

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

DEPARTAMENTO DE GEOLGÍA



TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES ROCAS
PLUTÓNICAS EMPLEADAS EN LA
CONSTRUCCIÓN Y RESTAURACIÓN DE
MONUMENTOS EN LA CIUDAD DE SALAMANCA**

María González Sánchez

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

DEPARTAMENTO DE GEOLGÍA

**ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES ROCAS
PLUTÓNICAS EMPLEADAS EN LA
CONSTRUCCIÓN Y RESTAURACIÓN DE
MONUMENTOS EN LA CIUDAD DE SALAMANCA**

Memoria presentada por MARÍA GONZÁLEZ SÁNCHEZ para optar al
Grado de DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

Salamanca, a de diciembre de 2015

D. Adolfo C. Íñigo Íñigo, Científico Titular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca (IRNASA)

CERTIFICA

que la presente memoria titulada “ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES ROCAS PLUTÓNICAS EMPLEADAS EN LA CONSTRUCCIÓN Y RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS EN LA CIUDAD DE SALAMANCA”, presentada por Dña. María González Sánchez, licenciada en Ciencias sección Geológicas, por la Universidad de Salamanca, para optar al Grado de Doctor por la Universidad de Salamanca ha sido realizada bajo su dirección en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Y para que así conste a los efectos legales, expide y firma el presente certificado en Salamanca, a de diciembre de 2015.

Fdo. Dr. Adolfo C. Íñigo Íñigo

D. Santiago Vicente Tavera, Profesor Titular del Departamento de Estadística de la Universidad de Salamanca

CERTIFICA

que la presente memoria titulada “ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES ROCAS PLUTÓNICAS EMPLEADAS EN LA CONSTRUCCIÓN Y RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS EN LA CIUDAD DE SALAMANCA”, presentada por Dña. María González Sánchez, licenciada en Ciencias sección Geológicas, por la Universidad de Salamanca, para optar al Grado de Doctor por la Universidad de Salamanca ha sido realizada bajo su dirección en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Y para que así conste a los efectos legales, expide y firma el presente certificado en Salamanca, a de diciembre de 2015.

Fdo. Dr. Santiago Vicente Tavera

D. Miguel López Plaza, Profesor Titular del Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca

CERTIFICA

que la presente memoria titulada “ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES ROCAS PLUTÓNICAS EMPLEADAS EN LA CONSTRUCCIÓN Y RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS EN LA CIUDAD DE SALAMANCA”, presentada por Dña. María González Sánchez, licenciada en Ciencias sección Geológicas, por la Universidad de Salamanca, para optar al Grado de Doctor por la Universidad de Salamanca ha sido realizada bajo su dirección en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Y para que así conste a los efectos legales, expide y firma el presente certificado en Salamanca, a de diciembre de 2015.

Fdo. Dr. Miguel López Plaza

D. Eloy Molina Ballesteros, Profesor Titular del Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca

CERTIFICA

que la presente memoria titulada “ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES ROCAS PLUTÓNICAS EMPLEADAS EN LA CONSTRUCCIÓN Y RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS EN LA CIUDAD DE SALAMANCA”, presentada por Dña. María González Sánchez, licenciada en Ciencias sección Geológicas, por la Universidad de Salamanca, para optar al Grado de Doctor por la Universidad de Salamanca ha sido realizada bajo la dirección de los Doctores Adolfo C. Íñigo Íñigo, Santiago Vicente Tavera y Miguel López Plaza en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Y para que así conste a los efectos legales, expide y firma el presente certificado en Salamanca, a de diciembre de 2015.

Fdo. Dr. Eloy Molina Ballesteros

María González Sánchez ha sido beneficiaria de una Beca de formación de doctores en Unidades Asociadas entre Universidades y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, convocatoria de 2002 (UA-BPD2002), durante el periodo 2002-2006, que se ha desarrollado en el seno de la Unidad Asociada «Química del Estado Sólido», constituida entre la Universidad de Salamanca y el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca (IRNASA/CSIC)

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación [CICYT (MAT2000-0972-C02-01), JCYL (CSI08/03) y MEC (MAT2004-04498)].

A mis padres

Con cariño

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado, de alguna manera, en la realización del presente trabajo

En primer lugar quisiera mostrar mi más sincero agradecimiento a mis directores de tesis, los doctores Adolfo Íñigo, Santiago Vicente y Miguel López, por su dedicación, trabajo, orientación y seguimiento a lo largo de la elaboración de este proyecto, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de todos estos años, por no permitirme abandonar y por tener la paciencia y la suficiente fe en mí que yo a veces no he tenido.

También quiero dar las gracias a mi tutor en la Universidad de Salamanca, Eloy Molina, por animarme y motivarme a emprender el camino por la senda de la “restauración” de las “rocas cocidas”.

De manera especial quiero dar las gracias a José Ignacio García de Los Ríos y a la empresa SIEMCALSA. Gracias por su tiempo, sus conocimientos y su generosidad al compartirlos de forma abierta y desinteresada. La información aportada ha ayudado en gran manera a la conclusión de este trabajo.

Quisiera agradecer también a Javier López Moro la aportación desinteresada de datos petrogenéticos sobre vaugneritas, ayudando a completar este estudio.

Gracias a los dueños de las explotaciones agrícolas que actualmente ocupan el área de las canteras de Martinamor y Calzadilla del Campo, por permitirme trabajar allí siempre que lo he necesitado.

De manera especial quiero dar las gracias al personal del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, en especial a M^a Carmen Jiménez por su atención y colaboración en el análisis de las muestras de MEB.

Me gustaría agradecer a todos los que pasaron mi etapa de becaria predoctoral en IRNA conmigo, compartiendo buenos y malos ratos: Elena, Diego, Aitor, Sergio, María, Salud, Cristina, mi Marta, Nando, Rebeca, Clarisa, Silvia, Yolanda, Ángel, Sonia y todos los que pasaron de forma temporal. A todos gracias, la vida en el IRNA no habría sido igual sin vosotros.

A todos los compañeros del IGME que siempre entendieron y apoyaron mi otro trabajo, permitiéndome seguir adelante.

A mi nueva familia en el IRNA: Ricardo, Rocío, Raúl, Ana O., Mar y los chicos, que con tanto cariño me han acogido, animándome en todo momento a terminar la

tesis. A los que volaron del nido, pero siguen estando conmigo: Anita, Vero, Edu, Jose, Olga, Isa, por su apoyo y su amistad, por esos buenos ratos y por haber estado en los peores momentos.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a todo el personal de "la casa", a los que tanto me han ayudado con los ensayos (Jose Manuel, Ángel), a los que te echan la mano con el ordenador o la bibliografía, los que te escuchan y se toman un café contigo o los que simplemente están para hacerte el día a día más llevadero, "haciendo centro". Gracias a todos.

Quiero dar las gracias a mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de estos años, por preguntar poco por la tesis, pese a desear lo contrario, por estar siempre a mi lado y hacer que sea la persona, con mis defectos y virtudes, que hoy soy.

Por último quiero dar las gracias a mis hermanos, correctores accidentales que llevan años aguantando mis idas y venidas "tesineras" siempre con palabras de ánimo. Gracias también a Jose, el hombre con más paciencia en la tierra, que durante estos años ha sufrido todo el proceso de elaboración de la tesis, acompañándome y aguantándome en los momentos buenos y malos, animándome siempre a terminar y avanzar en el camino.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS | 1 |
| 1.1. Síntesis de monumentos y monumentos piloto seleccionados | 4 |
| 1.2. El entorno climático y las patologías en la piedra | 23 |
| 1.3. Actuaciones sobre los materiales pétreos..... | 35 |
| 1.4. Objetivos | 41 |
| 2. MATERIALES Y MÉTODOS | 43 |
| 2.1. Materiales empleados: muestreo y preparación..... | 45 |
| 2.2. Caracterización petrológica y mineralógica..... | 51 |
| 2.2.1. Microscopía óptica..... | 51 |
| 2.2.2. Difracción de rayos-X (DRX) | 52 |
| 2.2.3. Microscopía óptica de barrido (MEB) | 52 |
| 2.3. Caracterización química..... | 53 |
| 2.3.1. Elementos mayores y traza | 53 |
| 2.3.2. Estudio isotópico | 54 |
| 2.3.3. Determinación de aniones y cationes solubles en agua..... | 55 |
| 2.4. Estudio de la porosidad..... | 56 |
| 2.4.1. Porosidad total accesible al agua, Porosidad libre y Coeficiente de Absorción | 57 |
| 2.4.2. Porosimetría de mercurio | 60 |
| 2.5. Propiedades Petrofísicas determinadas en agua..... | 65 |
| 2.5.1. Densidad real y aparente | 66 |
| 2.5.2. Capacidad de imbibición | 66 |
| 2.5.3. Permeabilidad al vapor de agua | 67 |
| 2.5.4. Coeficiente de absorción capilar..... | 69 |
| 2.6. Análisis del color | 72 |
| 2.7. Velocidad de propagación de ultrasonidos | 75 |
| 2.8. Envejecimiento artificial acelerado..... | 76 |
| 2.8.1. Envejecimiento por hielo/deshielo junto con frío/calor..... | 78 |
| 2.8.2. Envejecimiento por cristalización de sales | 79 |

| | |
|---|------------|
| 2.8.3. Envejecimiento combinado por hielo/deshielo junto con frío/calor y cristalización de sales | 80 |
| 2.9. Tratamientos | 80 |
| 2.9.1. Limpieza | 83 |
| 2.9.2. Consolidación | 84 |
| 2.9.3. Protección | 85 |
| 2.10. Metodología estadística..... | 86 |
| 2.10.1. Introducción al Biplot: Métodos Biplot clásicos | 87 |
| 2.10.2. Clasificación (Método de Inercia basado en una representación factorial HJ-biplot) | 89 |
| 2.10.3. Biplot Canónico | 90 |
| 3. LOS FACTORES GEOLÓGICOS DEL MATERIAL PÉTREO | 93 |
| 3.1. Las rocas vaugneríticas | 96 |
| 3.1.1. Situación geológica y geología de campo. | 96 |
| 3.1.2. Caracterización Mineralógica y Petrológica..... | 104 |
| 3.1.3. Caracterización Geoquímica. | 113 |
| 3.2. Leucogranito Turmalinífero de Martinamor..... | 122 |
| 3.2.1. Situación geológica y geología de campo. | 122 |
| 3.2.2. Caracterización Mineralógica y Petrológica..... | 131 |
| 3.2.3. Caracterización Geoquímica. | 135 |
| 3.3. Granito de Los Santos | 142 |
| 3.3.1. Situación geológica y geología de campo. | 142 |
| 3.3.2. Caracterización Mineralógica y Petrológica..... | 146 |
| 3.3.3. Caracterización Geoquímica. | 150 |
| 3.4. Caracterización petrofísica | 155 |
| 4. IDENTIFICACIÓN DE LAS CANTERAS HISTÓRICAS | 159 |
| 4.1. Método Histórico: Documentación histórica de las canteras | 161 |
| 4.2. Método Geológico-Litológico | 164 |
| 4.3. Método Geológico-Geoquímico: empleo de los Elementos Mayores | 165 |
| 4.3.1. Aplicación del diagrama de clasificación Q'-ANOR | 165 |
| 4.3.2. Aplicación del Método de Inercia basado en una representación HJ-Biplot | 168 |
| 4.4. Método Geológico-Geoquímico: empleo de los Elementos Traza | 180 |

| | |
|--|------------|
| 5. DURABILIDAD DE LOS MATERIALES Y ENSAYOS DE CONSERVACIÓN..... | 193 |
| 5.1. Determinación de la durabilidad de la roca de cantera | 195 |
| 5.1.1. Envejecimiento por hielo/deshielo junto con frío/calor (HD) | 196 |
| 5.1.2. Envejecimientos con cristalización de sales..... | 206 |
| 5.2. Determinación de la eficacia de los tratamientos de conservación..... | 221 |
| 5.2.1. Limpieza | 222 |
| 5.2.1. Hidrofugación..... | 223 |
| 5.2.1. Consolidación | 235 |
| 5.2.1. Consolidación+hidrofugación | 242 |
| 5.3. Determinación de la durabilidad de los tratamientos de conservación | 249 |
| 5.3.1. Durabilidad del hidrofugante | 250 |
| 5.3.1. Durabilidad del consolidante | 260 |
| 5.3.1. Durabilidad del consolidante con hidrofugante | 268 |
| 6. ANIONES SOLUBLES EN AGUA PRESENTES EN LOS MONUMENTOS..... | 275 |
| BIBLOGRAFÍA..... | 305 |
| ANEXO | 329 |

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La rehabilitación de los edificios construidos en piedra, que forman parte del Patrimonio Histórico de nuestro país, ha llegado a ser una actividad de gran trascendencia cultural, de ahí el gran interés que tiene realizar estudios de investigación sobre la «piedra natural» (término aplicado a rocas que han sido extraídas de canteras para su utilización en la construcción o uso industrial). Un buen inventario de la piedra natural, especialmente de la «piedra de cantería», puede resolver muchos problemas relacionados con la restauración, sobre todo en aquellos monumentos que se construyeron con piedra procedente de canteras que en la actualidad, por diversos motivos, ya no se explotan.

En el trabajo desarrollado, como objetivo fundamental, se ha pretendido ampliar el conocimiento de nuestro grupo de investigación sobre la naturaleza y el comportamiento, ante las condiciones ambientales, de distintos tipos de granitos y rocas relacionadas empleadas en la construcción, ornamentación y/o restauración de algunos de los monumentos de interés histórico-artístico de la Comunidad Autónoma de Castilla y León.

El estudio se ha centrado en la ciudad de Salamanca, cuyo centro histórico es Patrimonio de la Humanidad desde 1988 (UNESCO, 1988), y en concreto, en tres monumentos que han sido, a lo largo de su historia, objeto de varias actuaciones de restauración, como son: la Plaza Mayor, el Conjunto Catedralicio y el Puente Romano. Se han identificado los distintos materiales graníticos (y rocas relacionadas) empleados en los mismos, y de entre ellos, se han seleccionado tres, el leucogranito de Martinamor, el granito de Los Santos y la vaugnerita de Calzadilla del Campo.

El principal motivo de la selección de los materiales graníticos es que fueron empleados ampliamente en la base y zócalos de los monumentos, puertas y ventanas (dinteles y jambas), columnas, dovelas, losas, peldaños, etc. De todos estos usos, el más relevante es el empleo en los zócalos, debido a su alta resistencia, densidad y bajos coeficientes de absorción (Puche Riart y González Aguado, 1992).

Originalmente, en la Ciudad de Salamanca, los zócalos de muchos edificios estaban construidos en «piedra tosca» o en «piedra franca», tal como señala Rodríguez G. de Ceballos (1991) para la Plaza Mayor. Estas piedras se arenizan fácilmente por el ascenso capilar de agua, motivo por el cual las rocas graníticas, más duras y menos porosas, se emplearon para sustituirlas, evitando el desgaste de los zócalos y el consiguiente desmoronamiento de los muros.

Pese a que los granitos *s.l.* son rocas más resistentes, también están sometidos a una degradación o alteración por el simple hecho de no encontrarse en las mismas condiciones que presidieron su génesis, y, sobre todo, por la presencia de agua, en sus diferentes estados, indispensable para el desarrollo de las reacciones químicas (Pédro, 1993). La consecuencia directa de este proceso es la alteración de las rocas una vez

colocadas en el edificio y manipuladas por el hombre, lo que entendemos como «piedra». Tal alteración se puede manifestar de muchas formas, tales como: creación de fisuras, aumento de la porosidad y permeabilidad, desplazaciones, pérdida de partículas (arenización o *sand desintegration*), etc., procesos todos ellos normalmente acompañados de transformaciones mineralógicas y neogénesis de minerales, seguido de la pérdida de cohesión de la roca (Delgado Rodrigues, 1996).

La presencia de estas patologías justifica el estudio de las actuaciones de conservación destinadas a restablecer las características originales de la piedra en la edificación en la que está empleada. Las actuaciones de conservación más habituales son: limpieza, consolidación, protección y reposición. De esta forma, se aplican una serie de tratamientos sobre materiales pétreos, determinando su eficacia, durabilidad e idoneidad con el fin de establecer la metodología de conservación más adecuada para cada material en las condiciones ambientales en que está, o va a ser situado.

1.1 SINTESIS DE MONUMENTOS Y MONUMENTOS PILOTO SELECCIONADOS

El estudio sistemático llevado a cabo por López Plaza *et al.* (2007a); López Plaza *et al.* (2007b); López Plaza *et al.* (2009) en la ciudad de Salamanca y su provincia ha permitido la elaboración de un registro de monumentos parcialmente construidos con piedra de Calzadilla, de Martinamor y de Los Santos (Tablas 1.1, 1.2 y 1.3, respectivamente), contabilizándose una treintena de monumentos en piedra Vaugnerita, unos cuarenta en piedra de Martinamor, y en torno a cincuenta en granito de Los Santos. Entre ellos, cabe destacar los elegidos para este estudio como monumentos «piloto», por presentar los tres tipos de rocas aquí citadas en cada uno de ellos.

Las rocas plutónicas de naturaleza intermedia y básica, como dioritas o gabros, son prácticamente inexistentes en los monumentos (Aires-Barros, 2001), debido a la escasa proporción de los afloramientos naturales que no sobrepasan el 4 % del total de las rocas plutónicas (Villaseca *et al.*, 1998; López Moro y López Plaza, 2004), razón por la cual la utilización de rocas de composición diorítica *s.l.* y textura vaugnerítica como las vaugneritas de Calzadilla es muy singular (López Plaza *et al.*, 2007a).

Tabla 1.1. Síntesis de los principales monumentos de Salamanca construidos parcialmente con rocas vaugneríticas.

| <i>Monumento</i> | <i>Edad y estilo</i> | <i>Arquitectos</i> | <i>Elemento Arquitectónico</i> | <i>Referencias</i> |
|---|---|---|---|---|
| Sala de exposiciones de las Escuelas menores | 1533 Plateresco | | Columnas pareadas | Martínez Frías (1990); Nieto González (2004); Núñez Paz <i>et al.</i> (2001) |
| Atrio del Palacio de Fonseca | 1559 Renacentista | | Parcialmente en algunas columnas | Sendín Calabuig (1977); Castro Santamaría (1999) |
| Palacio de Monterrey | s. XVI | | Basamento y sillares en esquinas | Álvarez Villar (2003); Urrea <i>et al.</i> (2002) |
| Palacio de Orellana | 1566 - 1577 Renacentista purista | R. Gil de Hontañón, Juan de Rivero Roda y Martín Navarro | Jambas y dintel, algunas hiladas en el basamento, claustro | Rodríguez G. de Ceballos (2005a); Urrea <i>et al.</i> (2002) |
| Colegio de S. Pelayo | 1573-1595 Renacentista | R. Gil de Hontañón Pedro de Gamboa | Portada: Jambas y dintel. Claustro: Chimenea y capiteles | Rodríguez G. de Ceballos (2005a); Cortázar Estíbaliz (2002) |
| Parroquia de S. Martín (portada sur) | 1582-1586 Románico - Renacentista - Barroco | Francisco Viloría, Francisco Montero y R. Gil de Hontañón | Basamento y basa de columnas entregadas de la fachada sur | Andrés Ordax <i>et al.</i> (1995); Madruga Real (2005); Núñez Paz <i>et al.</i> (2001) |
| Convento S. Esteban. Atrio, pórtico y puente. | 1590 - 1592 Renacentista | Juan de Ribero Rada | 10 columnas y portada. 2 columnas en el puente | Rodríguez G. de Ceballos (1987); Sastre Varas (2001) |
| Logia de S. Román | Finales s. XVI | | 16 columnas | Álvarez Villar (2003); Martín Hernández (1992) |
| Teatro del Hospital (Bretón) | Finales s. XVI - s. XIX | Juan de Sagarvinaga Tomás Cafranga | 3 hileras en basamento | Díez Elcuaz (2003) |
| Fachada de la Iglesia Clerecía | 1618 - 1653 Barroco | Juan Gómez de Mora, Pedro Mato y Juan Moreno. | Puertas de la Iglesia y de S. Isidoro. Basamento | Rodríguez G. de Ceballos (1976, 1985b); Álvarez Villar (1999); |
| Claustro de los estudios de la Clerecía | 1617 - 1754 Barroco | Juan Gómez de Mora y otros | Brocal del pozo y alfeizar de los vanos | Rodríguez G. de Ceballos (1985b, 2005a) |
| Puente romano (restauración) | 1622 - 1677 | Juan de Sagarvinaga J. García de Quiñones | 10 arcos, 2 pilastras de planta romboidal en la entrada sur | Núñez Paz <i>et al.</i> (2001); Vaca Lorenzo <i>et al.</i> (2005); Jiménez Fuentes y Martín de Jesús (1992) |
| Sacristía y sala capitular del Convento de S. Esteban | 1627 - 1634 Barroco | Juan Moreno Alonso Sardiña | Basamento de interiores | Rodríguez G. de Ceballos (1987) |
| Atrio de la Clerecía | 1682 - 1779 Barroco | Juan de Setién Güemes | Columnas y escalinata | Rodríguez G. de Ceballos (1985b) |

