNO ₃ (C)	Peso inicial: 158.33 g	Peso final: 181.83 g
-----------	---------	-------------------	---	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	3.75	26.80	23.40			
01.00	4.75	26.90	24.30			
04.00	5.25	24.70	25.70			
15.30	12.00	22.90	28.50	Primeras sales en la zona baja de la probeta.		
16.15	12.00	23.20	27.90	Por encima de 1 cm sobre parafina: sales blancas, de morfología granular y aspecto muy húmedo, forman un anillo alrededor de la probeta en el cm 2 y tienen más relieve. En una de las caras aparece un arco en mitad de la superficie. Hasta el cm 10 hay de forma dispersa sales duras, hasta el cm 12 la probeta está húmeda y el resto está seco.		Queda toda la solución en el cristalizador.
18.00	12.00	25.30	30.20			
20.15	12.50	28.40	31.50			
23.00	13.00	29.50	27.80	Aumento del desarrollo de sales.		Aspecto sales similar a las de probeta n° 52, solución mezcla concentrada de NaCl + KCl.
26.30	13.25	27.90	28.30			
28.00	13.45	25.90	29.20			
40.30	14.00	22.70	26.30	Aumento del desarrollo de sales.		Queda casi toda la solución en el cristalizador. Probeta con más solución del experimento n°5.
64.00				Sales por toda la probeta y en la cima, sobre todo en el cm 3. Cristales granulares.		

n° Pt: 35	L: 5-8	n° experimento: 6	Solución salina: MgSO ₄ · 7H ₂ O + Mg(NO ₃) ₂ (C)	Peso inicial: 158.80 g	Peso final: 178.52 g
-----------	--------	-------------------	--	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.00	27.30	25.60			
01.00	6.00	27.50	26.00			
04.00	9.00	25.90	25.80			
15.30	11.75	26.60	21.50			
16.15	11.75	26.70	21.90			
20.15	12.00	27.20	21.40			
23.00	12.00	27.20	21.40	Eflorescencias no visibles, pero apreciables al tacto.		
26.30	12.00	27.00	22.30			
28.00	12.00	26.90	22.90			
40.30	12.50	26.70	23.00		Probeta seca desde cm=10 por aristas, y desde cm=13 por caras: geometría de sales en arco.	Toda la solución queda en el cristalizador.
74.00				Sal como tapiz muy fino y muy húmedo.	Probeta fracturada en parte superior de una de las caras.	

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

n° Pt: 6 | L: 8-11 | n° experimento: 6 | Solución salina: $\text{NaNO}_3 + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ (C) | Peso inicial: 168.39 g | Peso final: 196.27 g

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.00	27.30	25.60			
01.00	6.00	27.50	26.00			
04.00	7.75	25.90	25.80			
15.30	13.00	26.60	21.50	Eflorescencias al tacto por toda la zona húmeda de la probeta. $\text{Cm}=2-2.5$, sales con morfología granular y muy húmedas.		
16.15	13.50	26.70	21.90			
20.15	14.00	27.20	21.40			
23.00	14.25	27.20	21.40	Sales preferentemente en una cara.		
26.30	14.50	27.00	22.30			
28.00	14.50	26.90	22.90			
40.30	15.00	26.70	23.00	Al tacto se aprecian sales por toda la probeta, pero sólo visibles en zona baja. Sales blandas, húmedas y granulares.	Probeta totalmente húmeda excepto los 4 vértices superiores. $\text{Cm}=15$, ha reventado una mancha color marrón, que puede corresponder a una acumulación de arcillas u óxido.	Queda casi toda la solución en el cristalizador.
74.00				Los 3 cm por encima de la parafina tienen eflorescencias de poco relieve. Hasta cm 9 las sales forman un tapiz. Por encima la superficie de la probeta es rugosa debido a la existencia de sales.		

n° Pt: 31 | L: 6-9 | n° experimento: 6 | Solución salina: $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ (D) | Peso inicial: 149.26 g | Peso final: 149.70 g

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	6.00	27.30	25.60			
01.00	9.00	27.50	26.00			
04.00	12.00	25.90	25.80			
15.30	15.00	26.60	21.50			Se ha consumido bastante solución del cristalizador.
16.15	15.00	26.70	21.90			
20.15	15.00	27.20	21.40			
23.00	15.00	27.20	21.40			Hay menos solución en el cristalizador que en la probeta ensayada con la correspondiente solución concentrada.
26.30	15.00	27.00	22.30			
28.00	15.00	26.90	22.90			
40.30		26.70	23.00	No hay desarrollo de eflorescencias.	La probeta está seca.	Quedan 2 mm de solución en el cristalizador.