Tabla 1.1. Continuación

| <i>Monumento</i> | <i>Edad y estilo</i> | <i>Arquitectos</i> | <i>Elemento Arquitectónico</i> | <i>Referencias</i> |
|--|--|---|--|---|
| Catedral Vieja. Reconstrucción | 1680 Barroco | Juan de Setién Güemes | Portada del poniente con arco de medio punto | Castro Santamaría (2003); Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Isla de los cajones firmes | 1691 - 1692 | | Pilares ochavados con capiteles | Rupérez (1992) |
| Puerta de los Ramos de la Catedral Nueva. Restauración | Finales s. XVII Gótico reminiscente | | Basamento en la portada | Rodríguez G. de Ceballos (1994); Rodríguez G. de Ceballos (2005a); Sánchez y Sánchez (1993) |
| Iglesia de la Veracruz. Restauración | 1713 - 1714 Barroco | J. de Churriguera | Basamento | Casaseca Casaseca (1988); Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Seminario de Calatrava | 1717 - 1790 Barroco | J. de Churriguera A. de Churriguera J. García de Quiñones | Portada con columnas, de 9 a 11 hiladas del basamento, basas de 20 columnas del claustro | Rodríguez G. de Ceballos (2005a); Azofra Agustín (1999) |
| S ^a M ^a de los Caballeros. Restauración | s. XVI - XVII? Barroco | Domingo de Lasarte R. Gil de Hontañón | Portada reconstruida | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Hospedería de Anaya | 1715 Barroco | J. de Churriguera | Columnas y brocal del pozo | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Colegio de Cuenca | 1726 Barroco | A. de Churriguera | Portada y escalera | Castro Santamaría y Rupérez Almajano (1993) |
| Plaza Mayor. Lienzo de San Martín | 1729 - 1735 Barroco | A. de Churriguera A. García de Quiñones | Basamento en el arco de S. Martín y 3 hiladas en Poeta Iglesias | Rupérez (1992) |
| Casa de Santiago González | 1741 | | 3 hiladas del basamento | |
| Campo de S. Francisco | 1616, 1787 y s. XIX | Juan Moreno y otros | Asientos de los bancos y columna con escudo | Rupérez (1992); Rodríguez G. de Ceballos (2003b) |
| Siervas de S. José (antiguo hospital general) | Comienzos s. XVIII | | Escalinata en el Zaguán | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Plaza Mayor, Ayuntamiento | 1751 - 1756 Barroco | A. de Churriguera A. García de Quiñones | Basamento y arcada, frisos y cornisas | Rodríguez G. de Ceballos (1991, 2003a, 2005b, 2005a) |
| Torres de la Clerecía | 1754 Barroco | A. García de Quiñones | Cornisas y platabandas | Rodríguez G. de Ceballos (1985b) |
| Atrio de la Catedral Nueva | s. XVIII | | 29 columnas | Rupérez (1992) |
| Plaza de Colón | s. XIX | | Pie de figuras decorativas | Rodríguez G. de Ceballos (2003b); Madruga Real (2005) |
| Plazas de Los Bandos y La Libertad | 1869 | | Asientos de los bancos | Rodríguez G. de Ceballos (2003b); Madruga Real (2005) |

Tabla 1.2. Síntesis de los principales monumentos de Salamanca construidos parcialmente con granito turmalinífero de Martinamor.

| <i>Monumento</i> | <i>Edad y estilo</i> | <i>Arquitectos</i> | <i>Elemento Arquitectónico</i> | <i>Referencias</i> |
|--|--|--|--|--|
| Toro Ibérico | Pre - romano | | | Benet (1999) |
| Puerta de río de la muralla | Tardo - romana | | Bloques aislados en las hiladas inferiores | Núñez Paz <i>et al.</i> (2001) |
| Catedral Nueva | 1513 Gótico | Juan de Álava | Basamento de la portada | Sánchez y Sánchez (1993); Rodríguez G. de Ceballos (1994) |
| Puente romano. Restauraciones | 1532, 1677, 1722, 1768, 1802 | Canteros: Juan de Negrete y Martín de Sarasola. J. de Churriguera, J. García de Quiñones y Juan de Sagarvinaga | Enlosado | Rupérez (1992); Vaca Lorenzo <i>et al.</i> (2005) |
| Iglesia de S. Esteban | 1524 - 1533 Plateresco | Juan de Álava Fray Martín de Santiago, otros | Basamento de la portada | Rodríguez G. de Ceballos (1987); Sastre Varas (2001); Castro Santamaría (2002) |
| Dominicos, Claustro de los Aljibes | Finales s. XV, principios s. XVI Gótico - Renacentista | | Enlosado parcial del patio en cintas | Rodríguez G. de Ceballos (1987); Espinel (1995); Álvarez Villar (1998, 2003) |
| Palacio de Castellanos. Restauración | s. XVI Renacentista | | Basas de columnas y escalinatas | Casaseca Casaseca (2002) |
| Colegio del Arzobispo Fonseca | 1521-1534 Renacentista 1559 atrio | Juan de Álava y otros | Bloques aislados en puertas del claustro, 4 fustes en el atrio | Sendín Calabuig (1977); Castro Santamaría (1999, 2002); Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Iglesia de S. Martín | 1582 - 1586 Románico - Barroco - Renacentista | Francisco Vitoria Francisco Montero | Escalinata del atrio | Núñez Paz <i>et al.</i> (2001); Madruga Real (2005); Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Claustro de los Reyes de S. Esteban. Restauración | 1594 - 1595 Gótico - Renacentista 1737 pavimentación | Martín de Santiago Agustín de Vargas | Basas de 8 pilastras. Pavimentación diseño diagonal | Rodríguez G. de Ceballos (1987); Espinel (1995); Álvarez Villar (1998) |
| Facultad de derecho (hoy, de Traducción) | Renacentista. Neoclásico (reedificado en 1948) | Genaro de No | Basamento | Paliza Monduate y Senabre López (2004) |
| Convento de Madre de Dios | 1609 | Diego y Juan del Pozo | Bloques en el basamento | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |

Tabla 1.2. Continuación I

| <i>Monumento</i> | <i>Edad y estilo</i> | <i>Arquitectos</i> | <i>Elemento Arquitectónico</i> | <i>Referencias</i> |
|--|----------------------------------|--|---|--|
| Convento de los Trinitarios (hoy juzgados) | 1625 | Francisco de Mora | Basas de 11 pilastras en el claustro | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Sacristía de S. Esteban | 1627 - 1634 Barroco | Juan Moreno Alonso Sardina | Bloques aislados en la base de los altares laterales | Rodríguez G. de Ceballos (1987) |
| Iglesia de las Agustinas (Purísima) | 1638 - 3747 Renacimiento | Juan de Setién Güemes Antonio de Carasa y otros | Bloques en el pórtico. Gradas en los altares | Madruza Real (1983) |
| Iglesia del Colegio de S. Elías | 1690 - 1703 | Antonio de Jesús María | 1 hilada en el basamento | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Hospedería de Anaya | 1715 Renacentista | J. de Churriguera | Enlosado del claustro, alas NO y NE | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Fachada de la Hospedería del Colegio Fonseca | 1740 - finales s. XVIII | A. de Churriguera A. García de Quiñones Juan de Sagarvinaga | Marco de la puerta principal | Rodríguez G. de Ceballos (1968b) |
| Plaza Mayor | 1729 - 1756 Barroco | A. de Churriguera A. García de Quiñones Juan de Sagarvinaga | Base de las columnas del Pabellón Real; pórtico de la Plaza del Mercado. Enlosado | Rodríguez G. de Ceballos (2003a, 2005b, 2005a) |
| Claustro de los Estudios (Univ. Pontificia) | 1754 - 1762 Barroco | A. García de Quiñones | Enlosado interior y en la galería Norte | Rodríguez G. de Ceballos (1968a) |
| Capilla de las Escuelas Mayores | 1761 - 1767 | Simón Gavilán Tomé Juan de Sagarvinaga J. García de Quiñones | 9 hiladas de bloques. Enlosado central de la capilla | Rodríguez G. de Ceballos (1981); Nieto González (2004) |
| Torre de la Catedral Nueva. Restauración | 1768 - 1769 | J. García de Quiñones Manuel de los Ríos | Basamento del refuerzo externo con hiladas en declive hasta 3,36 m. | Rodríguez G. de Ceballos (1978); Sánchez y Sánchez (1993) |
| Catedral Vieja. Restauración | 1768 - 1769 | | Basamento de los muros Q y S | Sánchez y Sánchez (1991) |
| Colegio de Calatrava | 1717 - 1777 Barroco | Pantaleón de P. Setién J. de Churriguera | Escalinata exterior y enlosado del claustro | Azofra Agustín (1999); Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Colegio de la Compañía de Jesús (Maestro Ávila) | 1553, 1585, 1818 (reedificación) | Guissepe Valeriani, Juan de Herrera y Juan de Nantes | 20 basas de las columnas del claustro. Basamento exterior | Rodríguez G. de Ceballos (1966); Álvarez Villar y Sierra Puparelli (2000) |
| Numerosas calles de la ciudad | 1787 - 1800, s. XIX y 1921 | J. García de Quiñones, otros | Enlosado | Rodríguez G. de Ceballos (1975); Rupérez (1992); Rodríguez G. de Ceballos (2003a); Rupérez Almajano (2003) |

Tabla 1.2. Continuación II

| <i>Monumento</i> | <i>Edad y estilo</i> | <i>Arquitectos</i> | <i>Elemento Arquitectónico</i> | <i>Referencias</i> |
|--|---------------------------------|---|---|---|
| Fuentes públicas | ss. XVIII y XIX | | Pilas circulares | Rupérez (1992) |
| Colegio de Anaya o de S. Bartolomé | 1762 - 1778 Neoclásico | José Hermosilla Juan de Sagarvinaga J. García de Quiñones | Exterior: escalinata, enlosado, frontón, 4 columnas, marcos y entablamento. Claustro: entablamento, 32 columnas, escalera | Falcón (1867); Nieto González (2003); Rodríguez G. de Ceballos (2003b) |
| Claustro antiguo Hospital General (hoy, Siervas) | 1875 Plateresco Remodelación | | Bloques del basamento del brocal centras | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Monumento a Fray Luis de León | 1868 | Nicasio Sevilla | Basamento | Villar y Macías (1887) |
| Ampliación Univ. Salamanca | 1879 | José Secall | Basamento de la fachada de la Plaza de Anaya | Nieto González (2004) |
| Palacio de Montellano. Restauración | s. XIX | | Muros de mampostería en el Claustro | Álvarez Villar (2003) |
| Palacio Episcopal | 1886-1889 Pseudoclásico | José Secall | 4 hiladas del bloques en basamento | Paliza Monduate (1999) |
| Monumento a Cristóbal Colón | 1892 | Eduardo Barrón González | Basamento | Díez Elcuaz (2003); Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Iglesia de S. Juan de Sahagún | 1891 - 1896 Revivalista | Joaquín de Vargas | Basamento | Díez Elcuaz (2003); Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Convento de las Siervas | 1897 | Pedro Vidal | | Díez Elcuaz (2003) |
| Casa Lis | 1905 Modernista | Joaquín de Vargas | Escalinata de la fachada sur | Díez Elcuaz (2003) |
| Palacio de la Salina. Restauración | 1881 - 1884 Renacentista | José Secall | Basamento, solería y escalinata | Álvarez Villar (1984) |
| Escuelas Mayores. Restauración | s. XIX o principios s. XX | José Secall | Basamento | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Colegio de S. Millán. Restauración | s. XIX o principios s. XX | | Basamento | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| La Clerecía. Restauración | s. XIX o principios s. XX | | Basamento en la calle Compañía | Díez Elcuaz (2003) |

Tabla 1.2. Continuación III

| <i>Monumento</i> | <i>Edad y estilo</i> | <i>Arquitectos</i> | <i>Elemento Arquitectónico</i> | <i>Referencias</i> |
|---|---|---|--------------------------------|--|
| Patio de Escuelas. Restauración | s. XIX o principios s. XX | José Secall | Basamento | Nieto González (2004) |
| Edificios particulares relevantes intramuros | Finales s. XIX - principios s. XX Revivalista, modernista | Joaquín de Vargas, Enrique M. Repullés, Santiago Madrigal y otros | Basamento, generalmente | Casaseca Casaseca (1999); Díez Elcuaz (2003) |
| Edificio de la S.S. en Plaza los Bandos | 1932 Neorrenacentista y neobarroco | José Secall | Basamento y cimientos | Casaseca Casaseca (1999); Díez Elcuaz (2003) |

Tabla 1.3. Síntesis de los principales monumentos de Salamanca construidos parcialmente con granito de Los Santos.

| <i>Monumentos</i> | <i>Edad y Estilo</i> | <i>Arquitectos</i> | <i>Elementos Arquitectónicos</i> | <i>Referencias</i> |
|---|--------------------------------------|--------------------|--|---|
| Verracos y Miliarios romanos | Pre - romano y romano | | (algunos se conservan en el Museo de Bellas Artes) | Benet (1999); Bueno Hernández (2002); Gillani <i>et al.</i> (2007) |
| Puente Romano | 98 - 118 d.C. Romano | | Los 15 arcos más próximos a la ciudad (pilas rectangulares, dovelas, tajamares y molduras) | Jiménez Fuentes y Martín de Jesús (1992); Núñez Paz <i>et al.</i> (2001); Vaca Lorenzo <i>et al.</i> (2005) |
| Cerca Vieja de la muralla | Tardo-romana | | Hiladas inferiores de bloques | Martín Valls <i>et al.</i> (1991); Núñez Paz <i>et al.</i> (2001) |
| Alcázar de San Juan | s. XII y 1280 | | Sillares en las esquinas | Martín Valls <i>et al.</i> (1991); Jimiménez García (2003) |
| Hospital de Estudio | 1472 - 1474 Gótico | Ruiz de Camargo | Columna central en la puerta a modo de mainel | Álvarez Villar (2001); Nieto González (2004) |
| Palacio de Abrantes | Finales s. XV. | | Basas en 5 columnas en patio porticado | Casaseca Casaseca (2002) |
| Casa de Álvarez Abarca (actual museo de Bellas Artes) | 1507 - 1521 Gótico - renacimiento | Michel de Gaybar | 7 basas ochavadas de las columnas del claustro | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Casa de las Conchas | 1493 Gótico - renacimiento | | Escalera en el claustro | Álvarez Villar (2002) |

Tabla 1.3. Continuación I

| <i>Monumentos</i> | <i>Edad y Estilo</i> | <i>Arquitectos</i> | <i>Elementos Arquitectónicos</i> | <i>Referencias</i> |
|--|---|--|---|--|
| Casa de Gonzalo de Ovalle (hoy, desaparecida) | 1524 | Juan de Álava | Escaleras | Castro Santamaría (2002) |
| Escuelas Mayores | 1512 - 1529 Gótico - plateresco | Juan de Álava | Basa de la columna central de la fachada, escalinatas y enlosado del claustro. | Álvarez Villar (2001); Castro Santamaría (2002); Nieto González (2004); Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Escuelas Menores-portada | 1526 | Juan de Álava | Columna central y columnas en el zaguán | Álvarez Villar (2001); Nieto González (2004) |
| Escuelas Menores-claustro | 1528 - 1533 | Juan de Álava | 28 columnas monolíticas, enlosado | Castro Santamaría (2002) |
| Catedral Nueva | 1513 - Gótico | Juan de Álava | Basa de la columna central | Rodríguez G. de Ceballos (1994) |
| Convento de la Victoria (hoy desaparecido) | 1528 | Juan de Álava | Escalera principal | Martínez Frías (1990); Castro Santamaría (2002) |
| Colegio del Arzobispo Fonseca | 1521 - 1534. Renacentista 1559 (atrio) | Juan de Álava, Diego de Siloé R. Gil de Hontañón | Dinteles y columnas, basas de 32 columnas del claustro, escalinatas, enlosado y brocal del pozo | Sendín Calabuig (1977); Castro Santamaría (1999, 2002); Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Colegio S ^o Domingo de la Cruz | 1538 Gótico-renacimiento | | 6 basas góticas | Álvarez Villar (2003) |
| Iglesia de Bernardas de Jesús (Los Escolapios) | 1552 Renacentista | R. Gil de Hontañón | Pedestales de las columnas de la portada | Casaseca Casaseca (1988) |
| Colegio Huérfanos de la Concepción | 1552 - 1555 Renacentista | R. Gil de Hontañón | Pedestales de la portada, escalinatas y basas de 20 columnas del claustro (restauración) | Casaseca Casaseca (1988); Rupérez Almajano (1992) |
| Iglesia de la Veracruz | 1565 Renacentista - Barroco | Martín Navarro, R. Gil | Basamento | Casaseca Casaseca (1988); Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Palacio de San Boal (Arias Corvelle) | 1470 - s. XVI (claustro) - s. XVIII Gótico - Renacentista | Gome G. de Herrera | 18 columnas (basas y fustes) de las cuales 10 fueron restauradas, enlosado. | Núñez Paz <i>et al.</i> (2001); Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| S. Esteban. Escalera de Soto | 1553 - 1556 | R. Gil de Hontañón | Gradas enterizas | Casaseca Casaseca (1988); Castro Santamaría (1999) |
| Claustro de los Reyes del convento de S. Esteban | 1528 - 1595 Gótico - Renacentista. 1737 (pavimento) | Martín de Santiago Agustín de Vargas | Enlosado con diseño en losange | Rodríguez G. de Ceballos (1987); Espinel (1995) |

Tabla 1.3. Continuación II

| <i>Monumentos</i> | <i>Edad y Estilo</i> | <i>Arquitectos</i> | <i>Elementos Arquitectónicos</i> | <i>Referencias</i> |
|---|---|--|--|---|
| Palacio de La Salina | 1546 Plateresco | R. Gil de Hontañón | Columnas de la portada, basamento y basas de las columnas del patio. | Álvarez Villar (1984) |
| Iglesia S ^a M ^a de Los Caballeros | 1551 - 1586 (restauración antigua) | Domingo de Lasarte R. Gil de Hontañón | Jambas de la portada | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Palacio de Orellana | 1566 - 1577 Renacentista purista | R. Gil de Hontañón Juan de Ribero Martín Navarro | Basamento de la portada, junto con piedra vaugnerítica | Casaseca Casaseca (1988, 2002); Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Colegio del Trilingüe | 1556 Renacentista | R. Gil de Hontañón | 18 columnas del claustro, con fustes enterizos | Casaseca Casaseca (1988, 2002) |
| Palacio de Castellanos Restauración | s. XVI Renacentista | | Basas de columnas del claustro | Casaseca Casaseca (2002) |
| Iglesia de S. Martín | 1582 - 1586 Románico-renacentista-barroco | Francisco Viloría Francisco Montero | Pedestales de la portada | Núñez Paz <i>et al.</i> (2001); Madruga Real (2005); Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Iglesia de S. Benito | 1506 - 1511 finales del s. XVI | Juan de Álava, otros | Columnas con zapata del pórtico | Castro Santamaría (2002) |
| S. Vicente (hoy, desaparecido) | 1603 | | Enlosado del claustro alternando con pizarra | García Catalán (2005) |
| Casa de las Viejas | 1623 | | 3 columnas del patio | Álvarez Villar (2003) |
| Sacristía de S. Esteban | 1627 - 1634 Barroco | J. Moreno, A.S ardina | Enlosado, alternando con placas de pizarra | Rodríguez G. de Ceballos (1987) |
| Iglesia de la Clerecía | 1660 Barroco | Juan de Esculti Atanasio de la Secada | 2000 losas en el interior del templo | Rodríguez G. de Ceballos (1985a) |
| Claustro de la Hospedería del Colegio Fonseca | 1678 - 1693 (ampliación) | Juan de Setién Güemes | Pedestales de las columnas del claustro, escalinatas | Rodríguez G. de Ceballos (1968b, 2005a) |
| Atrio de la Clerecía | 1682 | Juan de Setién Güemes | Escalinata | Rodríguez G. de Ceballos (1985a) |
| Hospedería del Colegio de Anaya | 1715 Renacentista | J. de Churriguera | 16 basas de pilastras cajeadas | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Palacio de Monterrey. Restauración | 1539 - 1566. s. XVIII | | Basamento y sillares de la esquina | Urrea <i>et al.</i> (2002); Álvarez Villar (2003) |

Tabla 1.3. Continuación III

| <i>Monumentos</i> | <i>Edad y Estilo</i> | <i>Arquitectos</i> | <i>Elementos Arquitectónicos</i> | <i>Referencias</i> |
|---|----------------------------|---------------------------------|--|---|
| Capilla de la Orden Tercera de S. Francisco | 1746 - 1756 Barroco | A. García de Quiñones | Basas de las columnas adosadas | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| La Clerecía. Claustro de Los Estudios | 1740 Barroco | A. García de Quiñones | Gradas en la escalera de Honor | Rodríguez G. de Ceballos (1985a) |
| Fachada de la Hospedería de Fonseca | 1740 - 1766. Barroco | A. García de Quiñones | Marco de la portada en combinación con el granito de Martinamor. | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Colegio de Calatrava | 1717 - 1777 Barroco | J. García de Quiñones | Enlosado del claustro | Rodríguez G. de Ceballos (2005a) |
| Plaza Mayor. Restauración | 1729 - 1756. 1921 | | Basamento de columnas, enlosado | Rodríguez G. de Ceballos (2003a); López Asenjo (2005); Rodríguez G. de Ceballos (2005b) |
| Múltiples calles de la ciudad | 1787 - 1800, s. XIX y 1921 | J. García de Quiñones. Otros | Enlosado | Rupérez Almajano (1992); Díez Elcuaz (2003) |
| Palacio de la Salina. Restauración | 1881 - 1884 Renacentista | José Secall | Basamento, solería y escalinata | Álvarez Villar (1984) |
| Casa de Lis | 1905 Modernista | Joaquín de Vargas | Escalinata de la fachada sur | Díez Elcuaz (2003) |
| Numerosas restauraciones recientes | s. XX | Varios | Muralla, puente Romano, iglesias románicas y góticas, monumentos renacentistas y barrocos. | Núñez Paz <i>et al.</i> (2001); Senabre López (2002); Díez Elcuaz (2003) |

El monumento más antiguo construido en parte con piedra vaugnerítica es la sala de Exposiciones de las Escuelas Menores (1533) (Núñez Paz *et al.*, 2001). El origen de la piedra vaugnerítica utilizada no se puede confirmar, necesiéndose para ello, algún tipo de análisis petrográfico o geoquímico. El resto de los monumentos parcialmente construidos con vaugnerita no ofrece apenas dudas respecto a la procedencia de Calzadilla, atendiendo a criterios *de visu* (presencia de rocas intermedias de grano fino, textura decusada en las vaugneritas de grano grueso con cristales grandes de biotita y agregados de anfíbol, y presencia de leucovaugneritas biotíticas de grano grueso), tal como justifican López Plaza *et al.* (2007a)

Para algunos de los monumentos, se presume la utilización de la piedra vaugnerítica únicamente en las restauraciones o reconstrucciones, como es el caso de la reconstrucción de la Portada Principal de la Catedral Vieja, llevada a cabo por el arquitecto Juan de Setién en 1680 (Castro Santamaría, 2003), o la restauración de la Portada de los Ramos de la Catedral Nueva (Rodríguez G. de Ceballos, 2005a).

Por otra parte y al igual que en Salamanca, se pueden encontrar monumentos en Ledesma y sus alrededores con piedra de Calzadilla, como la Iglesia de Santa María la Mayor de Ledesma (siglo XVI) o el monumento a la Inquisición (≈1790) situado tres kilómetros al este de Ledesma (López Plaza *et al.*, 2007a).

El leucogranito turmalinífero o «piedra de Martinamor» se consideró la mejor opción para sustituir a la piedra de Villamayor por sus cualidades de dureza y consistencia, desde los inicios del siglo XVI, lo que hace que esté presente en numerosos monumentos de la ciudad, en cualquiera de sus dos facies (López Plaza *et al.*, 2007b). La identificación en los monumentos de la facies gruesa del leucogranito turmalinífero de Martinamor no ofrece ninguna dificultad, debido a la textura moteada o nodulosa de los agregados negros de turmalina, que sobresalen siempre sobre la matriz hololeucocrática de cuarzo y feldespatos. Esta facies es claramente predominante, mientras que las facies de los leucogranitos turmaliníferos de grano fino y de dos micas son minoritarias, en coherencia con su escasez relativa en los afloramientos naturales de Martinamor.

En el conjunto de la ciudad de Salamanca, tal y como concluyen López Plaza *et al.* (2007b), todos los monumentos con leucogranito turmalinífero están situados dentro del centro antiguo, cuya configuración estaba bien definida hacia mediados del siglo XIX (Núñez Paz *et al.*, 2001), exceptuando, al menos, el enlosado del Puente Romano y un edificio en Tejares. La distribución de los edificios con piedra de Martinamor en el casco antiguo no guarda regularidad, aunque sí cabe destacar su ausencia en avenidas como la Gran Vía o Canalejas, de construcción moderna (mediados del siglo XX) o en la zona SO, que López Plaza *et al.* (2007b) atribuyen a la destrucción durante la Guerra de la Independencia. Por otro lado, cabe destacar la

abundancia de edificios con zócalos de piedra de Martinamor en la calle de la Rúa, edificios posteriores a 1880 cuando se dio principio a la alineación y ensanche de la antigua calle de la Rúa (Villar y Macías, 1887), mientras las canteras seguían siendo productivas.

Además, se utilizó el granito turmalinífero en unos catorce edificios de Alba de Tormes, en las iglesias de Encinas de Abajo, Garcihernández y Doñinos de Salamanca, así como en el Ayuntamiento de Babilafuente. Y como no podía ser de otra manera, la iglesia de Martinamor está construida enteramente por la propia piedra.

Aparte de estas dos singulares rocas, el mejor ejemplo de utilización de materiales graníticos en la ciudad, a lo largo de los años, lo constituye el granito de Los Santos, empleado desde la época romana para la construcción del Puente Romano y con canteras aún activas en la actualidad, habiendo numerosas referencias a las canteras en documentos históricos (López Plaza *et al.*, 2009).

Cronológicamente, se pueden establecer dos momentos importantes en el uso de esta piedra: a) épocas romanas y b) comienzos del siglo XVI. Arquitectónicamente, predomina la utilización en basas y pedestales de las columnas, tanto en portadas como en claustros, así como en el enlosado de numerosos monumentos (López Plaza *et al.*, 2009)

En nuestro estudio, cabe destacar el uso de esta piedra en monumentos tales como el Puente Romano, las Murallas, el colegio de Fonseca y las Escuelas Menores. El granito de Los Santos también se ha usado profusamente en el enlosado de la Plaza Mayor (1954), así como en el recalzo de los machones de las columnas de los soportales llevado a cabo entre 1927 y 1928 (Rodríguez G. de Ceballos, 1991, 2003a, 2005b).

Entre todos los monumentos de la ciudad de Salamanca en los cuales están presentes una o varias de las litologías seleccionadas en este trabajo (Tabla 1.1, Tabla 1.2 y Tabla 1.3), se escogieron la Plaza Mayor, el Conjunto Catedralicio y el Puente Romano porque están parcialmente contruidos con los tres materiales seleccionados y, además, corresponden a diferentes etapas constructivas.

El Puente Romano

El Puente Mayor de Salamanca sobre el río Tormes, más conocido como Puente Romano, declarado Monumento Histórico-Artístico (Gaceta, 1931), es el más antiguo, ya que su construcción se atribuye a la época del Emperador romano Trajano (s. I) (Herráez Hernández, 1989; Núñez Paz *et al.*, 2001). El puente ha generado gran

cantidad de material documental (Villar y Macías, 1887; Herráez Hernández, 1989; Jiménez Fuentes y Martín de Jesús, 1992; Jiménez *et al.*, 2000; Menéndez Bueyes, 2000-2001; Núñez Paz *et al.*, 2001; Ávila Jalvo, 2002; Vaca Lorenzo, 2002; Iñigo *et al.*, 2003; Vaca Lorenzo *et al.*, 2005; Menéndez Bueyes y Jiménez González, 2007; Vaca Lorenzo, 2011), dividiéndose su estudio en dos partes, que corresponden a los dos tipos de fábrica: la romana y la moderna.

De la época romana sólo se conservan los primeros catorce arcos más próximos a la ciudad y parte del decimoquinto con una fábrica bien definida, en los que se pueden encontrar dovelas almohadilladas homogéneas, realizadas en material granítico (Figura 1.1). Se emplearon diversos tipos de granitoides: granitoides porfídicos biotíticos identificados en la zona de Los Santos, así como leucogranitos equigranulares (tanto de grano grueso como fino) de dos micas y deformados, muy abundantes en la zona oeste de las provincias de Salamanca y Zamora (SIEMCALSA, 1997). También se emplearon las areniscas sílico-ferruginosas de la ciudad de Salamanca (Jiménez Fuentes y Martín de Jesús, 1992; López Plaza *et al.*, 2009).



Figura 1.1. Alzado de la parte romana del Puente, aguas abajo (Núñez Paz *et al.*, 2001).

La parte moderna (Figura 1.2) la constituyen los arcos restantes de la parte sur en los que se ha empleado vaugnerita en los tajamares y dovelas (arcos 16 a 24), junto con arenisca de Salamanca (arcos 25 y 26), además de argamasa, que no se empleó en la parte romana (Jiménez Fuentes y Martín de Jesús, 1992; Jiménez *et al.*, 2000; López Plaza *et al.*, 2007a; Vaca Lorenzo, 2011).



Figura 1.2. Alzado de la parte moderna del Puente, aguas abajo (Núñez Paz *et al.*, 2001).

Desde su construcción, el puente ha sufrido numerosísimas intervenciones, arreglos mayores o menores e incluso reconstrucciones totales o parciales, no siempre bien documentadas. De hecho, tantas han sido las intervenciones que Jiménez *et al.*

(2000) afirman que si existió un puente romano, de unos veintiséis arcos de largo, se debió romper en algún momento entre la Antigüedad Tardía y la alta Edad Media, de modo que la riada de San Policarpo, en realidad, se llevaría parte de una obra ya reparada prácticamente en su totalidad. Algunas de las restauraciones, recogidas por Jiménez Fuentes y Martín de Jesús (1992), Jiménez *et al.* (2000), Menéndez Bueyes (2000-2001); Menéndez Bueyes y Jiménez González (2007), Núñez Paz *et al.* (2001) y Vaca Lorenzo (2002, 2011), son:

- reconstrucción imprecisa en 1275 de al menos siete arcos tras la riada de los difuntos en 1256, empleando la arenisca de Salamanca
- reconstrucción de uno o dos arcos tras la Avenida de Santa Bárbara, en diciembre de 1498
- construcción de un almenado en época medieval
- edificación de una torre sobre el castillete central construido en torno a 1500
- enlosado parcial de la mitad norte del puente con piedra de Martinamor en el s. XVI
- reconstrucción de diez arcos tras la riada de San Policarpo el 26 de enero de 1626, que terminará en 1677 y para la que se emplean vaugneritas y areniscas celestinas
- construcción de un nuevo pabellón sobre el castillete en el medio del puente en 1681
- reconstrucción de los dos últimos arcos tras una avenida de fecha indeterminada
- reparaciones en el siglo XVIII, como el arreglo del enlosado a base de piedra pajarilla de Ledesma (1719), o la sustitución total del enlosado en la parte nueva del puente (1722), reparaciones varias y de quince ojos con piedra tosca y pajarilla (1762) y reparaciones en las cinco cepas inmediatas al estribo (1791)
- eliminación de la torrecilla y almenado a mediados del siglo XIX, y de nuevo, la renovación del enlosado (1853)
- demoliciones, pavimentación, instalación eléctrica y fontanería (1972)
- restauración entre 1999 y 2000, con enlosado, aplicación de morteros y limpieza de material biológico, entre otros.

El Conjunto Catedralicio

El Conjunto Catedralicio fue declarado Monumento por Real Orden de 17 de junio de 1.887 (RO., 1887) y está formado por la Iglesia Catedral de Santa María de la Sede, o Catedral Vieja, y la Iglesia Catedral de La Asunción de la Virgen, más conocida como Catedral Nueva. En la Figura 1.3 se presenta un esquema de la planta en conjunto.

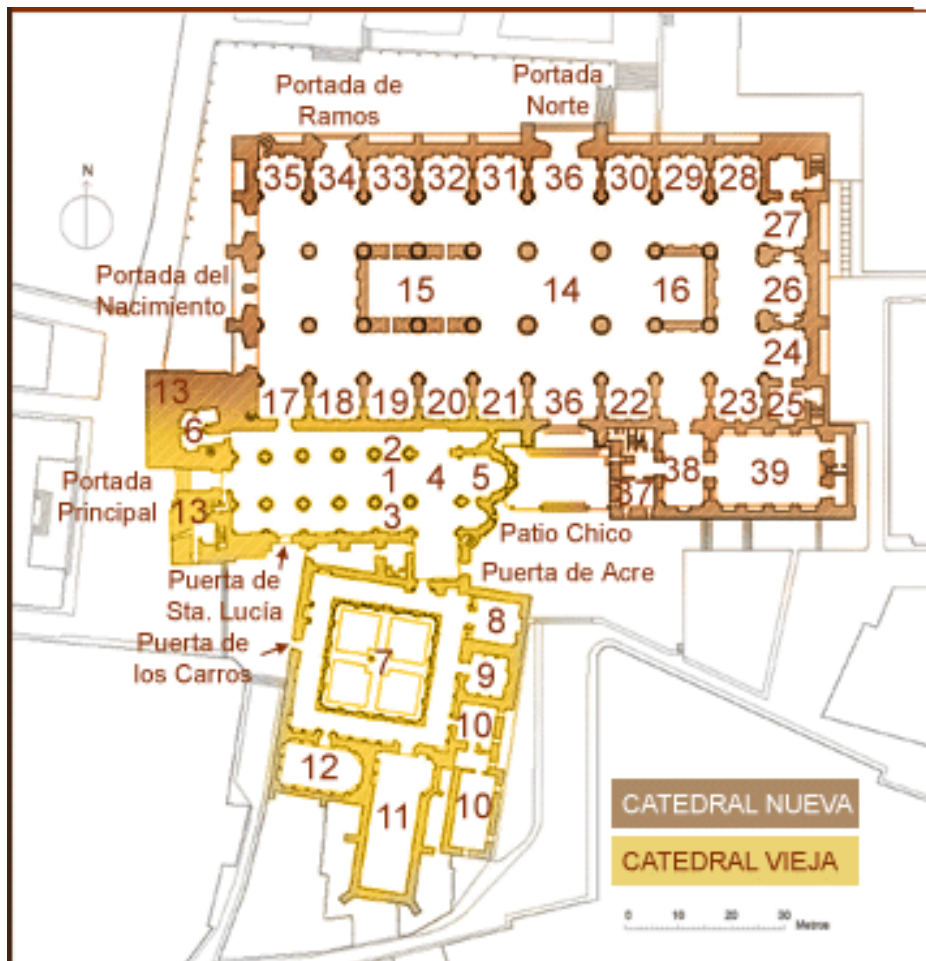


Figura 1.3. Planta del Conjunto Catedralicio. <http://www.catedralsalamanca.org/artehistoria.htm>. *Catedral Vieja*: 1. Nave central, 2. Nave lateral izquierda, 3. Nave lateral derecha, 4. Torre del Gallo, 5. Capilla Mayor, 6. Capilla de San Martín, 7. Claustro, 8. Capilla de San Salvador, 9. Capilla de Santa Bárbara, 10. Museo. Salas Capitulares, 11. Capilla de Santa Catalina, 12. Capilla de San Bartolomé, 13. Torres de las Catedrales. *Catedral Nueva*: 14. Címborrio, 15. Coro, 16. Capilla Mayor, 17. Capilla de San Lorenzo, 18. Capilla Dorada, 19. Capilla del Presidente, 20. Capilla de la Virgen de Morales, 21. Capilla de la Virgen del Desagravio, 22. Capilla de Jesús Nazareno, 23. Capilla de San Nicolás de Bari, 24. Capilla de San José, 25. Capilla de los Dolores o del Santísimo, 26. Capilla del Cristo de las Batallas, 27. Capilla de la Soledad, 28. Capilla de la Virgen del Pilar, 29. Capilla de la Virgen de Lourdes, 30. Capilla de la Virgen de la Cabeza, 31. Capilla de San Antonio, 32. Capilla de N^a S^a de la Verdad, 33. Capilla de Santiago y Santa Teresa, 34. Capilla de Diego de Neyla 35, Capilla de San Clemente, 36. Crucero, 37. Sala Capitular, 38. Sacristía de Capellanes, 39. Sacristía de Prebendados

La Catedral Vieja se construyó entre 1150 y 1230, en estilo románico principalmente, en varios periodos. De 1150 a 1175 se realiza el trazado general, la cabecera triabsidal, los muros perimetrales y el pórtico. Entre 1200 y 1210 se construyen algunas bóvedas. Por último, se levanta el cimborrio y se finalizan las bóvedas (Berriochoa Sánchez-Moreno, 1986; Núñez Paz *et al.*, 2001). Los maestros de obra no están claramente recogidos, pero en varios documentos se habla de Sancho Pedro o Juan Franco (Berriochoa Sánchez-Moreno, 1986; Rodríguez G. de Ceballos, 1994).

Aunque se da por finalizada en 1230, los trabajos siguen durante más tiempo, como recoge Berriochoa Sánchez-Moreno (1986), habiendo restauraciones a lo largo de los siguientes siglos, pese a la construcción de la nueva catedral.

La portada original no se conserva. La actual, fue llevada a cabo, en piedra vaugnerita, por el arquitecto Juan de Setién Güemes en torno a 1680, junto con «una lonja de postes de piedra pajarilla» (Castro Santamaría, 2003). Una de las torres se anexionó a la Catedral Nueva como campanario, y la otra, la Torre Mocha, se modificó a finales del s. XVIII (Núñez Paz *et al.*, 2001). Tras el terremoto de Lisboa (1 de noviembre de 1755), se refuerza la Torre Mocha y la del campanario (Berriochoa Sánchez-Moreno, 1986; Rodríguez G. de Ceballos, 1994; Castro Santamaría, 2003), tapando parte de la portada Principal.

En los siglos XIX y XX, se producen otras restauraciones que afectan, por ejemplo, al claustro y el cimborrio (Berriochoa Sánchez-Moreno, 1986). También son importantes las indicaciones y planificación del Plan Director elaborado y dirigido por el arquitecto Berriochoa Sánchez-Moreno (1997-98).

La Catedral Nueva se construyó entre los siglos XVI (mayo de 1513) y XVIII (se consagra y da por concluida en agosto de 1733), básicamente en estilo gótico tardío y barroco. Se construyó conservando la vieja, quedando el muro izquierdo de la Catedral Vieja parcialmente reducido. Igualmente, la torre de la nueva Catedral se construyó sobre la antigua (Núñez Paz *et al.*, 2001; Castro Santamaría, 2003).

Sobre la Catedral Nueva se pueden consultar numerosos documentos (Berriochoa Sánchez-Moreno, 1986; Rodríguez G. de Ceballos, 1994; Núñez Paz *et al.*, 2001; Castro Santamaría, 2002, 2003), que establecen varios periodos constructivos. Entre 1513 y 1560, se alzó el edificio hasta el crucero, dirigiendo las obras autores como Juan Gil de Hontañón, Juan Gil el Mozo, Juan de Álava y Rodrigo Gil de Hontañón. Entre 1568 y 1773 se remata el crucero y la cabecera, siguiendo ésta en 1589 la traza aportada por Juan de Ribero Rada. Durante este periodo cabe destacar la participación de Juan de Setién Güemes, Pantaleón Pontón de Setién, Joaquín Benito de Churriguera (cimborrio original del crucero en 1725), Alberto Churriguera, Manuel Lara Churriguera y Juan de Sagarvinaga.

Los materiales empleados son piedra de Villamayor, piedra tosca o recia de Los Santos, cal, arena y agua, y conforme nos indica Castro Santamaría (2002), la iglesia estaba obligada a tenerlos para el trabajo a destajo entre 1534 y 1537. Cabe suponer, por lo que podemos ver hoy en día, que los materiales no cambiaron mucho durante todas las fases constructivas.

Como ya se ha comentado, las catedrales sufrieron los efectos del terremoto de Lisboa, quedando todavía signos visibles en las grietas y vidrieras rotas. Juan de Sagarvinaga reconstruyó el cimborrio. También hubo que rehacer la cúpula (por la actual neoclásica) y reforzar la base de la torre con un forro de hiladas de sillares, en forma de tronco de pirámide que llegan hasta el cuerpo de campanas.

En algún momento desde su finalización hasta nuestros días, el perímetro norte, sur y oeste de las Catedrales se recalzó con losas de granito, leucogranito de Martinamor principalmente, pero también con vaugnerita y granito de Los Santos; si bien, no se ha encontrado mucha documentación sobre tales actuaciones, exceptuando la restauración de la Portada de los Ramos de la Catedral Nueva (Rodríguez G. de Ceballos, 2005a).

La Plaza Mayor

Por último, el monumento piloto más moderno es la Plaza Mayor, declarada Monumento Nacional. Asimismo, en 1973 fue considerada Monumento Histórico-Artístico (BOE, 1974).

La construcción de la Plaza Mayor, en claro estilo barroco, se demoró a lo largo de un periodo cercano al cuarto de siglo, desde el año 1729 al 1756 (Rodríguez G. de Ceballos, 1977, 1991). Se edificaron los pabellones siguiendo tres fases constructivas. La primera fase, entre 1729 y 1735, aborda los pabellones Real y de San Martín. El segundo período comprende quince años con interrupciones en la obra (entre 1735 y 1750) debido a litigios entre el Ayuntamiento y los dueños de las casas que eran necesarias expropiar para la construcción del Pabellón de Petrineros y del Consistorial. En la tercera fase (1750 a 1756) se completa el cierre de la Plaza el 29 de abril de 1755 y se construye la Casa Consistorial y su fachada, quedando inconclusa hasta la colocación de la espadaña en 1852.

Rodríguez G. de Ceballos (1991) indica los materiales empleados para su construcción, de modo que no se emplearon materiales nobles excesivamente costosos, como el mármol y el alabastro, ni materiales modestos en las áreas visibles, como puede ser ladrillo visto, la mampostería o el estuco. Para las fachadas, muros, molduras, adornos y remates se empleó la piedra arenisca o piedra franca (García de

los Ríos Cobo y Baez Mezquita, 2002) proveniente de las canteras de Villamayor. Para los soportales, en las cuatro primeras hiladas de los machones se empleó piedra tosca, procedente de las canteras de la Pinilla (junto a Carbajosa de la Sagrada) y de allí en adelante piedra de Villamayor, tal como expuso el arquitecto Alberto de Churriguera (encargado de diseñar y dirigir la obra de los dos primeros lienzos) en los pliegos de condiciones. Sin embargo, en la Casa Consistorial se empleó, una roca plutónica, la vaugnerita, en todos los pilares y arcos del pórtico, también en frisos y cornisas; roca que pudo haber sido conforme a la recomendación de García Berruguilla de emplear granito, por el considerable peso que debería sostener. Esta roca o piedra pajarilla se extraía de las canteras de Calzadilla del Campo, junto a Ledesma (Rodríguez G. de Ceballos, 1991). Al abandonar Salamanca Alberto de Churriguera (1738), le sustituye Manuel de Larra Churriguera, de quien se conserva un Plano de la Plaza (Figura 1.4) (Núñez Paz *et al.*, 2001).



Figura 1.4. Plano de la Plaza mayor firmado por Manuel de Larra Churriguera en 1741 (Foto Ornoz) (Rodríguez G. de Ceballos, 1991)

A partir de la fecha del cierre de la plaza comienzan las noticias de reformas. El suelo inicial, compuesto de finos guijarros (Araujo, 1984), se cambia en 1784 y hasta el

año 1806 no se enlosaron, por primera vez, los soportales. En 1844 se reciben las primeras noticias de deterioro de la Plaza: los machones de algunos arcos muestran un deterioro considerable. En 1852 se añade la espadaña a la casa Consistorial, realizada por el arquitecto Tomás Cafranga. En 1884 se colocan farolas de gas en el jardín y en los arcos de los soportales. Ya en 1921, se iniciaron las obras de adoquinado de la calzada, enlosándose los soportales y las aceras, terminándose en 1922.

Los machones de los soportales se recalzan en las labores de restauración de los años 1927-1928 con sillares de granito, más resistente a las humedades freáticas y a la erosión atmosférica (Rodríguez G. de Ceballos, 1991). Como se puede observar actualmente, para este recalzo se emplearon granito de Los Santos, de Martinamor y vaugnerita de Calzadilla, entre otras rocas plutónicas. La última reforma del pavimento se hizo en 1954, suprimiendo la zona ajardinada y pavimentando la totalidad de la plaza con losas de rocas plutónicas (de nuevo de Los Santos, Martinamor y Calzadilla, entre otros), unificando el nivel con el de los soportales (Rodríguez G. de Ceballos, 1991).

En la segunda mitad del siglo XX y principios del XXI, la Plaza Mayor se somete a otras renovaciones y rehabilitaciones [en 1983, o el Plan Director de 1992 a 2001 (Núñez Paz *et al.*, 2001)], pero sin la inclusión de nuevos materiales plutónicos.

1.2 EL ENTORNO CLIMÁTICO Y LAS PATOLOGÍAS EN LA PIEDRA

Tras este breve repaso a los monumento piloto, describiremos el entorno ambiental en el que están situados, que, junto con las características intrínsecas de la piedra, condiciona las patologías presentes en los monumentos.

Desde el punto de vista climático, y dada su situación geográfica en la submeseta norte, Salamanca sufre unas condiciones de fuertes contrastes térmicos y heladas, que influyen en la conservación de los materiales pétreos de los edificios históricos. El clima de la zona es mediterráneo con tendencia continental, con veranos cálidos y secos, e inviernos fríos, a diferencia del clima mediterráneo puro con inviernos suaves y lluviosos.