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

Nº Pt: 39	L: 9-12	nº experimento: 6	Solución salina: MgSO ₄ 7H ₂ O + NaNO ₃ (C)	Peso inicial: 158.53	Peso final: 174.93
--------------	---------	-------------------	--	----------------------	--------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	3.50	27.30	25.60			
01.00	5.00	27.50	26.00			
04.00	8.00	25.90	25.80			
15.30	11.00	26.60	21.50	Aparecen a 0.5 cm por encima de la parafina formando un anillo alrededor de la probeta, Cubren toda la probeta pero son de escasa envergadura. Sales blancas, duras y granulares, poco abundantes (más en aristas). En caras las eflorescencias forman un arco.		
16.15	11.85	26.70	21.90			
20.15	11.50	27.20	21.40			
23.00	11.00	27.20	21.40	Aumento del desarrollo de las sales en una de las cara.		Queda bastante solución en el cristizador.
26.30	11.00	27.00	22.30			
28.00	11.00	26.90	22.90			
40.30	11.00	26.70	23.00	Sales blancas, duras y granulares. Desarrollo desigual en las distintas caras (espesor de 1 a 4 cm). En la parte mojada de la probeta se aprecian sales al tacto.		La migración de la solución por la probeta es inapreciable. Casi toda la solución queda en el cristizador.
74.00					La parte superior de la probeta ha reventado (fenómeno más notable que en las probetas nº6, nº15 y nº35, todas ellas con Mg).	

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

Nº Pt: 60	L: 6-9	nº experimento: 7	Solución salina: MgSO ₄ · 7H ₂ O + NaCl (D)	Peso inicial: 154.70 g	Peso final: 154.94 g
--------------	--------	-------------------	---	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	3.75		22.80			
01.00	6.00	27.60	23.20			
01.40	9.00	26.80	24.30			
04.00	10.80	26.70	26.10			
15.30	13.75	26.90	25.60			
16.15	14.00	27.30	25.60	No hay desarrollo de eflorescencias.		Queda la mitad de la solución en el cristizador.
18.00	14.25	27.80	25.70			
20.15	15.00	28.00	23.30			
23.00	15.00	28.00	23.90	No hay desarrollo de eflorescencias.		Quedan 3 mm en el cristizador.
26.30	15.00	27.90	25.30			
40.30	seca	27.50	27.70	No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta totalmente seca. Vértices amarilleados.	Queda 1 mm de solución en el cristizador.

nº Pt: 59	L: 6-9	nº experimento: 7	Solución salina: MgSO ₄ · 7H ₂ O + NaCl (C)	Peso inicial: 159.01 g	Peso final: 175.38 g
-----------	--------	-------------------	---	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.00	28.00	22.80			
01.00	5.50	27.60	23.20			
04.00	7.00	26.80	24.30			
15.30	12.90	26.70	26.10			
16.15	13.00	26.90	25.60	Sales 1 cm por encima de la parafina y en una banda de 2 cm de espesor. Las sales son traslúcidas y húmedas.		
18.00	14.00	27.30	25.60			
20.15	15.00	27.80	25.70		Sólo los vértices del cm 15 están secos.	
23.00	15.00	28.00	23.30	Aumento de sales, traslúcidas, húmedas, duras y granulares, formando un tapiz sin relieve. Más sales en algunas caras, que forman un arco en el centro de la cara hasta el cm 4.	La probeta se seca a partir del cm 11.	Casi toda la solución está en el cristizador.
26.30	11.00	28.00	23.90			
28.00	11.00	27.90	25.30			
40.30	11.00	27.50	27.70	Sales al tacto en la parte húmeda de la probeta.		Casi toda la solución permanece en el cristizador.
67.00	11.00	28.30	25.30			
76.00	11.00					