Para precisar un poco más sobre las condiciones climáticas en esta región se contó con la información de la estación meteorológica 82020 en Matacán (Salamanca) (TuTiempo.net, 2005), disponiendo de datos desde enero de 1996 hasta diciembre de 2005 (Tabla 1.4 y Figura 1.5).

La temperatura media anual es de unos 11,3-12,8 °C, según los años, y la precipitación media oscila alrededor de los 400 mm/m² (381 mm/m²), existiendo un

marcado estiaje entre los meses de junio a septiembre, más concretamente en el mes de agosto.

La temperatura media en el periodo de estudio es de 12,1 °C; la temperatura máxima absoluta 44 °C (julio de 2002), y la temperatura mínima absoluta, -11,6 °C (diciembre de 2001). El número de días cuya temperatura mínima es inferior a 0 °C asciende a un total de 694 y se reparten, como se muestra en la Figura 1.6, principalmente en los meses de enero (158 días), febrero (156 días), diciembre (148 días) y noviembre (112 días), cuando las heladas son más frecuentes. Estos datos son importantes, pues es de todos conocidos, que para evitar la congelación del agua en las calle, se esparce sal en ellas, sal que en solución acuosa asciende por capilaridad por los muros de los edificios, originando alteraciones en la piedra.

Tabla 1.4. Resumen de los principales datos meteorológicos del intervalo 1996-2005 obtenidos de la estación meteorológica de Matacán (Salamanca).

| Año | Pp. anual | Tª media anual | Tª máxima absoluta | Tª mínima absoluta | Amplitud térmica máxima 24 h | Amplitud térmica mínima 24 h | Oscilación Térmica anual | Días al año con Tª <0 °C | Humedad Relativa media |
|------|-----------|----------------|--------------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1996 | 408,7 | 11,6 | 34,0 | -7,0 | 26 (Nov.-Ab.) | 1,2 (Dic.) | 41,0 | 71 | 83,6 |
| 1997 | 539,3 | 12,8 | 35,0 | -7,0 | 23 (Sept.) | 2,4 (Oct.) | 42,0 | 36 | 75,01 |
| 1998 | 279,4 | 12,1 | 37,0 | -7,0 | 23,2 (Jun.) | 3,8 (Abr.) | 44,0 | 63 | 65,61 |
| 1999 | 327,9 | 12,1 | 37,0 | -7,4 | 24,0 (Jul.) | 2,6 (Oct.) | 44,4 | 85 | 65,31 |
| 2000 | 409,2 | 11,9 | 36,4 | -8,0 | 25,0 (Sep.) | 3,0 (Nov.) | 44,4 | 71 | 63,22 |
| 2001 | 387,0 | 11,9 | 36,0 | -11,6 | 26,0 (Jun.) | 3,4 (Feb.) | 47,6 | 70 | 52,31 |
| 2002 | 444,2 | 12,8 | 44,0 | -7,4 | 28,8 (Jul.) | 1,6 (Ene.) | 51,4 | 47 | 51,74 |
| 2003 | 462,5 | 12,8 | 39,0 | -9,0 | 25,2 (May.) | 3,0 (Ene.) | 48,0 | 59 | 54,31 |
| 2004 | 277,8 | 12,1 | 37,5 | -8,0 | 25,6 (Sep.) | 2,1 (Dic.) | 45,5 | 89 | 61,42 |
| 2005 | 277,3 | 11,3 | 38,8 | -9,0 | 26,8 (Ago.) | 2,4 (Feb.) | 47,8 | 103 | 71,93 |

Precipitación (Pp.) en mm/m²; Temperatura (Tª), amplitud térmica y oscilación térmica en °C; Humedad relativa en %.

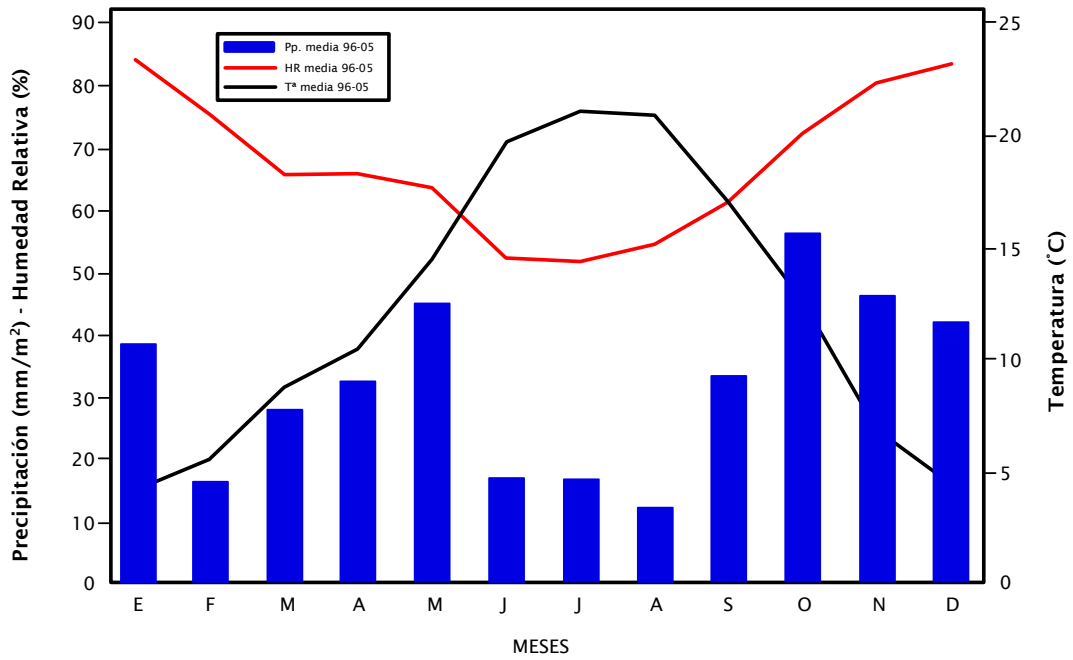


Figura 1.5. Representación de los valores medios mensuales de precipitación, temperatura y humedad relativa correspondientes al periodo 1996-2005, recogidos en la estación meteorológica de Matacán.

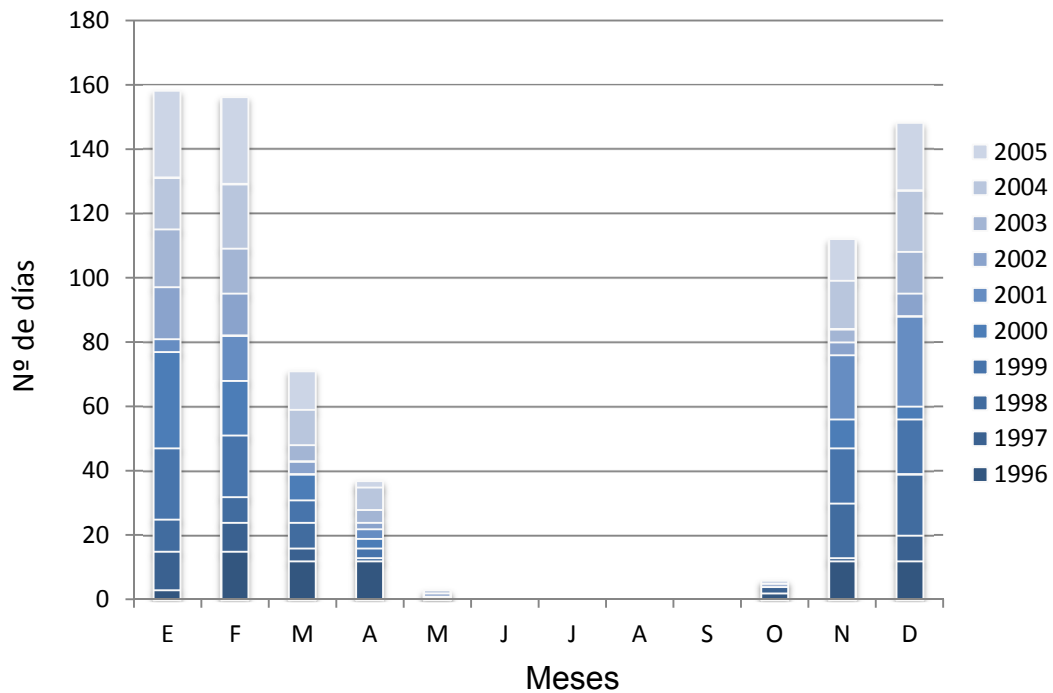


Figura 1.6. Representación gráfica del número de días con temperaturas mínimas por debajo de 0 °C entre 1996 y 2005, registrados en la estación meteorológica de Matacán (Salamanca).

En 2002 se registró la mayor oscilación térmica, con una amplitud de 51,4 °C entre los meses de enero (temperatura mínima absoluta de -7,4 °C) y julio (temperatura máxima absoluta de 44 °C). La mínima oscilación térmica anual corresponde a 1996, con una amplitud de 41 °C entre los meses de febrero (temperatura mínima absoluta de -7 °C), junio y julio (temperatura máxima absoluta de 34 °C). La máxima oscilación térmica diaria se registró en julio de 2002 con una amplitud de 28,8 °C y la mínima oscilación térmica diaria, en diciembre de 1996, con una amplitud de 1,2 °C. En la Figura 1.7 se muestran las medias de las temperaturas máximas y mínimas diarias absolutas en el periodo estudiado. Como se puede observar, las mayores amplitudes térmicas se producen en los meses de verano y las menores en los meses de invierno.

El conocimiento de las oscilaciones térmicas es importante, pues estas fuertes variaciones generan un gradiente térmico entre las partes expuestas y no expuestas de los bloques de piedra en los edificios, dada su baja conductividad térmica (Iñigo y Vicente-Tavera, 2002), provocando dilataciones localizadas, que en materiales heterogéneos dan lugar a tensiones internas que pueden producir microfisuraciones y con ellas la degradación de los bloques pétreos.

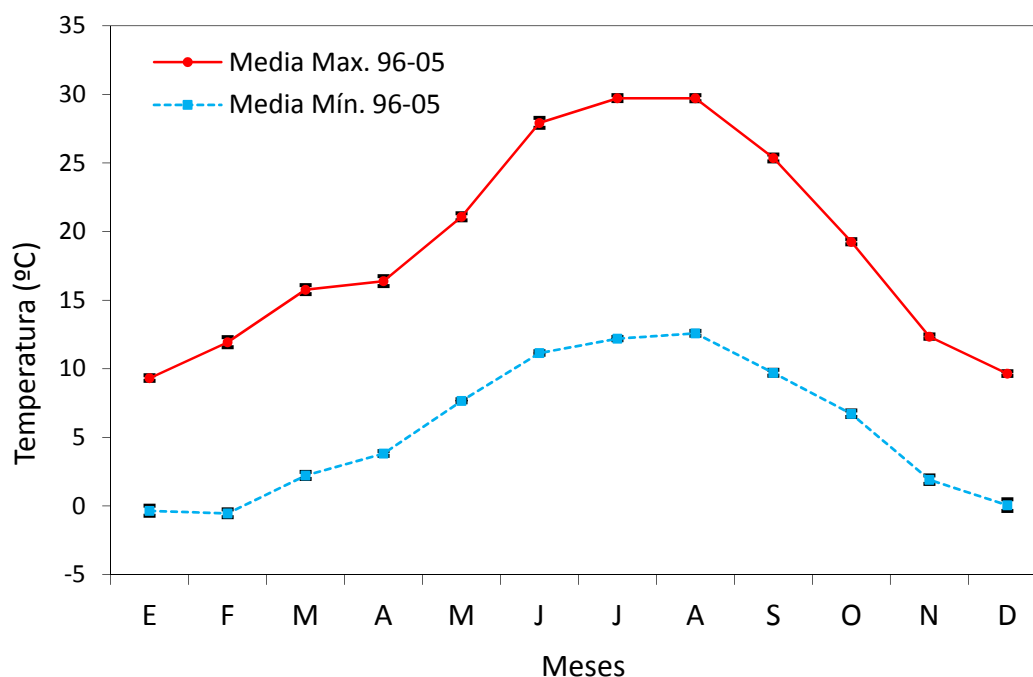


Figura 1.7. Representación de la media de las temperaturas máximas y mínimas diarias absolutas entre 1996 y 2005. Las barras negras representan el error típico.

Las precipitaciones totales en el periodo estudiado ascienden a 3813,3 mm/m², concentrándose en los meses de enero, mayo, octubre, noviembre y diciembre. Las máximas precipitaciones se dan en los meses de octubre y las mínimas en agosto (Figura 1.5). El año más húmedo fue 1997 con una precipitación total de 539,3 mm/m², repartidos entre lluvias, nieve y tormentas (Tabla 1.4).

Los valores medios mensuales de la humedad relativa del aire oscilan entre un 50 % para los meses junio y julio y un 85 % para los meses de diciembre y enero (Figura 1.5).

El carácter extremo de este clima hace necesario plantear el estudio de los efectos que produce en el material pétreo. Para simular las condiciones climáticas en el laboratorio se realizan ensayos de envejecimiento acelerado artificial en una cámara climática, bajo condiciones controladas, a fin de reproducir las diversas patologías que se pueden observar en las rocas empleadas en los edificios de la ciudad.

Tal como recogen Doehne y Price (2010), la alteración de la piedra se produce de muchas formas diferentes. La piedra puede meteorizarse gradualmente, a veces caen grandes placas de piedra en un único episodio, en ocasiones la piedra pierde toda integridad y simplemente se deshace y también puede parecer sana, aunque haya perdido la cohesión bajo la superficie.

De este modo, se denominan patologías o alteraciones de las rocas a las modificaciones mineralógicas, químicas y texturales que se producen como consecuencia de la adaptación de dichos materiales a unas nuevas condiciones impuestas. Esta meteorización natural de los materiales pétreos se debe a la búsqueda del equilibrio entre dichos materiales y el medio dónde se sitúa (Gómez de Terreros Guardiola y Alcalde Moreno, 2000).

Uno de los problemas a la hora de discutir sobre la alteración de la piedra es encontrar un lenguaje común. En este sentido, se dan avances significativos para unificar términos, como la publicación de un glosario ilustrado del ICOMOS-ISCS (ICOMOS, 2008), o la NORMA italiana (UNI, 2006), aparte de trabajos anteriores como los de Fitzner *et al.* (1992, 1997).

El glosario ilustrado de ICOMOS-ISCS ayuda a definir y aclarar, en distintos idiomas, términos tales como desprendimiento o descamación. *Weathering* se define generalmente como «el resultado de los fenómenos atmosféricos naturales», mientras que *decay* es «cualquier modificación física o química de las propiedades intrínsecas de piedra que conducen a una pérdida de valor o uso», etc.

Algunos autores como Ordaz y Esbert (1988), Alcalde y Martín (1990), etc. tratan de realizar una sistematización de términos de alteración. Fitzner *et al.* (1992, 1997) establecen una importante y compleja clasificación de las formas de

meteorización como base para mapear el deterioro en las fachadas de edificios construidos. Esta clasificación reconoce diecinueve formas diferentes de meteorización y está basada en la inspección visual (Fitzner, 2004). Para Fitzner y Heinrichs (2001) existen también cuatro grupos de formas de alteración (pérdida de material, decoloración/depósitos superficiales, separación de material y fisuras/deformaciones), que se subdividen en categorías, hasta tal punto que las formas de alteración reciben un nombre y nomenclatura preciso y concreto; incorporan además niveles o grados de deterioro (niveles 1 a 4) e intensidades (W1 a W7). Las terminologías y definiciones propuestas están sujetas a discusiones por parte de los diferentes investigadores. Otros autores (Massa *et al.*, 1991; Vergès-Belmin, 1992) han establecido sistemas similares, pero más simples. Gómez de Terreros Guardiola y Alcalde Moreno (2000) clasifican las formas de alteración en cuatro categorías o apartados basados en la descripción visual: modificaciones superficiales, eliminación de materia, deformación y separación.

Las piedras de construcción no sólo sufren un proceso natural de meteorización, sino que se superponen otros procesos derivados de la ubicación en el edificio, las condiciones ambientales a las que están expuestas y el contacto con otros materiales (Iñigo *et al.*, 2003), produciéndose un deterioro de sus características físico-mecánicas a escala histórica o humana (Esbert *et al.*, 1997) reduciendo su durabilidad.

En la mayoría de los casos, un material pétreo se deteriora más por las caras externas que por sus partes internas; a veces el deterioro va acompañado de la formación de costras superficiales duras y poco porosas, por debajo de las cuales el material no es consistente y es más poroso. Las zonas más internas están, en general, menos alteradas y conservan una porosidad inferior a la del material inmediatamente subyacente a la costra (Zoghiami, 2003).

El estado de degradación de la piedra natural en un edificio se puede evaluar de acuerdo al tipo de patologías que presenta, su intensidad y el área a la que afectan (Fitzner, 1990).

En este estudio, para la descripción de las formas de deterioro más comunes, se han utilizado las definiciones de García Talegón (1995), Esbert *et al.* (1997), Gómez de Terreros Guardiola y Alcalde Moreno (2000) y Rives y García-Talegón (2006) y son las siguientes:

- Pérdida de materia/Desagregación: alteración física (mecánica) que comporta, generalmente, un debilitamiento de las cualidades resistentes de una piedra, y que se suele traducir en una pérdida de material (granos) (Figura 1.8 y Figura 1.9). Se encuentra en mayor o menor grado, en todos los monumentos estudiados y se produce

igualmente en todos los granitos situados en sus emplazamientos naturales (Guitan Ojea *et al.*, 1985)

- Desplacaciones: levantamiento y separación de placas de unos pocos milímetros de espesor, generalmente rígidas, paralelamente a la superficie de los sillares o elementos ornamentales, independizándose del bloque (Figura 1.10 y Figura 1.11).
- Grietas, fisuras y cicatrices: fracturas de dimensiones variables, originales de la roca (pelos) o inducidas por esfuerzos mecánicos (asentamientos, sobrecargas, etc.). Las cicatrices son marcas en las edificaciones, debidas a reconstrucciones realizadas por el hombre en un edificio (Figura 1.12 y Figura 1.13).
- Ensuciamiento: depósitos superficiales de espesor variable y escasa cohesión y adherencia a la piedra sobre la que se asientan. El origen es diverso (excrementos de aves, recubrimientos con tierras, etc.) y el grado también puede ser variable (Figura 1.14).
- Eflorescencias salinas: acumulaciones de cristales de sales, de color blanquecino, no muy consistentes, que se forman en la superficie de una piedra, debido a fenómenos de migración y evaporación de agua con sales en disolución (Figura 1.15).
- Pátinas: capa o película delgada formada en la superficie pétreo, debido a diversas causas (por envejecimiento, biogénica, de tinción) y cuyo origen puede ser, o no, debido a la acción humana (Figura 1.16 y Figura 1.17), en cuyo caso se denomina también panitura o policromía.
- Colonización biológica/biodeterioro: crecimiento de algas, bacterias, hongos, líquenes, musgos y plantas superiores de diversas clases sobre la superficie, juntas y grietas (Figura 1.18).



Figura 1.8. Pérdida de materia hasta desgastar la forma original, en una de las columnas del Ayuntamiento de la Plaza Mayor, construida en vaugnerita de grano fino.



Figura 1.9. Pérdida de materia en un bloque de granito del Puente Romano, dándole un aspecto redondeado, como ocurre en la naturaleza.



Figura 1.10. Desplacaciones en granito de Martinamor. Portada principal de la Catedral Vieja.



Figura 1.11. Desplacación en vaugnerita en la Portada de la Catedral Vieja.



Figura 1.12. Grietas en los bloques graníticos en el intradós de un arco de la fábrica romana del Puente Romano

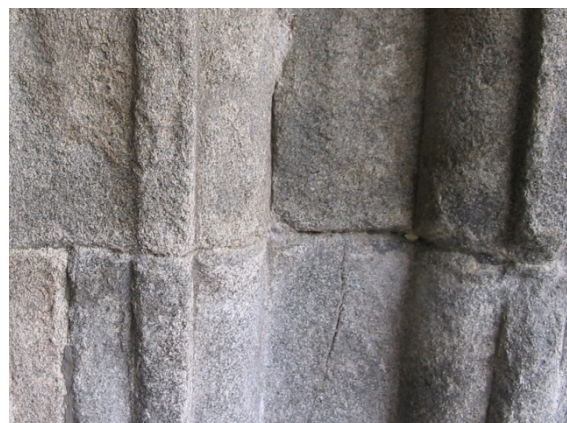


Figura 1.13. Grieta en vaugnerita de grano fino en una de las columnas del Ayuntamiento en la Plaza Mayor



Figura 1.14. Detalle del ensuciamiento de una dovela de vaugnerita biotítica perteneciente a la fábrica moderna del Puente Romano.



Figura 1.15. Eflorescencias salinas en rocas graníticas en el interior de un arco del Puente Romano



Figura 1.16. Patina en las dovelas de un arco de la fábrica romana, bajo un desagüe. Puente Romano.



Figura 1.17. Pátina sobre un bloque de granito en el Puente Romano.



Figura 1.18. Biodeterioro en losas de granito de Los Santos junto a la Portada de Los Ramos de la Catedral Nueva

1.3 ACTUACIONES SOBRE LOS MATERIALES PÉTREOS

Antes de iniciar cualquier actuación sobre un material y para minimizar los riesgos en los procedimientos, es básico conocer, por un lado, el estado del material pétreo (grado de deterioro y patologías), las causas de dicho deterioro, las propiedades físicas del material y la forma de evitar o disminuir los factores de alteración (Monjo y Lasheras, 1991). Por otro lado, se deberán conocer las propiedades de los productos químicos que se van a aplicar.

A continuación se describen las principales actuaciones de conservación (limpieza, consolidación y protección), efectuadas antes de tener que llegar a la reposición del material, que sería el último paso en un proceso de restauración.

Limpieza

Los distintos procedimientos de limpieza (químicos, físicos, fisicoquímicos y biológicos) en materiales empleados en el Patrimonio Histórico-Artístico han sido estudiados ampliamente por distintos autores (Lazzarini y Laurenzi-Tabasso, 1990; Trujillano *et al.*, 1995; Ling y Smith, 1996; Vergès-Belmin, 1997; Vicente y Vicente-Tavera, 2001; Bromblet *et al.*, 2003). De todos estos estudios se puede concluir que no existe un proceso de limpieza completamente efectivo y fiable para todos los tipos de rocas; más bien, se entrevé la distinta idoneidad de cada producto para diferentes patologías concretas. Así, la limpieza con láser es altamente efectiva para la limpieza de costras, pero no permite la eliminación de muchas sales presentes en la red poral del material. Del mismo modo, el empleo de agua destilada puede limpiar la red poral, pero su uso no se aconseja en rocas con carbonato cálcico (Webster, 1992; Iñigo, 1995).

Por otro lado, como el mayor grado de deterioro en la piedra de los monumentos va unido en todos los casos a la presencia de sales (Bowley, 1975; Vicente *et al.*, 1993; Vicente, 1996), se ha estudiado un procedimiento no agresivo de eliminación de suciedad y sales, como es el empleo de arcillas como absorbentes de contaminantes, un método ampliamente estudiado en nuestros laboratorios (Iñigo, 1995; Trujillano *et al.*, 1995).

La gran superficie específica de las arcillas les confiere un gran poder de absorción de agua e iones; así, la aplicación de materiales arcillosos en forma de cataplasmas permite no sólo la eliminación de la suciedad superficial que tapiza los materiales, empleando el disolvente adecuado, sino que también puede eliminar, por absorción, las sales precipitadas y alojadas en la red poral de la piedra, uno de las

procesos más generalizados y degradativos que intervienen en el deterioro de objetos del patrimonio histórico (Vicente *et al.*, 1993; Vicente, 1996), pinturas, frescos y obras de arte en cerámica (Bowley, 1975). Una pasta de arcilla con agua puesta en contacto con una piedra cargada de contaminantes la humedece y disuelve las sales que, por gradiente de concentraciones, son arrastradas hacia la superficie y absorbidas por la arcilla (Lazzarini y Laurenzi-Tabasso, 1990).

Consolidación

En restauración, se entiende por consolidación «el tratamiento destinado a mejorar las características de cohesión y adhesión entre los constituyentes de un material pétreo» (Gutt, 1973; Torraca, 1975). Se utiliza para restaurar materiales degradados y en algún caso, para mejorar la resistencia de materiales frescos (Zoghلامي, 2003)

Los tratamientos de consolidación se usan a menudo en conservación y restauración de edificios construidos en piedra, para endurecer la piedra y aumentar su resistencia frente a posteriores deterioros (Silva *et al.*, 1997, 2000). La consolidación debe mejorar la resistencia mecánica del material consolidado (sobre todo a la tracción y a la compresión), modificando su estructura interna y haciendo más difícil el acceso del agua y de las soluciones salinas o ácidas al interior de la piedra (Zoghلامي, 2003).

Este tratamiento debe aumentar también la resistencia del material frente a los agentes externos, dificultando las variaciones internas de volumen, que generan tensiones y que deterioran la estructura interna del material, presentes en los procesos de hielo-deshielo, cristalización de sales, etc.

Un consolidante puede rellenar más o menos los espacios porosos en el interior de un material pétreo. Desde un punto de vista teórico, podría parecer deseable tener una fuerte reducción de la porosidad, para impedir los procesos de deterioro que tiene lugar en el interior de la estructura porosa. En la práctica, es muy difícil tener la certidumbre de haber tratado de manera homogénea todo el volumen de obra y, en caso de un resultado heterogéneo, la penetración de agua o de soluciones acuosas será más acusada en las zonas más porosas. Si el agua no pudiera evaporarse con facilidad a causa de la permeabilidad reducida de las zonas superficiales, más ricas en consolidante, podrían crearse tensiones en el interior del material, con el consiguiente riesgo de roturas y desprendimientos (Zoghلامي, 2003). Es por esta razón que actualmente se prefieren consolidantes que reduzcan sólo parcialmente la porosidad, disminuyendo la penetrabilidad del agua líquida, lo cual hace que el material, una vez

tratado, sea suficientemente permeable al vapor de agua, con el fin de permitir la transpiración de la piedra en su conjunto.

Una cualidad esencial muy importante que deben poseer los consolidantes es la ausencia total de subproductos peligrosos para el material pétreo, así como de sales solubles que pudieran formarse por una reacción de hidrólisis. Además, deben permitir, siempre que sea necesario, la posibilidad de efectuar un nuevo tratamiento (Zoghiami, 2003).

El éxito de una buena consolidación depende, en gran parte, de la profundidad de penetración del producto y de su distribución en el interior del material pétreo. Utilizando un mismo consolidante, los resultados van a verse influenciados por el método de aplicación: cambios en la concentración de la disolución, tipo de disolvente, tiempo de contacto, presión y temperatura de trabajo, etc. Estos factores pueden modificar notablemente la distribución y cantidad de consolidante que se ha logrado introducir en los espacios porosos de la piedra (Accardo *et al.*, 1981).

A su vez, la elección del método de aplicación está condicionada por el tipo y las dimensiones de la obra a tratar y por el estado de conservación de sus diferentes partes.

Existen métodos que es posible utilizar tanto en el laboratorio, para pequeños objetos, como para obras inamovibles de grandes dimensiones que requieren un tratamiento *in situ*. Estos son esencialmente dos: la aplicación a pincel o brocha y la aplicación por pulverización (Zoghiami, 2003).

En el caso de los objetos que pueden tratarse en el laboratorio, es preferible usar otros métodos que permitan un contacto prolongado entre el material pétreo y la disolución consolidante, facilitando así la penetración (Pinto y Rodrigues, 2008); entre otros, cabe destacar: absorción por capilaridad, inmersión completa a presión y temperatura ambiente y a veces calentando, e inmersión completa bajo vacío (De Witte *et al.*, 1985; Tabasso y Santamaria, 1985; Valdeón *et al.*, 1992; Delgado Rodrigues y Costa, 1996; Zoghiami, 2003).

Como en los tratamientos *in situ* es difícil alcanzar una buena profundidad de penetración, bien sea a causa de las grandes dimensiones de la obra, o a causa de la dificultad de mantener un buen contacto entre la disolución y la obra durante un tiempo suficientemente largo, se ha intentado modificar los métodos de laboratorio, para hacerlos aplicables en obra, sin reducir, si es posible, su eficacia.

En el caso de la aplicación a pincel de un consolidante orgánico en disolución, se puede vaporizar previamente el disolvente puro durante un cierto tiempo sobre la superficie a tratar, aplicando después la disolución (Hempel y Moncrieff, 1976). De esta manera, se facilita la entrada del consolidante por un fenómeno de difusión entre

la red capilar del exterior, donde la concentración es más elevada, y la interior, donde se encuentra el disolvente puro.

El tratamiento por pulverización se mejora también acondicionando alrededor de las zonas a tratar un espacio cerrado con hojas de polietileno resistente a los disolventes y manteniendo la pulverización de la disolución durante varios días. Wihr (1976), restaurador alemán que ha puesto a punto este sistema de tratamiento, trabajando esencialmente con areniscas, afirma obtener así una penetración de 0,5 cm/h en los materiales menos porosos, utilizando una disolución de silicato de etilo. Otra ventaja de este método es que la disolución en exceso, que no penetra en el material, es recuperada y reciclada.

Un tipo de tratamiento, que se aproxima al de capilaridad, puede ser el realizado *in situ* aplicado sobre unas zonas limitadas de la obra a tratar. Unas capas de material absorbente, como el algodón hidrófilo, se alimentan muy lentamente (puede ser por perfusión) con la disolución de consolidante y se recubren de hojas de polietileno para reducir la evaporación del disolvente. Esta forma de aplicación es bastante fácil en el caso de superficies planas; en presencia de huecos y relieves esculpidos se debe tener un cuidado especial para adherir bien la compresa a la piedra. La fijación de la película de polietileno se realiza generalmente mediante una cinta adhesiva de doble cara.

En la consolidación pueden emplearse productos inorgánicos, orgánicos e intermedios, entre estos, como por ejemplo, los ésteres silícicos.

El campo de los consolidantes que contienen silicio en su composición es muy amplio y comprende productos de naturaleza muy diferente, desde silicatos alcalinos hasta resinas de silicona. Los silicatos, tanto orgánicos como inorgánicos, se hidrolizan en presencia de agua, formando sílice que precipita como material amorfo y que establece unas uniones electrostáticas con la red polar de los minerales constituyentes del material pétreo. Puede condensarse con grupos hidroxilos pertenecientes a estos minerales, experimentando a continuación la sílice hidratada un proceso lento de deshidratación y polimerización (Iñigo, 1995)

En el caso del silicato de etilo, el subproducto de la hidrólisis es el alcohol etílico, sustancia volátil y no nociva, que no crea problemas para la continuación del tratamiento. La presencia de agua acelera el proceso de hidrólisis, pero una buena penetración del producto requiere que la reacción no sea demasiado rápida. La naturaleza y concentración de un catalizador metálico (Sn) añadido influyen también en el resultado final del tratamiento. Actualmente, el silicato de etilo se comercializa disuelto en un disolvente (*whitespirit*) y contiene ya el catalizador de la hidrólisis. El bajo peso molecular y viscosidad de la disolución empleada para el tratamiento

confieren a este consolidante buenas propiedades de penetración (Lazzarini y Laurenzi Tabasso, 1986).

En general, se constata que la hidrólisis es casi completa alrededor de tres semanas después de realizar el tratamiento. En realidad, medidas efectuadas sobre muestras de laboratorio indican que, después de este tiempo, el efecto consolidante continúa aumentando (Tabasso y Santamaria, 1985), aunque no está definitivamente establecido si es debido a la continuación del proceso de hidrólisis o al de una policondensación y posterior deshidratación. El silicato de etilo actualmente es muy usado, sobre todo para areniscas y, en general, para materiales silicatados con los que tenga una buena afinidad química.

La naturaleza química de los silicatos es tal que no pueden ejercer más que una acción consolidante. En general, se puede aplicar un producto hidrofugante después del tratamiento con silicatos, o se emplean éstos mezclados con alquilsiloxanos para añadir al efecto consolidante propiedades hidrofugas.

Una vez aplicado un determinado consolidante sobre una roca, se necesita realizar un control del mismo. Para ello, la normativa italiana NORMAL (1986) recoge una serie de parámetros cuyo control es necesario para determinar la eficacia del tratamiento. Estos son:

- a) Variación ponderal
- b) Color
- c) Absorción de agua por capilaridad
- d) Absorción de agua por inmersión total
- e) Velocidad de evaporación del agua absorbida durante la absorción por inmersión
- f) Porosidad abierta total y distribución porosimétrica
- g) Permeabilidad al vapor de agua
- h) Profundidad de penetración
- i) Resistencia a la compresión

Otros parámetros que pueden dar indicaciones útiles para la evaluación de consolidantes son: la dureza, el coeficiente de dilatación térmica y el de dilatación hidráulica (Furlan y Pancella, 1983).

Protección

Los productos de protección son los comúnmente llamados hidrofugantes o hidrorrepelentes, y son sustancias que protegen el sustrato sobre el cual se ha aplicado

para prevenir los efectos de la acción continuada del agua. Los más utilizados son los polisiloxanos, moléculas con una parte polar (constituida por grupos Si-O) y otra no polar (formada por radicales CH₃).

La parte polar se adhiere a la pared de los cristales de los minerales que contiene la roca, y de esta manera, la red capilar queda revestida de grupos metilo hidrófobos. Los grupos no polares representan una barrera impermeable que el agua no logra traspasar.

La tendencia actual es emplear productos que formen una barrera capaz de impedir el paso de agua líquida, pero que sea permeable al agua en fase vapor; esto es posible porque las moléculas de agua en fase vapor están separadas unas de otras, mientras que en fase líquida están unidas por puentes de hidrógeno formando especies de dimensiones más grandes que las simples moléculas y no pueden atravesar una película hidrófoba (Lazzarini y Laurenzi Tabasso, 1986).

Las medidas de la permeabilidad al vapor de agua efectuadas sobre un cierto número de tipos de mármoles y calizas tratadas con diferentes hidrofugantes han demostrado que, en general, estos productos reducen, al menos en un 50 %, el paso del vapor de agua con relación a los valores encontrados para las muestras no tratadas, pero no lo impide totalmente (Laurenzi Tabasso y Mecchi, 1985; Tabasso y Santamaria, 1985).

La resistencia a los contaminantes ácidos y, en particular al dióxido de azufre, es bastante controvertida. Según ciertos autores (Sramek y Kralova, 1981), las medidas efectuadas sobre mezclas de silanos han demostrado una buena resistencia, incluso a concentraciones elevadas de dióxido de azufre, pero, según otros (Mavrov, 1983), la acción protectora y la estabilidad son poco satisfactorias. Probablemente, las discrepancias son debidas a la diversidad de los productos estudiados o a la diferencia en los métodos adoptados para la exposición de las muestras a dicho gas y para evaluar sus efectos.

En el caso de control de un producto cuya única función es la hidrofugación, la medida del ángulo de contacto agua/superficie tratada es muy significativa para su evaluación (De Castro, 1979). A mayor afinidad entre los dos materiales, más pequeño es el valor del ángulo de contacto y esto permite una evaluación de la facilidad de la superficie para ser mojada por el líquido.

En el caso específico de un producto hidrófugo, el ángulo de contacto de una muestra tratada frente al agua será más elevado que el de la piedra no tratada. Como ya se ha indicado, los resultados de laboratorio no tienen más que un valor indicativo y comparativo, bien para evaluar si el tratamiento mejora, o bien, para establecer el producto más adecuado con arreglo a un litotipo determinado.

En el caso de la consolidación y protección químicas, no han sido establecidos los «límites de aceptabilidad» de referencia. El juicio así formulado se establece evaluando la semejanza de los resultados obtenidos con los diferentes ensayos y dándoles un peso diferente según el tipo de piedra y de obra, según la finalidad del tratamiento.

1.4 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es ampliar el conocimiento sobre la naturaleza y comportamiento de distintos materiales pétreos silíceos ante las condiciones ambientales, aplicado, en concreto, a las tres rocas plutónicas estudiadas (granito de Los Santos, leucogranito de Martinamor y vaugnerita de Calzadilla del Campo), que fueron utilizadas en la construcción y ornamentación de muchos de los monumentos del Patrimonio Histórico de la Ciudad de Salamanca. Para ello, es necesario conocer los procesos fundamentales que intervienen en la evolución de estos materiales en un clima mediterráneo de tendencia continental, así como los mecanismos implicados en dichos procesos.

Los objetivos principales, por lo tanto, han de estar basados en una metodología de carácter transversal y multidisciplinar, lo que nos lleva a precisar los siguientes:

1. Conocer y caracterizar cada uno de los materiales pétreos seleccionados desde el punto de vista geológico, y específicamente:
 - a) Definir su mineralogía, petrografía, geoquímica, significado petrológico y características petrofísicas.
 - b) Estudiar las características mesoscópicas de los afloramientos, incluyendo las diversas heterogeneidades tanto litológicas como estructurales (diaclasado, capas, diques, fábrica, foliación,...), así como la forma de yacer de los cuerpos ígneos, lo que, en su conjunto, permitirá establecer una serie de condicionantes o consecuencias directamente relacionadas con la extracción del material en las canteras.

2. Identificar las canteras originales de cada uno de los materiales pétreos seleccionados y empleados en los monumentos piloto (Conjunto Catedralicio, Plaza Mayor y Puente Romano de Salamanca). La determinación de este objetivo hará posible establecer un nexo y afinidad litológica entre las facies de la cantera y del

monumento, justificándose y entendiéndose mejor las peculiaridades encontradas en la utilización práctica del material por parte del constructor y del arquitecto. Además, una precisa localización geológica de las canteras originales va a permitir, en su caso, una fiel reposición del material deteriorado, y, en general, una adecuada restauración o una nueva edificación en consonancia con el material original y con los cánones estilísticos y conservacionistas.

3. Analizar la respuesta de los materiales seleccionados frente a agentes externos y frente a los productos de conservación más comúnmente empleados (hidrofugantes, consolidantes, etc.), estudiando los procesos fisicoquímicos que tienen lugar en ambos casos, así como los cambios operados en su textura y estructura, de cara no sólo a predecir razonablemente su evolución sino también para evaluar la utilidad de los propios productos de conservación. Así mismo, se estudiarán métodos de limpieza no agresivos (aplicación de cataplasmas de arcillas) para la eliminación de sales y otros contaminantes.

4. Determinar la influencia de las sales solubles en agua en el deterioro de los materiales pétreos en función de su ubicación en el monumento. Su muestreo, análisis y tratamiento de datos en distintas ubicaciones dentro de los monumentos estudiados ha de constituir una metodología de gran utilidad para comprender la evolución de los diferentes materiales pétreos frente a este tipo de deterioro.

La consecución de todos y cada uno de los objetivos puede contribuir a la conservación racional del Patrimonio Cultural de Castilla y León, ayudando a que las inversiones en el mismo sean más rentables y efectivas, sobre la base que las medidas preventivas han de suponer siempre un menor coste que las de regeneración, siendo sus potenciales usuarios y beneficiarios la Administración y los organismos responsables de la propia Conservación y Restauración.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las rocas, como todos los materiales, tienen unas propiedades intrínsecas que permiten diferenciarlas. Estas propiedades, en el caso de las rocas plutónicas, dependen principalmente de sus características geoquímicas, mineralógicas y petrográficas, las cuales son el reflejo de los procesos y ambiente genético. En última instancia, las rocas pueden verse afectadas por procesos tan variados como los agentes ambientales, la acción humana, etc., tanto en su entorno natural (canteras), como cuando forman parte de una edificación, como son los monumentos con interés histórico-artístico. Por esto mismo, es necesario tomar muestras en el entorno natural y en los monumentos piloto seleccionados y caracterizarlos.

En este capítulo se recoge la información relacionada con el muestreo del material y las técnicas que se han empleado en el laboratorio para su caracterización, así como la metodología seguida.

2.1 MATERIALES EMPLEADOS: MUESTREO Y PREPARACIÓN

Para determinar las características petrofísicas, químicas y mineralógicas de materiales es preciso disponer de un volumen suficiente de roca que nos permita, por un lado, la caracterización de los materiales de cantera, y por otro, el estudio de los resultados de sus envejecimientos artificiales acelerados y la aplicación de productos de conservación, así como el estudio de su durabilidad, con el fin de realizar estudios estadísticos comparativos.

Del mismo modo, es preciso la toma de muestras en el propio monumento, previa solicitud de los oportunos permisos a las autoridades competentes. El tamaño de la muestra dependerá de los requerimientos y de la disponibilidad. Lo más frecuente es tomar pequeñas escamas o placas, casi desprendidas, de un tamaño aproximado de 4 x 4 cm² de superficie, que con el tiempo se caerían por su peso. La profundidad aproximada sería de 1 cm. En este estudio el muestreo en monumentos se ha reducido a la toma de 15 muestras en la Plaza Mayor, 15 muestras en el Conjunto Catedralicio y 6 muestras en el Puente Romano (Tabla 2.1). Estas pequeñas muestras sirven para estudiar los procesos de deterioro superficial sufridos a lo largo del tiempo (García-Talegón *et al.*, 1999). En contadas ocasiones, se pueden tomar muestras de mayores proporciones de los monumentos en restauración, que corresponden a bloques que van a ser retirados, para realizar sobre ellos una caracterización completa en el laboratorio, aunque este no ha sido nuestro caso.

Tabla 2.1. Denominación de las muestras tomadas en los monumentos piloto, junto con el monumento al que pertenece y su procedencia, a priori.

| <i>Muestra</i> | <i>Monumento</i> | <i>Procedencia</i> |
|----------------|------------------|--------------------|
| CA 1 | Catedral | Calzadilla |
| CA 2 | Catedral | Calzadilla |
| CA 3 | Catedral | Calzadilla |
| CA 4 | Catedral | Calzadilla |
| CA 4' | Catedral | Calzadilla |
| CA 5 | Catedral | Calzadilla |
| CA 6 | Catedral | Calzadilla |
| CA 7 | Catedral | Martinamor |
| CA 8 | Catedral | Martinamor |
| CA 9 | Catedral | Martinamor |
| CA 10 | Catedral | Martinamor |
| CA 11 | Catedral | Martinamor |
| CA 12 | Catedral | Martinamor |
| CA 13 | Catedral | Martinamor |
| CA 14 | Catedral | Los Santos |
| PM 1 | Plaza Mayor | Calzadilla |
| PM 2 | Plaza Mayor | Calzadilla |
| PM 3 | Plaza Mayor | Calzadilla |
| PM 4 | Plaza Mayor | Calzadilla |
| PM 5 | Plaza Mayor | Calzadilla |
| PM 6 | Plaza Mayor | Calzadilla |
| PM 7 | Plaza Mayor | Martinamor |
| PM 8 | Plaza Mayor | Martinamor |
| PM 9 | Plaza Mayor | Martinamor |
| PM 10 | Plaza Mayor | Martinamor |
| PM 11 | Plaza Mayor | Los Santos |
| PM 12 | Plaza Mayor | Los Santos |
| PM 13 | Plaza Mayor | Los Santos |
| PM 14 | Plaza Mayor | Los Santos |
| PM 15 | Plaza Mayor | Calzadilla |
| PR 1 | Puente Romano | Los Santos |
| PR 2 | Puente Romano | Los Santos |
| PR 3 | Puente Romano | Los Santos |
| PR 4 | Puente Romano | Martinamor |
| PR 5 | Puente Romano | Calzadilla |
| PR 6 | Puente Romano | Calzadilla |

Aun siendo conscientes del daño que actuaciones indiscriminadas pudieran causar sobre el patrimonio artístico de Salamanca, no cabe duda que, bajo un estricto

control, estas tomas de muestras son imprescindibles para avanzar en el conocimiento sobre el deterioro de los materiales plutónicos estudiados, incluyendo la intensidad y control del proceso mismo, en coincidencia con los fines perseguidos en la Ley de Patrimonio Histórico (Ley, 1985).

En lo que respecta al muestreo del material de cantera, este se efectúa tras la identificación de las canteras originales. Se buscan bloques de piedra lo más similares posible a los encontrados en los monumentos y de dimensiones considerables, de modo que de ellos se pueda extraer del orden de 40 a 50 probetas de 6 x 6 x 6 cm³ de roca fresca. Las probetas se cortaron con sierra de diamante en la explotación de GRADESA en la localidad de Los Santos (Figura 2.1 y Figura 2.2)



Figura 2.1. Corte de probetas a partir de un bloque grande de granito de Los Santos



Figura 2.2. Probetas de vaugnerita (al fondo) y de granito de Los Santos (al frente)

Ya en el laboratorio, las probetas se limpian con agua y un cepillo para quitar el polvo y los restos que quedan tras el corte. Se comprueba su buen estado, eliminando aquellas que puedan presentar grietas, manchas de óxidos, que no estén frescas o que, de alguna manera, no sean representativas del material a estudiar. Posteriormente, las seleccionadas se marcan en una de sus caras, la cual ya no será tomada en cuenta para los estudios de color.