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

n° Pt: 64	L: 6-9	n° experimento: 7	Solución salina: Mg(NO ₃) ₂ (D)	Peso inicial: 152.48 g	Peso final: 153.16 g
-----------	--------	-------------------	--	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	7.00	28.00	22.80		La humedad dibuja un arco en la probeta.	
01.00	9.50	27.60	23.20			
01.40	12.50	27.60	23.90			
04.00	13.00	26.80	24.30			
15.30	15.00	26.70	26.10			
16.15	15.00	26.90	25.60			Menos de la mitad de la solución en el cristizador.
18.00	15.00	27.30	25.60			
20.15	15.00	27.8	25.7			
23.00	15.00	28.00	23.30			Quedan 4 mm de solución en el cristizador.
26.30	15.00	28.00	23.90			
40.30	seca	27.50	27.70	No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta totalmente seca.	Casi no queda solución en el cristizador.

n° Pt: 61	L: 12-15	n° experimento: 7	Solución salina: CaSO ₄ · 2H ₂ O + NaCl (C)	Peso inicial: 156.1 g	Peso final: 163.66 g
-----------	----------	-------------------	---	-----------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.25	28.00	22.80			
01.00	6.00	27.60	23.20			
01.40	8.00	27.60	23.90			
04.00	11.00	26.80	24.30			
15.30	13.00	26.70	26.10			
16.15	13.50	26.90	25.60	Sales en cm 2 que se unen en el centro de las caras en cm 4 formando un arco. Hasta el cm 11 las sales son traslúcidas, con morfología granular y apenas sin relieve. El desarrollo de sales es desigual según las caras.	Ultimos cms húmedos, pero sin desarrollo de sales.	Toda la solución está en el cristizador.
18.00	14.00	27.30	25.60			
20.15	15.00	27.8	25.70			
23.00	15.00	28.00	23.30	Las eflorescencias cristalizan hasta el cm 13.		Queda 1 cm de solución en el cristizador.
26.30	15.00	28.00	23.90			
40.30	15.00	27.50	27.70	Aumento de sales que forman un arco distinto según la cara de la probeta. Cristales granulares en zona baja, hacia arriba las sales forman una costra.	Abombamiento en zona superior y arenización.	Quedan 2 mm en el cristizador.
162.0	seca	28.00	22.70		Probeta totalmente seca.	

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

n° Pt: 62 | **L: 6-9** | **n° experimento: 7** | **Solución salina: CaSO₄ · 2H₂O + NaCl (D)** | **Peso inicial: 162.60 g** | **Peso final: 162.71g**

T (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	5.00	28.00	22.80			
01.00	5.85	27.60	23.20			
01.40	6.50	27.60	23.90			
04.00	7.00	26.80	24.30			
15.30	8.85	26.70	26.10			
16.15	9.00	26.90	25.60			Queda toda la solución en el cristalizador.
18.00	9.00	27.30	25.60			
20.15	9.00	27.8	25.70		Manchas marrones y puntos negros (arcillas y óxidos i)	
23.00	10.00	28.00	23.30			Queda 1 cm de solución en el cristalizador (menos de 1/3 del volumen inicial ensayado).
26.30	10.00	28.00	23.90			
40.30	11.00	27.50	27.70	No hay desarrollo de eflorescencias.		
162.0	seca	28.20	21.00		Probeta totalmente seca.	

n° Pt: 66 | **L: 6-9** | **n° experimento: 7** | **Solución salina: KCl (D)** | **Peso inicial: 156.51 g** | **Peso final: 156.74 g**

t (h)	H (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	3.60	28.00	22.80			
01.00	5.75	26.70	23.20			
01.40	10.00	27.60	23.90			
04.00	12.50	26.80	24.30			
15.30	15.00	26.70	26.10			
16.15	15.00	26.90	25.60	No hay desarrollo de eflorescencias.		Queda la mitad de la solución en el cristalizador.
18.00	15.00	27.30	25.60			
20.15	15.00	27.8	25.7			
23.00	15.00	28.00	23.30	No hay desarrollo de eflorescencias.		Quedan 3 mm en el cristalizador.
26.30	15.00	28.00	23.90			
28.00	15.00	27.90	25.30			
40.30	seca	27.50	27.70	No hay desarrollo de eflorescencias.	Probeta totalmente seca.	Casi no existe solución en el cristalizador.