La denominación elegida en la presente memoria para los diferentes tipos de rocas plutónicas de cantera, es la siguiente:

- C: Vaugnerita de Calzadilla del Campo
- L: Granito gris de Los Santos
- M: Leucogranito con turmalina de Martinamor

Debido al gran número de probetas empleadas, tras la letra que indica el tipo de roca plutónica (C, L o M), se añade un número, ej.: C5, M3, L22. Para diferenciar las muestras que han sido sometidas a tratamientos de consolidación e hidrofugación, se añaden las siglas de los productos empleados (RC80, RC70 y H224), ej.: C5 RC70: Vaugnerita de Calzadilla del Campo que ha sido tratada con el consolidante RC70. Aquellas que han sido envejecidas artificialmente se les añade:

- HD, para el envejecimiento por hielo/deshielo-frío/calor;
- CS, para las envejecidas por cristalización de sulfato sódico y,
- HD+CS, para las envejecidas por hielo/deshielo-frío/calor combinado con cristalización de sulfato sódico

Así, por ejemplo, una muestra de granito de Los Santos, tratada con hidrofugante (H224) y después envejecida por hielo/deshielo junto con frío/calor tendrá la denominación: L13 H224 HD.

Sobre estas probetas se realizan una serie de procesos que se resumen en la Figura 2.3

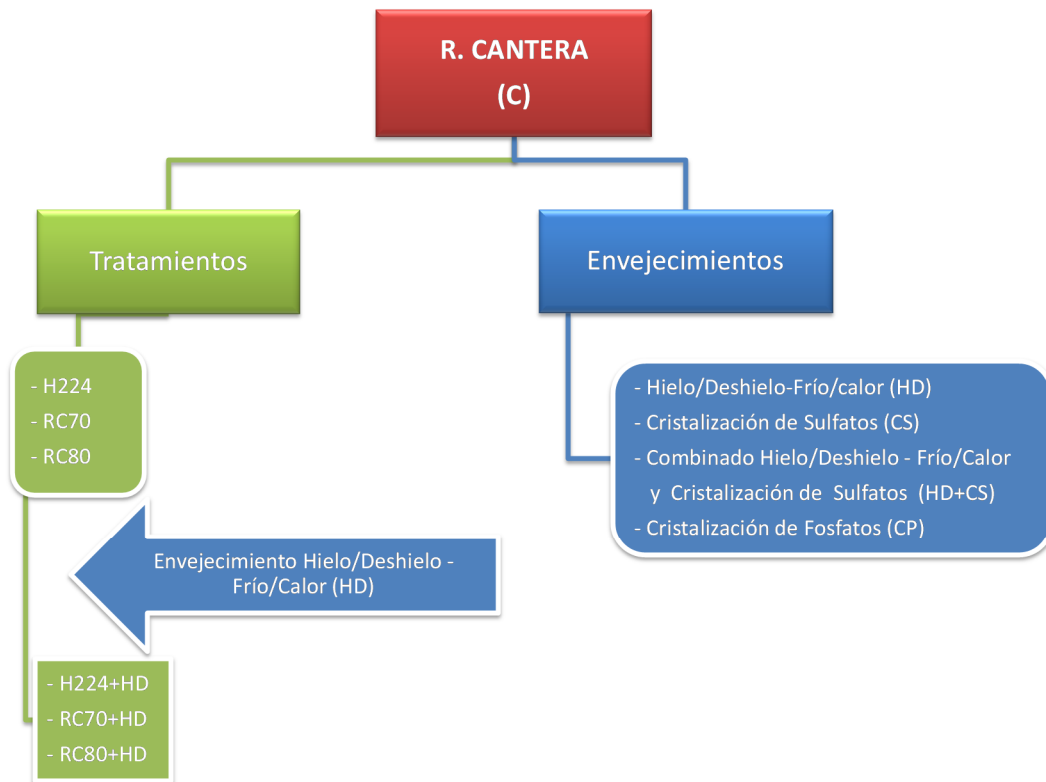


Figura 2.3. Esquema de los procesos a los que se han sometido las muestras de cantera de las tres variedades estudiadas

A grandes rasgos, podemos introducir el esquema de trabajo según el cual, las probetas de roca de cantera de las tres variedades, se someterán a tres tipos de envejecimientos acelerados para comprobar su durabilidad, envejecimiento por hielo/deshielo con frío/calor (HD), por cristalización de sulfatos (CS) y, envejecimiento combinado por hielo/deshielo-frío/calor con cristalización de sulfatos (HD+CS). Del mismo modo, se les aplicarán tres tipos de tratamientos, uno de hidrofugación (H224), otro de consolidación (RC70) y otros de consolidación e hidrofugación (RC80) y se establecerá su eficacia mediante distintos ensayos. Para comprobar la durabilidad de estos tratamientos de conservación aplicados, las muestras obtenidas tras su aplicación serán posteriormente envejecidas por hielo/deshielo-frío/calor y se estudiará su comportamiento tras dicho envejecimiento.

Por otro lado, dada la importancia que tienen los procesos de cristalización de sales (haloclastía), que generan el mayor deterioro en los monumentos, como han descrito varios autores (Arnold y Zehnder, 1989, Vicente, 1996) y para simular las condiciones de deterioro que presentan las distintas variedades pétreas por estos procesos en los monumentos, se ha optado por aplicar un envejecimiento artificial con cristalización de sulfatos sobre probetas de roca de cantera de las tres variedades y obtener unas «rocas de cantera con sales». Tras este envejecimiento con sales, estas

probetas se desalan empleando cataplasmas de sepiolita húmeda, como se describe más adelante en este capítulo. A este nuevo tipo de rocas de cantera, envejecidas con sales y desaladas, las llamaremos desde ahora «CS». En la Figura 2.4 aparece el esquema del proceso al que se someten las probetas de cantera (C), hasta tener las probetas CS.



Figura 2.4. Esquema del proceso de obtención de las probetas CS.

Al igual que en las probetas de cantera (C), sobre estas probetas CS se realizan una serie de procesos que se recogen en la Figura 2.5.

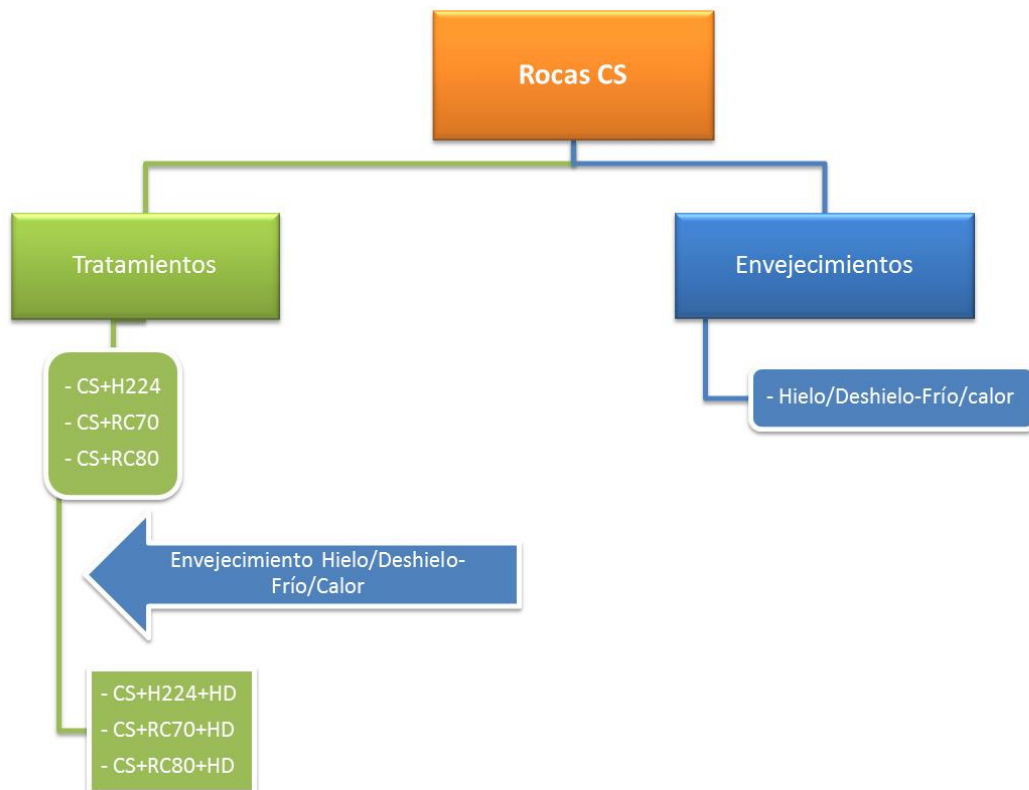


Figura 2.5. Esquema de los procesos a los que se han sometido las muestras CS.

Las probetas CS sólo se someten a envejecimiento por hielo/deshielo-frío/calor para establecer su durabilidad y al igual que a las rocas de cantera, se aplican los mismos tres tipos de productos de conservación para valorar su eficacia. Posteriormente, la durabilidad de estos productos se determinará tras aplicar a las probetas envejecimiento por hielo/deshielo-frío/calor.

2.2 CARACTERIZACIÓN PETROLÓGICA Y MINERALÓGICA

El estudio mineralógico y petrográfico de las distintas variedades pétreas comienza con una observación de las muestras de *visu*, aplicando después técnicas como: la microscopía óptica, la difracción de rayos-X y la microscopía electrónica de barrido, que se detallan a continuación.

2.2.1 MICROSCOPIA ÓPTICA

La microscopía óptica, en este caso, se ha realizado empleando un microscopio de luz natural y polarizada LEITZ, Larbolux 12 Pol S. Como soporte para las interpretaciones de los resultados petrográficos, se ha recurrido a la bibliografía clásica: MacKenzie y Guilford (1980), MacKenzie *et al.* (1982). Los cálculos modales, para el análisis mineralógico en volumen, se han realizado en el Área de Petrología y Geoquímica, Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca, utilizando un contador convencional de marca SWIFT, Basingstoke, Inglaterra.

En lo que a muestras de cantera se refiere, se han obtenido láminas delgadas de muestras de las distintas variedades seleccionadas en estado fresco y de otras facies presentes en las mismas canteras.

Las muestras de los monumentos se han tomado en aquellos puntos donde se identificaron las diversas variedades líticas escogidas, seleccionando las zonas que presentaban desplazaciones (tanto en sección transversal como longitudinal), puesto que el resto de formas de alteración no permitían su extracción en volúmenes mínimos precisos para una correcta preparación de láminas delgadas.

Las láminas delgadas, para el estudio a través de microscopía óptica, han sido preparadas en el «Servicio General de Preparación de Láminas Delgadas» del Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca.

2.2.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

La difracción de rayos-X es una técnica ampliamente empleada en estudios mineralógicos, para la identificación de las distintas especies cristalinas que componen un material geológico. Se ha seguido la técnica de «polvo microcristalino» aplicado a muestras de roca total, que permite registrar las difracciones correspondientes a los distintos planos que constituyen un cristal.

Se ha empleado un difractómetro PHILIPS PW-1730, con goniómetro PW-1050/81 y control de difractómetro PW-1710, utilizando radiación $K\alpha$ del cobre ($\lambda = 154,04$ pm), con filtro de níquel, de 50 kV y 40 mA y condiciones estándar de registro. Para seleccionar la radiación $K\alpha$ del cobre, se empleó un monocromador de grafito. La señal del difractómetro ha sido procesada por un ordenador equipado con un sistema X'Pert Quantify y X'Pert HighScore de PANalytical para la identificación de fases por Difracción de rayos-X.

Para la identificación de los minerales de las muestras a partir de las posiciones de sus máximos de difracción se han seguido, fundamentalmente, los textos de Brindley y Brown (1980), Bayliss *et al.* (1986a, 1986b) y el fichero ASTM del J.C.P.D.S. (1974).

2.2.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

Esta técnica permite estudiar la micromorfología de las fases minerales, la microtextura de la roca, la estructura del sistema poroso y la composición química micropuntual de un material, conservando su estructura. Además permite ratificar los resultados de la caracterización mineralógica, siendo de gran interés en el estudio de las transformaciones que tienen lugar en los procesos de alteración en cantera y en deterioro en los monumentos. Se ha aplicado a fragmentos de las probetas de un tamaño aproximado de $0,5 \times 1$ cm², previamente secados a 60 °C durante 3 h, habiendo sido ya observados a la lupa binocular.

Para su estudio, las muestras se adhieren con pegamento carbonoso a un porta objetos de cobre y, a continuación, se metalizan con oro para que la superficie de la muestra sea conductora frente al haz de electrones incidente.

Para este estudio, se ha utilizado el equipo de Microscopía Electrónica de Barrido del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, un microscopio modelo JSM-5400, de la casa comercial JEOL, con sistema de microanálisis por energías dispersivas

de rayos X Link-ISIS. Para metalizar las muestras se ha utilizado un metalizador de oro Telstar Sputter coater K550.

2.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

La caracterización química se ha llevado a cabo, tanto en muestras de las tres variedades pétreas estudiadas e identificadas en los afloramientos, como en las tomadas en los monumentos «piloto». Para la determinación de elementos mayores y trazas se ha empleado un Espectrómetro de Emisión con Plasma Acoplado por Inducción (ICP) con Espectrometría de Masas (ICP-Masas). El estudio isotópico se realizó mediante Espectrometría de Masas. Para la determinación de los aniones y cationes de las sales solubles en agua presentes en las muestras, la Cromatografía Iónica y la Absorción Atómica, respectivamente.

2.3.1 ELEMENTOS MAYORES Y TRAZA

Los análisis de roca total de las muestras, se han elaborado en el «Servicio General de Análisis Químico Aplicado» de la Universidad de Salamanca, analizando elementos mayores, traza y elementos del grupo de las tierras raras. La determinación de los elementos mayores se realizó por Espectrometría de Emisión en Plasma Acoplado por Inducción con un Espectrómetro Óptico, modelo Plasma II de la casa comercial Perkin Elmer, con inyector automático y un equipo de microanálisis elemental LECO CNHS932, mientras que los elementos trazas y los elementos del grupo de las tierras raras se determinaron mediante ICP-Masas.

En el «Servicio General de Análisis Químico Aplicado» de la Universidad de Salamanca, para la disolución de las muestras en polvo se realizó un ataque en medio ácido ($\text{NO}_3\text{H} + \text{FH}$) bajo presión en un digestor de microondas, modelo MILESTONE MLS-1200. El equipo, con control de temperatura, permite la utilización de vasos de alta y media presión utilizando una potencia máxima de 1600 W.

Para la determinación de los elementos mayores y trazas, exceptuando el Rb, las soluciones obtenidas fueron tamponadas con ácido bórico. Por último, para la determinación de Rb, se empleó Espectrometría de Masas con un equipo modelo Elan 6000 de la casa comercial Perkin Elmer, con inyector automático dentro de una campana de flujo laminar.

Para algunas muestras seleccionadas, y determinados elementos trazas, seleccionados por su mayor representatividad, se realizaron análisis en el ACTLABS, Ancaster, Canadá, complementando los análisis ya realizados para los elementos traza y tierras raras en Salamanca. Se determinó el contenido en hierro en forma de óxido ferroso (FeO %), utilizando las técnicas convencionales de valoración, y el porcentaje en flúor (F %) para algunas muestras, utilizando un pH-metro con Electrodo Selectivo de este ión.

2.3.2 ESTUDIO ISOTÓPICO

Las muestras seleccionadas para el estudio isotópico de Rb-Sr y Sm-Nd se analizaron en el «Servicio General de Geocronología y Geoquímica Isotópica» de la Universidad del País Vasco. Los análisis de Sr se realizaron sobre filamento de Ta, mientras que los de Sm y Nd se realizaron sobre un triple filamento de Ta-Re-Ta. Todos se determinaron usando ionización térmica en un Espectrómetro de masas VG Sector 54, con los datos adquiridos por medio de un multicolector en modo *multidynamic*, a excepción del Sm que fue medido por colección simple. Se corrigieron las medidas de Sr, de las posibles interferencias de ^{87}Rb y se normalizó a $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,1194$. Las medidas de Nd se corrigieron de la interferencia del ^{142}Ce y ^{144}Sm , y se normalizaron a $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,7219$. Durante este estudio el valor medio del standard NBS-987 para $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ fue de $0,710271 \pm 0,00002$ ($n = 12$) y para $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, de $0,511806 \pm 0,000005$ ($n = 7$), valores que son equivalentes a aquellos obtenidos por este laboratorio en un periodo de 24 meses para $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,710261 \pm 0,00002$ (2σ , $n = 112$) y para $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,511809 \pm 0,000008$ (2σ , $n = 41$). Los valores de ϵNd se calcularon con los siguientes parámetros: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512638$; $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,1967$. El error 2 SD calculado para el valor de ϵNd es de $\pm 0,4$.

Los análisis isotópicos de oxígeno se realizaron en «El servicio general de Isótopos Estables» de la Universidad de Salamanca. La extracción del oxígeno para los análisis isotópicos se realizó por la técnica de Clayton y Mayeda (1963), pero empleando una técnica de carga similar a la descrita por Friedman y Gleason (1973) y ClF_3 como reactivo (Borthwick y Harmon, 1982). En la vasija de níquel se añaden unos 10 mg de muestra finamente molida, dejándola reaccionar durante 15 h a 690 °C. El oxígeno liberado se convierte en CO_2 por medio de una barra de carbono calentada por un alambre de platino. Las relaciones isotópicas se determinaron en un espectrómetro de masas de fuente gaseosa VG SIRA-II. Los resultados se expresan en la notación habitual, como valores de $\delta^{18}\text{O}$ relativos al estándar de referencia V-SMOW. La reproducibilidad total típica de los duplicados está dentro del $\pm 0,2\%$ (1σ).

2.3.3 DETERMINACIÓN DE ANIONES Y CATIONES SOLUBLES EN AGUA

La Cromatografía Iónica se aplicó para identificar y cuantificar los aniones de las sales solubles en agua presentes en las muestras tomadas en distintas partes de los monumentos, afectadas por humedades de ascenso capilar y filtraciones, y para el control de la capacidad de extracción de estas sales por cataplasmas de Sepiolita en las tres variedades de piedras estudiadas, previamente envejecidas artificialmente por cristalización de sales, con sulfato sódico decahidratado, según la norma V.1 α de RILEM (1980).

La extracción de las sales, en todos los casos, se llevó a cabo empleando 100 ml de agua desionizada y 200 mg de muestra. La solubilización, se realizó mediante el procedimiento descrito por Iñigo *et al.* (2001), basado en la aplicación de ultrasonidos. Este método ha mejorado sustancialmente el de la norma italiana NORMAL (1983) y se lleva a cabo sometiendo las muestras a ultrasonidos en un baño de ultrasonidos, modelo ULTRASONS-H con calefacción, de la casa SELECTA, empleando una frecuencia de 50 KHz. Una vez que las sales se han disuelto, se separa la fase sólida de la líquida mediante centrifugación, con una centrifuga EPPENDORF 5804, y la fase líquida se analiza por Cromatografía Iónica.

Para la determinación y cuantificación de los principales aniones solubles en las rocas (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , etc.), se empleó un equipo de Cromatografía iónica con supresión química de la casa Metrohm. El equipo es un sistema modular formado por una Bomba 709 IC, un Detector 732 IC, un Centro de Separación 733 IC, un módulo de Supresión Metrohm MSM y una Bomba Peristáltica 752 IC. La columna usada es de intercambio iónico para aniones (A SUPP 5-150 de Metrohm, de 4 mm ID X 150 mm). Las señales obtenidas por el detector fueron tratadas con un sistema Integrador IC Metrodata para Windows.

Los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ de las soluciones se determinaron en un Espectrómetro VARIAN A-1475, como cationes de cambio con extractos de acetato amónico. El Ca^{2+} y Mg^{2+} por Absorción Atómica, y el Na^+ y K^+ , por Emisión, en el mismo equipo. Los análisis se llevaron a cabo en el Área de Servicios Generales del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de CSIC de Salamanca.

2.4 ESTUDIO DE LA POROSIDAD

La red poral de una roca, definida por la cantidad de poros, el tamaño y la distribución de los mismos, regula la dinámica de los fluidos en su interior e incide directamente en los procesos de alteración natural en cantera y deterioro en obra. Del diámetro de entrada de los poros dependen las presiones de cristalización, que transmiten el hielo o las sales a las paredes de los poros en los que cristalizan, provocando tensiones que pueden llegar a la rotura del material y la apertura de nuevas vías (Ordaz, 1983, Robert *et al.*, 1996).

Está comprobado que la microporosidad amplifica los efectos disgregadores del hielo. Diámetros de poro superiores a 5 μm permiten el drenaje exterior y la expulsión de fluidos de la línea de avance del frente de congelación, con lo que no tienen lugar los efectos disruptivos del hielo (Winkler, 1973, Camuffo, 1996).

También la interconexión entre los poros es importante. Aunque una roca tenga una microporosidad elevada, si la microporosidad está poco conectada con la superficie, puede genera poco deterioro, porque la dinámica de disoluciones no es elevada si los fluidos son inmóviles. Del mismo modo, una roca con meso- y macroporos, bien intercomunicados entre sí, y conectados a su vez con el exterior, puede permitir el paso de soluciones sin que ocurran modificaciones en su estructura que den lugar a alteraciones, de lo que se deduce que es tan importante la abundancia de espacios vacíos, como el tamaño, forma e interconexión de la red poral.

Diversos autores han realizado clasificaciones de los tipos de poros según su tamaño, proponiendo distintos tipos (microporos, mesoporos, macroporos, etc.) que responden a límites específicos de una técnica o campo de estudio, o bien a propiedades químicas y físicas de la roca o de los fluidos que se mueven en su interior (Choquette y Pray, 1970, Greenland, 1977, Sing *et al.*, 1985, Rodríguez Navarro y Sebastián, 1994, Rodríguez Navarro, 1998). En nuestro estudio, y en función del tamaño de poro, determinado por porosimetría de mercurio, se diferencia entre microporosidad (diámetro de poro < 7,5 μm) y macroporosidad (diámetro de poro > 7,5 μm) (Iñigo, 1995, Sanfeliu *et al.*, 2000).

El empleo de la técnica de porosimetría de mercurio es arriesgado para la determinación de la microporosidad, porque hay que emplear presiones muy elevadas con riesgo de producir fisuras o roturas artificiales en la piedra. Esta técnica es la más versátil, pero tiene este problema.

Teóricamente, se pueden destacar dos esquemas que modelizan la porosidad de una roca (Benavente, 2002):

1. El empaquetamiento de esferas (Dullien, 1992), que supone que la roca está formada por partículas esféricas y la porosidad depende del empaquetamiento y del tamaño de las partículas, y
2. El modelo de tubos capilares (Figura 2.6), en el que la porosidad está representada por un conjunto de tubos capilares de distintos tamaños que definen dos tipos de poros: Cuello de botella (*throat*) y Cámara (*chamber*). En este sistema los poros *chamber* definen la porosidad de la roca, mientras que los *throat*, (que unen los *chamber* entre sí) controlan las propiedades de flujo (Dullien, 1992).

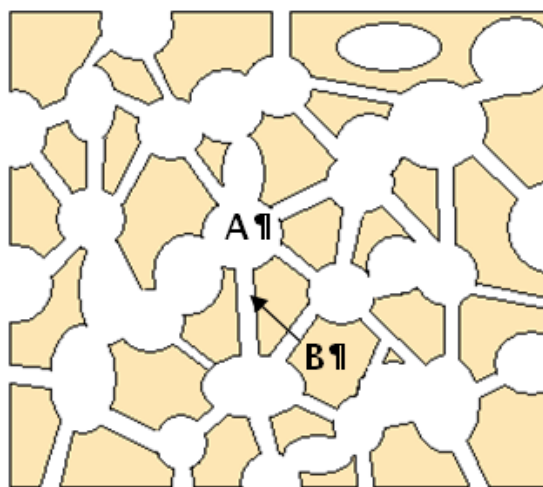


Figura 2.6. Esquema del modelo de tubos capilares. A poros tipo chamber, y B, tipo throat.

Este último método considera la geometría de las conexiones entre poros de diferentes dimensiones (*throat* y *chamber*), provocando que los *chamber* no se caractericen completamente y los *throat* se sobreestimen (Benavente, 2002).

De las distintas técnicas que permiten la determinación de la porosidad, en este estudio se han aplicado la porosimetría al mercurio y la porosidad al agua. La primera de ellas se debe aplicar según las características del material y del tipo de poros dominante.

2.4.1 POROSIDAD TOTAL ACCESIBLE AL AGUA, POROSIDAD LIBRE Y COEFICIENTE DE ABSORCIÓN

Para conocer el orden de porosidad que tiene un determinado material es muy útil la determinación de la porosidad accesible al agua, que además proporciona

información sobre la penetrabilidad de las soluciones acuosas, una de las principales causas de la alteración del material pétreo.

La *porosidad total accesible en agua* es el volumen total de poros abiertos del material en un volumen aparente, trabajando a la presión reducida de 20 mm de Hg. Se obtiene un resultado numérico, que indica el porcentaje de poros (NF, 1973a).

La *porosidad libre en agua* indica la proporción de la porosidad total accesible al agua a presión atmosférica por inmersión durante un tiempo dado, en nuestro caso, 48 h. Al ser accesible a los distintos fluidos es la que más influye en el deterioro de las rocas (NF, 1973b).

El *coeficiente de absorción* se define como la relación entre el volumen de agua presente en los poros de un material, después de inmersión completa a presión atmosférica durante un tiempo definido (48 h), y el volumen total de poros accesibles al agua a presión reducida de 20 mm Hg en el mismo tiempo. Es, por tanto, un coeficiente adimensional que se expresa generalmente en tanto por ciento con respecto al volumen total de poros (NF, 1973b).

El coeficiente de absorción depende de la estructura de los poros (dimensiones y reparto volumétrico) y proporciona información interesante sobre la durabilidad de un material poroso, ya que los procesos de alteración de las rocas, generalmente, dan lugar a un aumento del coeficiente de absorción, por aumento de la porosidad libre de dichas rocas.

Modo operativo: Según la Normativa Francesa B10-503 (NF, 1973a), para el cálculo de la porosidad total accesible al agua, previo secado de las probetas hasta peso constante (*M1*), se colocan las probetas en un desecador, donde se hace vacío hasta 20 mm Hg durante 24 h, para eliminar el aire contenido en los poros de las probetas. Al mismo tiempo, en otro desecador con agua desionizada, se hace la misma operación de desgasificación durante este mismo tiempo. Transcurrido el periodo de tiempo estipulado, se hace pasar lentamente el agua desionizada y desgasificada desde su desecador hasta el que contiene las probetas, respetando las condiciones de vacío reinantes en el desecador que contiene las probetas. La inmersión de las mismas se prolonga durante, al menos, 15 min, y una vez sumergidas completamente, se continúa la desgasificación 24 h más. A continuación, las probetas se mantienen 24 h a presión atmosférica. Finalizado así el ensayo, las probetas son pesadas; primero, sumergidas en agua (pesada hidrostática, *M2*) y luego, previo secado superficial con una gamuza húmeda, se determina la masa de la probeta saturada de agua en el aire (*M3*).

Con los pesos obtenidos en este ensayo, y teniendo en cuenta que la densidad del agua a 20 °C es 1 g/cm³, se calculan los siguientes parámetros:

- El volumen total de poros de la probeta por imbibición bajo vacío, mediante la expresión:

$$\text{Volumen total de poros} = M3 - M1$$

- El volumen absoluto, que se determina por la diferencia entre el peso de la probeta seca y la pesada hidrostática:

$$\text{Volumen absoluto} = M1 - M2$$

- El volumen aparente, entendido como la suma del volumen total de los poros y el volumen absoluto:

$$\text{Volumen aparente} = \text{Volumen de poros} + \text{Volumen absoluto} = M3 - M2$$

Así, la *porosidad total accesible al agua* vendrá expresada como el porcentaje del volumen de poros en el volumen aparente de la muestra, es decir:

$$\text{Porosidad Accesible en Agua} = \frac{M3 - M1}{M3 - M2} \times 100$$

Para la determinación del coeficiente de absorción, se sigue las indicaciones de NF (1973b), según la cual, previo secado de las probetas hasta pesada constante ($M1$), éstas son colocadas un tiempo t en un recipiente provisto en su fondo de una rejilla, con agua desionizada hasta un cuarto de su altura, de manera que el agua se absorba en las probetas por capilaridad, perpendicularmente a la superficie de apoyo de la piedra.

A tiempo $t+1$ h, se añade la cantidad de agua necesaria para que el nivel alcance la mitad de la altura de las probetas. A tiempo $t+22$ h, se añade agua hasta que las probetas estén completamente sumergidas. A tiempo $t+48$ h, se sacan las probetas del agua, se seca el agua retenida en la superficie de las mismas con la ayuda de una gamuza húmeda, para a continuación pesarlas ($M'1$).

El agua absorbida ($M'1 - M1$) rellena el volumen de los poros accesibles al agua a presión atmosférica. Este volumen, dividido por el volumen aparente de la muestra, proporciona el valor de la *porosidad libre*.

$$\text{Porosidad libre al agua} = \frac{M'1 - M1}{M3 - M2} \times 100$$

El coeficiente de absorción (CA) de agua se expresa como:

$$CA = \frac{M'1 - M1}{M3 - M1} \times 100$$

2.4.2 POROSIMETRÍA DE MERCURIO

La porosimetría por inyección de Hg permite la caracterización del sistema poroso de los materiales, permitiéndonos conocer, además de la porosidad accesible al mercurio de la muestra, su distribución porosimétrica en función del tamaño de poro.

Los resultados de esta técnica adquieren gran significado en términos relativos (ASTM, 1984), motivo por el cual el ensayo presenta gran utilidad en el análisis de la evolución del sistema poroso de un material sometido a distintos procesos físicos y/o químicos, tal como son los realizados en este estudio (alteración por diferentes envejecimientos acelerados bajo condiciones controladas, aplicación de tratamientos de conservación, etc.).

La porosimetría de mercurio se basa en los fenómenos de capilaridad generados por los líquidos que, como el mercurio, no mojan los sólidos con los que están en contacto.

Tal como se explica en Ordaz y Alonso (1983), en un capilar de sección circular y radio r , la tensión superficial que se opone a que el mercurio penetre en los poros es:

$$2\pi r\gamma\cos\theta \quad [1]$$

Siendo θ el ángulo de contacto y γ , la tensión superficial del mercurio (N/m).

Para vencer esa oposición y que el mercurio se introduzca en los huecos, se aplica una fuerza exterior (p) inversamente proporcional al radio de acceso de los poros por los que penetra.

$$\pi r^2 p \quad [2]$$

En el equilibrio, estas dos fuerzas opuestas son iguales:

$$2\pi r\gamma\cos\theta = \pi r^2 p \quad [3]$$

De donde se concluye (ecuación de Washburn):

$$pr = 2\gamma\cos\theta \quad [4]$$

donde:

p : presión aplicada (MPa)

r : radio de los capilares (μm)

γ : tensión superficial del mercurio (N/m)

θ : ángulo de contacto sólido-líquido, o en nuestro caso, mercurio-vapor de mercurio.

Así, las variables presión y radio de poro se relacionan entre sí mediante la ecuación de Washburn [4], quién sugirió obtener la distribución del tamaño de poros a partir de los datos presión-volumen obtenidos por intrusión de mercurio (Washburn, 1921).

En el caso de conductos cilíndricos ideales, empleando el mercurio como líquido penetrante, con una tensión superficial media de $480 \cdot 10^{-3}$ N/m, y con un ángulo de contacto medio del mercurio sobre superficies minerales silicatadas, experimentalmente deducido, en torno a $141,3^\circ$, se obtiene en la práctica la siguiente relación (Ordaz y Alonso, 1983):

$$r = \frac{7,5}{p} \quad [5]$$

donde el radio de los capilares, r , viene expresado en μm , y la presión, p , en Kg/cm^2 .

De acuerdo con las características del ensayo debe tenerse en cuenta las siguientes limitaciones (ASTM, 1984):

- Sólo se consideran poros abiertos, accesibles al mercurio.
- Al asumir un modelo de poros cilíndricos se determina un tamaño aparente: el de un poro ideal cilíndrico equivalente.
- Se determina el tamaño de los conductos por los que tienen acceso los poros a partir de la superficie del material, y no el tamaño de los poros situados en su interior.

Con respecto al equipo, para realizar este ensayo se utilizó un porosímetro de mercurio, modelo Poremaster 60, de la casa comercial QuantaChrome.

Las condiciones de análisis son las siguientes (Tabla 2.2):

Tabla 2.2. Condiciones de análisis con el porosímetro de mercurio

| | |
|--|----------------------------|
| <i>Tensión Superficial del Hg</i> | 480,0·10 ⁻³ N/m |
| <i>Ángulo de contacto del Hg (intrusión y extrusión)</i> | 141,3 ° |
| <i>Densidad del Hg</i> | 13,5 g/cm ³ |
| <i>Temperatura</i> | 20,0 °C |
| <i>Volumen de la celda</i> | 1,0 cm ³ |

En cuanto al procedimiento del ensayo y dada la influencia del ángulo de contacto en los resultados, debe cuidarse la limpieza de la muestra, de modo que la muestra, aparte de ser representativa, con un peso en torno a 1 g, debe ser limpiada y secada (a 60 °C), tomando su peso antes de su introducción en el porosímetro de mercurio.

El ensayo se realiza inyectando mercurio dentro de la muestra, incrementando las presiones paulatinamente, registrando la cantidad de mercurio que absorbe el material en cada caso, lo cual queda reflejado en una curva de intrusión. Una vez que se alcanza el punto de máxima presión, se retira de forma gradual al disminuir la presión aplicada, con lo que se fuerza la salida del mercurio, obteniendo la curva de extrusión. Así, un ensayo completo consta de una primera inyección a baja presión (hasta 50 PSI) y su correspondiente extrusión, y una segunda inyección a alta presión, también con su correspondiente extrusión. Teóricamente las muestras se pueden llevar hasta los 60.000 PSI, pero en algunos casos y por la posible rotura de la muestra (lo cual depende del tipo de material), se somete a presiones máximas menores.

Por otro lado, y a fin de minimizar los errores del método, se realiza otro ciclo de intrusión-extrusión, conocido como método de Pellerin (1980), que corrige en parte, el error inducido por la geometría del contacto entre los poros. Así, se diferencia la porosidad atrapada (correspondiente al mercurio que no ha abandonado los poros en la primera extrusión) y la porosidad abierta o libre al mercurio.

La diferencia entre la curva de intrusión y extrusión, refleja la dificultad que tiene el mercurio para abandonar los poros del tipo cuello de botella y la variación del ángulo de contacto del mercurio (Rodríguez García y García Ruiz, 1995). Este fenómeno de histéresis y es un indicador de la porosidad atrapada, la cual juega un papel muy importante en la retención de fluidos, y por tanto, en la alteración de la roca (Benavente, 2002).

La persistencia de un volumen de mercurio en ciertos ensanchamientos de la red poral se explica a la vez por la naturaleza del mercurio (alta tensión superficial) y por la geometría de los poros. En la extrusión, el mercurio, cumpliendo la ecuación de Washburn [4], queda atrapado en aquellos poros con radio inferior a r , de modo que la presión p de extrusión aplicada sobre el mercurio cumple que:

$$p \leq \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad [6]$$

En la Figura 2.7 se muestran dos modelos de la entrada del mercurio. En el caso A, el mercurio accede desde los poros más grandes a los más pequeños (desde los poros de tipo *chamber* hacia los de tipo *throat*), y para pasar de un poro a otro se requiere un aumento de presión, a la que le corresponde un aumento del volumen de mercurio que intruye. El caso B, es el opuesto, para acceder a los poros de mayor radio el mercurio debe intruir un poro de radio más pequeño. La consecuencia es que cuando se alcance la presión necesaria para intruir el poro $r1$, automáticamente el mercurio ocupará los poros de $r2$ y $r3$, lo cual induce al error de estimar el volumen de los tres poros como un único poro de radio $r1$. El caso C es una consecuencia del B, al descender la presión el mercurio abandona los poros, pero, en el caso de haber accedido a través de un estrangulamiento, gran parte del mercurio queda atrapado en la cavidad.

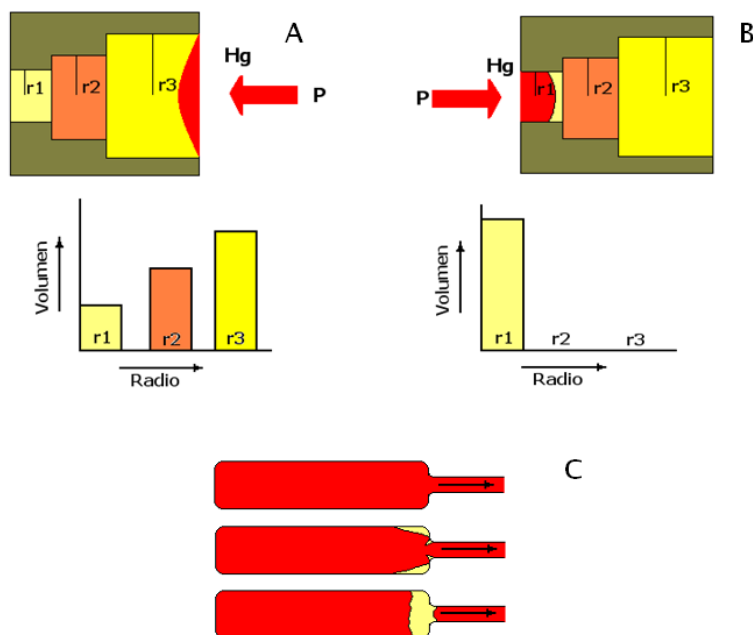


Figura 2.7. A y B: modelos de intrusión del mercurio dependiendo de la geometría del contacto entre los poros -modificado de Rodríguez Navarro (2003)-. C: Retirada de mercurio a través de un estrangulamiento (throat) (Iñigo, 1995).

Los resultados obtenidos se expresan en tablas y gráficas (RILEM, 1980, ASTM, 1984), como las curvas de distribución del volumen poroso con histogramas de frecuencia. Uno de los valores más importante en los histogramas, es la división que se puede establecer dentro de la porosidad entre la microporosidad y la macroporosidad. El comportamiento de un fluido varia notablemente si la red poral está conformada mayoritariamente por uno u otro tipo de porosidad, esto hace que sea un factor muy importante en la alterabilidad de la roca.

A pesar de sus limitaciones (posible rotura de las muestras), la porosimetría de mercurio se revela como una de los mejores métodos para caracterizar el sistema poral, aunque siempre es aconsejable combinarla con otras técnicas para minimizar los posibles errores. Así, para la zona microporosa se emplea la técnica de adsorción de nitrógeno y en la de macroporos, el análisis de imágenes (Figura 2.8) (Meng, 1993).

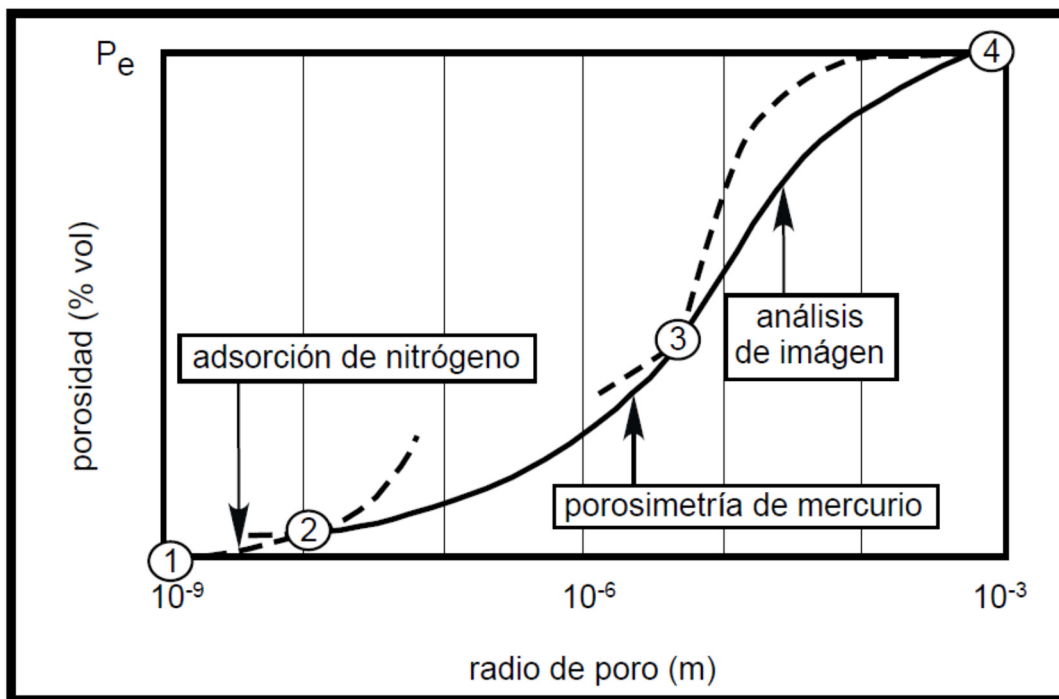


Figura 2.8. Distribución de las técnicas más apropiadas para el estudio de la porosidad en función del tamaño de poro (Meng, 1993)

2.5 PROPIEDADES PETROFÍSICAS DETERMINADAS EN AGUA

Todas las propiedades petrofísicas se han realizado sobre probetas cúbicas de $6 \times 6 \times 6 \text{ cm}^3$, previamente secadas a 60 °C hasta pesada constante. Se considera pesada constante cuando el resultado entre dos pesadas consecutivas efectuadas con un intervalo de 24 h se diferencia en menos de un 1 %.

Las propiedades petrofísicas en agua o hídricas son aquellas que determinan el comportamiento de la roca frente al agua. Teniendo en cuenta que el agua es el agente de alteración más importante para las rocas, estas pruebas son imprescindibles para determinar su durabilidad, la eficacia de los tratamientos, cuando las rocas son tratadas y, para el conocimiento de la red poral, que va a determinar la dinámica de los fluidos en el interior de la roca.

2.5.1 DENSIDAD REAL Y APARENTE

Para la determinación de estos parámetros se ha tenido en cuenta la recomendación de la Normativa Francesa (NF, 1973a), según la cual la Densidad Real (DR, g/cm^3) viene dada por el cociente entre la masa de la probeta seca y el volumen absoluto de la misma.

$$DR = \frac{\text{Masa probeta seca}}{\text{Volumen Absoluto}} = \frac{M1}{M1 - M2}$$

La Densidad Aparente (DA, g/cm^3) se define como el cociente entre la masa de la probeta seca y el volumen aparente (volumen limitado por la superficie exterior, correspondiente al volumen de poros más el volumen absoluto) de la probeta.

$$DA = \frac{\text{Masa probeta seca}}{\text{Volumen Aparente}} = \frac{M1}{M3 - M2}$$

2.5.2 CAPACIDAD DE IMBIBICIÓN

Esta propiedad se define como la cantidad máxima de agua absorbida por el material, por inmersión total en agua desionizada a presión y temperatura ambiente, expresada como porcentaje de la masa de la probeta seca.

La capacidad de imbibición de agua a presión atmosférica, CI, se determina siguiendo la normativa italiana NORMAL (1981) y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$CI = \frac{M_{\max} - M_{0f}}{M_{0f}} \cdot 100$$

donde: M_{\max} es la masa (g) de las probetas empapadas de agua al final del ensayo y M_{0f} es la masa (g) de las probetas secas al final del ensayo.

Modo Operativo: Previa pesada hasta peso constante, se colocan las probetas en un contenedor provisto de un soporte que reduzca al mínimo la superficie de apoyo. Se añade agua desionizada al contenedor hasta que las probetas estén completamente sumergidas y cubiertas de agua hasta 2 cm por encima de su cara superior. Durante las primeras 24 h, a intervalos de tiempo prefijados las probetas se sacan del baño, se secan con una gamuza húmeda, se pesan y sumergen de nuevo en agua.

Una vez pasadas las primeras 24 h, la prueba se repite a intervalos de 24 h, hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesivas sea inferior al 1 ‰, contabilizándose este valor como M_{\max} .