Anexo III: Observaciones Realizadas en las Probetas de Calcarenitas sometidas al Experimento de Cristalización de Sales

n° Pt: 63	L: 7-10	n° experimento: 7	Solución salina: Mg(NO ₃) ₂ (C)	Peso inicial: 157.65 g	Peso final: 184.96 g
-----------	---------	-------------------	--	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	3.00	28.00	22.80			
01.00	3.50	27.60	23.20			
01.40	4.50	27.60	23.90			
04.00	6.25	26.80	24.30			
15.30	8.70	26.70	26.10	Encima de la parafina hay sales transparentes de morfología granular hasta el cm 3.		
16.15	9.25	26.90	25.60			
18.00	9.35	27.30	25.60			
20.15	10.00	27.8	25.7			
23.00	11.00	28.00	23.30			
26.30	11.50	28.00	23.90			
40.30	14.00	27.50	27.70	Eflorescencias en toda la superficie húmeda de la probeta. Sales muy cristalinas.	Empiezan a secarse las aristas de la probeta en cm 10; caras permanecen húmedas.	Casi toda la solución en el cristizador.
67.00	12.00	28.30	25.30		Probeta secando entre los cm 10 y 12.	Es el cristizador con mayor cantidad de solución remanente.
75.00	10.00	28.00	22.70	Parte baja de probeta: sales granulares, húmedas y pulverulentas. Hacia arriba forman una costra fina y dura.		Toda la solución permanece en el cristizador.
162.0	10.00	28.20	21.00		Todavía permanece húmeda la probeta.	

Cristalización de sales en calcarenitas: Aplicación al Monasterio de San Jerónimo, Granada

n° Pt: 65	L: 7-10	n° experimento: 7	Solución salina: KCl (C)	Peso inicial: 156.78 g	Peso final: 171.99 g
-----------	---------	-------------------	--------------------------	------------------------	----------------------

t (h)	h (cm)	T(°C)	HR (%)	Eflorescencias	Probetas de calcarenita	Otras observaciones
00.33	4.50	28.00	22.80			
01.00	6.00	27.60	23.20			
01.40	10.00	27.60	23.90			
04.00	11.00	26.80	24.30			
15.30	15.00	26.70	26.10			
16.15	15.00	26.90	25.60	Sales al tacto en toda la probeta. Las eflorescencias visibles tienen morfología granular, son húmedas y blandas, se desprenden con facilidad. Desarrollo desigual según caras. Probeta del experimento n°7 con más eflorescencias. Encima de la parafina cristalizan <i>wisker</i> rectos transparentes y muy finos.		Casi toda la solución en el cristizador.
20.15	15.00	27.80	25.70			
23.00	15.00	28.00	23.30	Diferentes morfologías según altura: * desde la parafina hay un tapiz húmedo. * sobre el tapiz y en las aristas hay cristales con hábito granular formando un arco. En 2 caras hay <i>wiskers</i> . * hacia arriba se forma una costra y después * sal cristalina, granular, dura pero frágil, que se desprenden al tacto.		Queda más de 1 cm de solución en el cristizador.
26.30	15.00	28.00	23.90			
28.00	15.00					
40.30	15.00	27.50	27.70	Sales por todas las caras (no forman arco), alternándose la costra con las morfologías granulares.		Menos de 1/3 de la solución ensayada permanece en el cristizador.
67.00		28.30	25.30			
75.00		28.00	22.70			
162.0		28.20	21.00		Probeta totalmente seca.	