Al representar los valores del porcentaje del aumento de peso de la probeta húmeda (por absorción de agua por imbibición) con respecto a la misma seca, frente al tiempo (Figura 2.9), el valor asintótico (M_{\max}) puede no ser alcanzado en un intervalo de tiempo razonable y la aparición de procesos secundarios (ej. crecimiento de microorganismos) hace recomendable interrumpir la prueba. En tal caso es evidentemente imposible calcular el valor asintótico, pero una indicación del valor máximo (M_{\max}) puede ser calculada por la cantidad de agua absorbida después de 10 u 11 días. En este punto se procede nuevamente al secado de las probetas a masa constante para determinar el valor M_{0f} .

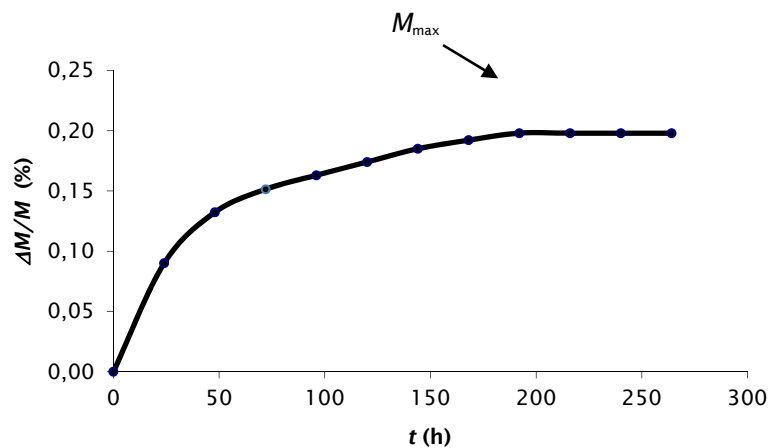


Figura 2.9. Ejemplo de la representación de los valores de la absorción de agua por inmersión total ($\Delta M/M$, en porcentaje) frente al tiempo (t , en horas).

2.5.3 PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA

La permeabilidad al vapor de agua es la cantidad de vapor de agua que pasa por unidad de tiempo (s) y de superficie (m^2) a través de un determinado espesor de material (1 cm), en régimen estacionario, a temperatura constante y cuando existe entre las dos superficies del material una determinada diferencia de presión parcial de vapor de agua. Permite conocer la transpiración natural de la piedra y, determinada antes y después de un tratamiento (consolidación y, sobre todo, hidrofugación), da una información importante para evaluar la eficacia de los mismos.

Su determinación se hace imprescindible en el caso de tratar de escoger el hidrofugante ideal para un determinado tratamiento, que impida el paso de las disoluciones y permita el paso del vapor.

En nuestro caso, y siguiendo la normativa RILEM (1978), se han utilizado probetas prismáticas de aproximadamente $6 \times 6 \text{ cm}^2$ de superficie y 1 cm de espesor.

Modo Operativo: Las probetas se colocan tapando un recipiente de plástico de tamaño adecuado, con 60 ml de agua en su interior (Figura 2.10), posteriormente se sellan con silicona las juntas entre la probeta y el recipiente para evitar pérdidas y se colocan a temperatura ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) y humedad relativa (30 %) constantes.

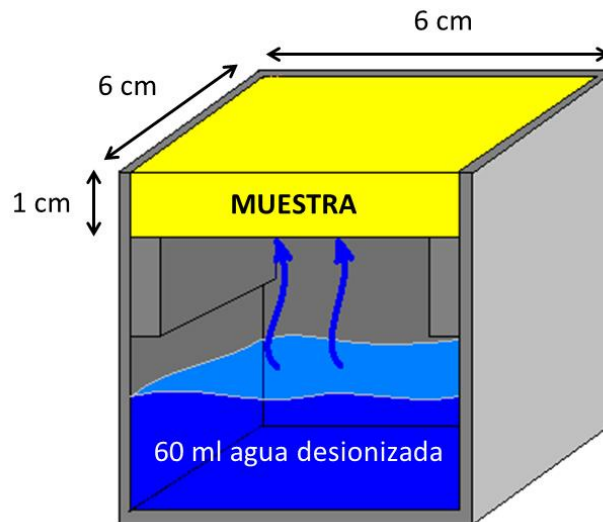


Figura 2.10. Esquema de la colocación de las probetas para la determinación de la Permeabilidad al vapor de agua. Esquema de Herrero Hernández (2007).

Se hace un seguimiento del vapor de agua transmitido, pesando cada 24 h los recipientes hasta la obtención de un valor prácticamente constante de la permeabilidad al vapor de agua a través de la superficie expuesta de cada muestra. La temperatura debe ser controlada durante todo el ensayo y los valores corregidos a la temperatura de 20 °C, ya que una variación de 1 °C de temperatura provoca cambios del 6 % en la presión parcial. Esta corrección se realiza según la siguiente fórmula:

$$Perm_{(20^{\circ}\text{C})} = \frac{Perm_{(Tx)} P_{(20^{\circ}\text{C})}}{P_{(Tx)}}$$

donde $P_{(20^{\circ}\text{C})}$ y $P_{(Tx)}$ son las presiones parciales de vapor de agua, y $Perm_{(20^{\circ}\text{C})}$ y $Perm_{(Tx)}$, son las permeabilidades al vapor de agua, ambas a las respectivas temperaturas.

2.5.4 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN CAPILAR

La absorción de agua por capilaridad es la cantidad de agua absorbida por unidad de superficie, en un tiempo t , a presión y temperatura ambiente, para una probeta cuya base está en contacto con agua desionizada.

El conocimiento de este parámetro es fundamental en el estudio de la posible degradación de un material de construcción, ya que los poros y fisuras constituyen los

núcleos de almacenamiento de agua y disoluciones, y la absorción capilar en muros es una de las fuentes de acceso de las disoluciones a la roca.

Modo Operativo: Según la normativa NORMAL (1986a) previo secado de las probetas hasta pesada constante, éstas se colocan en un contenedor (Figura 2.11) sobre un soporte poroso, constituido por papel de filtro tipo Whatman número 4 ó 41. A continuación, se adiciona al contenedor agua desionizada hasta completa imbibición del lecho de papel. El contacto de las probetas con este lecho tiene que ser bueno. Para reducir el efecto de la evaporación del agua y de las condiciones termométricas ambientales, el contenedor debe estar provisto de una tapa. Para evitar el goteo debido a la condensación del vapor de agua es oportuno colocar una hoja de papel de filtro sobre la pared interna de la tapa y para evitar la condensación debida al enfriamiento de las probetas por eventual irradiación es oportuno proteger el contenedor con una cubierta reflectante, por ejemplo, papel de aluminio.

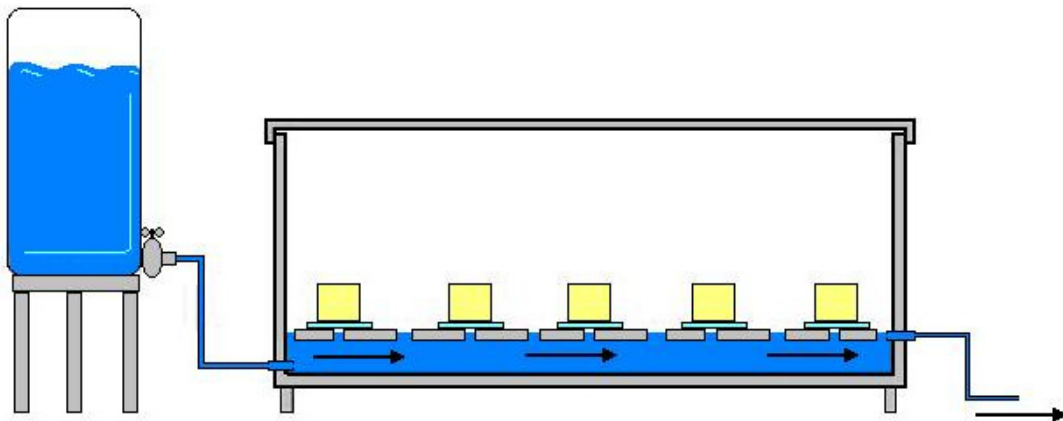


Figura 2.11. Esquema del experimento de la prueba del coeficiente de absorción capilar

Durante las primeras 24 h del ensayo y a intervalos de tiempo determinados las probetas son extraídas y su superficie es secada con una gamuza húmeda y pesadas. Después de cada pesada, nuevamente se ponen las probetas sobre el lecho de papel de filtro; la prueba se continúa hasta que la variación de la cantidad de agua absorbida en dos pesadas sucesivas, durante un intervalo de 24 h, sea inferior al 1%, momento en que se alcanza el valor asintótico de agua absorbida por capilaridad.

Con los valores obtenidos experimentalmente se construye la «curva de absorción capilar» (Figura 2.12). En general, la curva tiene un crecimiento inicial

rectilíneo para, posteriormente, tender asintóticamente a un valor constante M^* de la cantidad de agua absorbida. Sin embargo, puede que no se alcance el valor asintótico en un tiempo suficientemente breve y, a veces, es preciso interrumpir la prueba por la aparición de un fenómeno secundario, como puede ser el crecimiento de microorganismos. En tal caso, es imposible determinar el valor asintótico, M^* , y se toma un valor aproximado, que es el máximo, M_{max} , calculado por la cantidad de agua absorbida, tras 10 u 11 días.

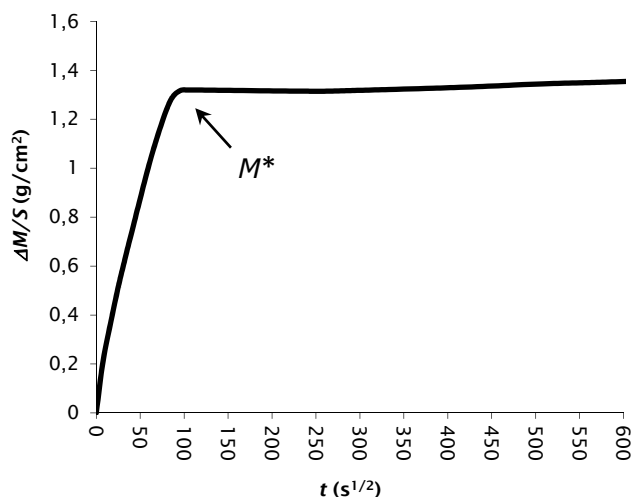


Figura 2.12. Curva de absorción capilar. M^* indica el punto donde se estabiliza la curva de absorción de agua.

La cantidad de agua absorbida por una probeta, M_i , por unidad de superficie al tiempo t_i , se calcula mediante la expresión:

$$M_i = \frac{m_i - m_0}{S}$$

donde m_i es la masa de la probeta bañada a tiempo t_i (g), m_0 es la masa de la probeta seca (g) y S la superficie de la probeta en contacto con el soporte poroso (cm²), determinada con una precisión del 5 %.

El Coeficiente de absorción capilar (g cm⁻² s^{-1/2}) se calcula a partir del tramo asintótico de la curva de absorción capilar, aplicando la fórmula:

$$CA = \frac{M^*}{t^{1/2}}$$

donde M^* es el valor asintótico de la cantidad de agua absorbida por las probetas por unidad de superficie (g cm^{-2}), y t la abscisa correspondiente al inicio del tramo rectilíneo asintótico de la curva de absorción capilar ($\text{s}^{1/2}$).

2.6 ANÁLISIS DEL COLOR

El color es una de las características elementales a tener en cuenta en un material de construcción y una de las propiedades a controlar cuando se realiza un tratamiento de consolidación y/o hidrofugación en rocas. En este último caso, normalmente lo que se busca, es que su variación sea la menor posible. Es una propiedad difícil de determinar, al depender principalmente no sólo de sus propiedades petrográficas, sino también de la iluminación, humedad, contaminación, los distintos acabados y del propio observador. Un color puede determinarse mediante varias técnicas (Esbert *et al.*, 1997):

- Cualitativa: mediante una apreciación subjetiva, que depende del observador.
- Semicuantitativa: se establece a través de la comparación con patrones, como son las «cartas de color» o el sistema Munsell.
- Cuantitativa: se obtienen valores numéricos, mediante el uso de técnicas instrumentales como colorímetros y espectrofotómetros.

Actualmente, para la definición de un color, este se descompone en tres valores, que pueden ser representados en un espacio (Figura 2.13):

- Tono (*hue*): corresponde a la tonalidad del color y depende de la longitud de onda de la luz.
- Croma (*chroma*): Corresponde al grado de viveza o intensidad del color.
- Luminosidad (*value*): corresponde a la claridad del color (de blanco a negro) y está relacionado con la intensidad luminosa y la reflectancia de la luz.

Para que dos colores sean iguales, estos tres parámetros que lo definen deben ser iguales

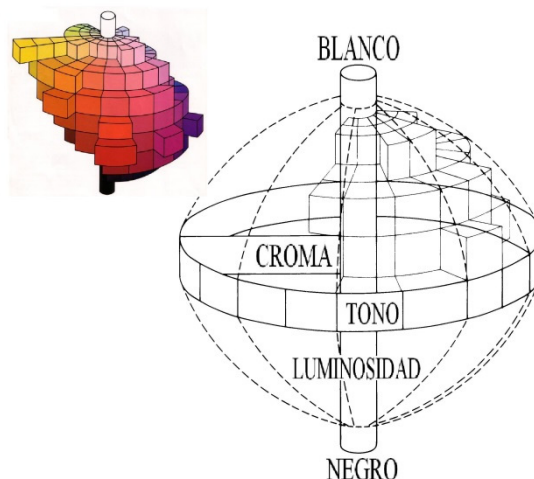


Figura 2.13. Sistema de representación cromática y determinación cuantitativa del color (tono, croma y luminosidad).

En 1931, la CIE, *Commission Internationale de l'Eclairage*, (CIE, 1931) definió los valores triestímulo (X , Y , Z). Sin embargo, actualmente, el sistema de color recomendado por la CIE (1976) (L , a , b) representa con más fidelidad la sensibilidad humana del color, motivo por el cual se ha seleccionado éste sistema en nuestro estudio. L es la variable luminosidad y, a y b son las coordenadas de cromaticidad. Las ecuaciones que relacionan estas coordenadas con respecto a las del triestímulo (X , Y , Z), teniendo en cuenta las dos posibles fuentes de iluminación estandarizadas por la CIE (C ó D65), son las siguientes:

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \quad a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_0} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

donde X_0 , Y_0 , Z_0 son los valores de los triestímulos de iluminación, que para la estándar C adoptan los valores $Y_0 = 100$, $X_0 = 98,072$ y $Z_0 = 118,225$, mientras que para la standard D65 adoptan los valores $Y_0 = 100$, $X_0 = 95,045$ y $Z_0 = 108,892$.

Para la medición del color se dispuso de un colorímetro para sólidos de la casa comercial Minolta, modelo CR-310, cuyo sistema óptico del cabezal de medida contiene (Figura 2.14):

- A) una fuente de luz blanca estandarizada del tipo C ó D65, generada por una lámpara de xenón, en una cámara de mezcla, que proporciona iluminación difusa uniforme sobre un área circular de 50 mm de diámetro
- B) un amplificador

- C) una placa difusora
- D) un cable de fibra óptica para recibir la luz reflejada perpendicularmente a la muestra, y
- E) un cable de fibra óptica para el control de la iluminación.

Como se aprecia en la figura, los únicos rayos que se miden son los que se reflejan perpendicularmente a la superficie de la muestra.

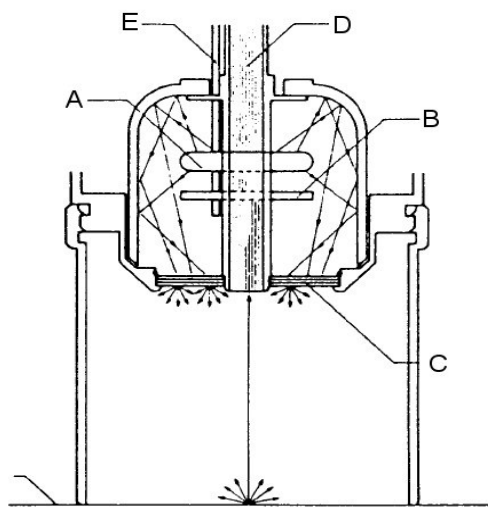


Figura 2.14. Esquema del cabezal del colorímetro Minolta CR-310.

Tres fotocélulas de silicón de alta sensibilidad controlan la salida de luz de la lámpara de xenón; cada una de ellas tiene un filtro, de manera que su respuesta espectral coincida con cada una de las curvas colorimétricas estándar CIE (Figura 2.15). El colorímetro detecta así cualquier pequeña desviación en la luz emitida por la lámpara, compensándola automáticamente. Otras tres miden la luz reflejada desde la superficie de la muestra, convirtiendo la luz recibida en corriente, cuya intensidad es proporcional a la luminosidad de la luz. Esta corriente se transforma en un voltaje analógico proporcional, que pasa a través de un convertidor A/D para hacerla digital. Esta señal la utiliza el microcomputador interno para determinar los valores triestímulo (X, Y, Z). Estos datos son automáticamente memorizados y pueden mostrarse en la pantalla de cristal líquido LCD del procesador, ser imprimidos o exportados a un ordenador.

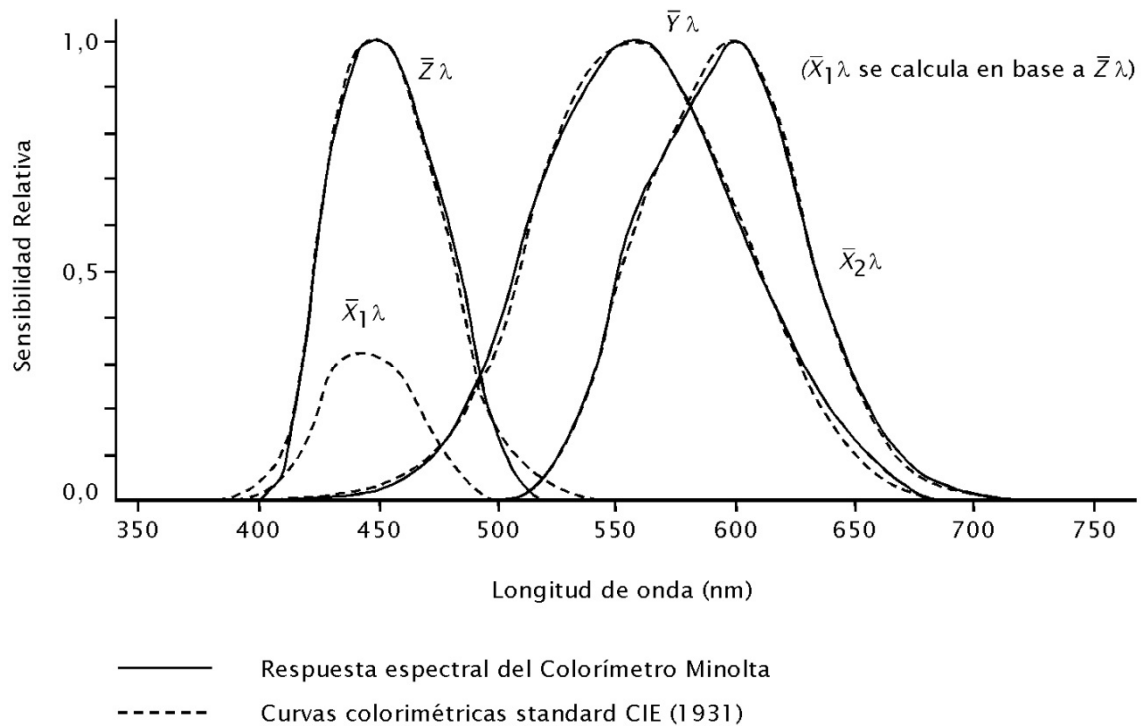


Figura 2.15. Respuesta espectral del colorímetro CR-310, comparada con cada una de las curvas colorimétricas estándar de la CIE (1931).

Las medidas de color de las probetas se realizan en cinco de sus seis caras, evitando la cara en la que está rotulada la denominación de la probeta. Usando las coordenadas medidas Robertson (1997) y Sève (1991) calculan el parámetro ΔE_{ab}^* de color (L^* , a^* y b^*), definido por la ecuación:

$$\Delta E_{ab}^* = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

2.7 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS

Los ultrasonidos son ondas elásticas con frecuencias superiores a 20 kHz (zona audible del espectro acústico). Un tren de ondas primario sale del emisor y llega al receptor, que recoge la señal después de que haya viajado a través de la piedra (García Talegón, 1995).

La velocidad de propagación de los ultrasonidos a través de la piedra depende de su densidad y de su elasticidad, a su vez, relacionadas con la calidad y resistencia

del material. Así, proporciona información interesante acerca de su homogeneidad, red poral, fisuras, etc. (García Talegón, 1995)

Para la medida de la velocidad de propagación se utilizó un Ultrasonic Test BPV de la casa comercial Steinkamp, que nos proporciona la medida de desfase temporal existente entre la onda incidente que sale del emisor, y la onda que atraviesa el material, recogida en el receptor. Conociendo este desfase de tiempo (Δt) y el espesor de la probeta (d), es inmediato conocer el valor de dicha velocidad (V), medida en las tres direcciones de la probeta, a partir de la siguiente expresión:

$$V = \frac{d}{\Delta t}$$

De igual modo, el valor de dicha velocidad, medida en las tres direcciones de una probeta, permite calcular de forma indirecta, por medio de un cálculo teórico, la resistencia a la compresión de la misma (Iñigo, 1995), sin embargo, en este estudio no hemos empleado la propagación de ultrasonidos para tales fines.

2.8 ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO

Para profundizar en el conocimiento de los procesos de deterioro de las piedras, las causas dominantes y los mecanismos que condicionan dichos procesos, se ha diseñado una serie de ensayos de envejecimiento artificial (alteración forzada en condiciones conocidas y controladas), que reproducen, por un lado, las condiciones ambientales más generales en el área de estudio, y por otro, los procesos de cristalización de sales. No se han realizado ensayos en atmósferas contaminadas, puesto que en Salamanca la baja contaminación atmosférica existente es prácticamente inoperante frente a las rocas graníticas.

Los ensayos de envejecimiento acelerado se han realizado en probetas cúbicas (6 x 6 x 6), según los trabajos de Tiano y Pecchioni (1990) y las recomendaciones de la RILEM (1980), teniendo en cuenta los datos medioambientales (clima y contaminación de aguas subterráneas no profundas).

Los ciclos de envejecimiento ensayados son (Figura 2.16): hielo/deshielo junto con frío/calor; cristalización de sales (sulfatos) y el ensayo combinado del primero con cristalización de sulfatos.

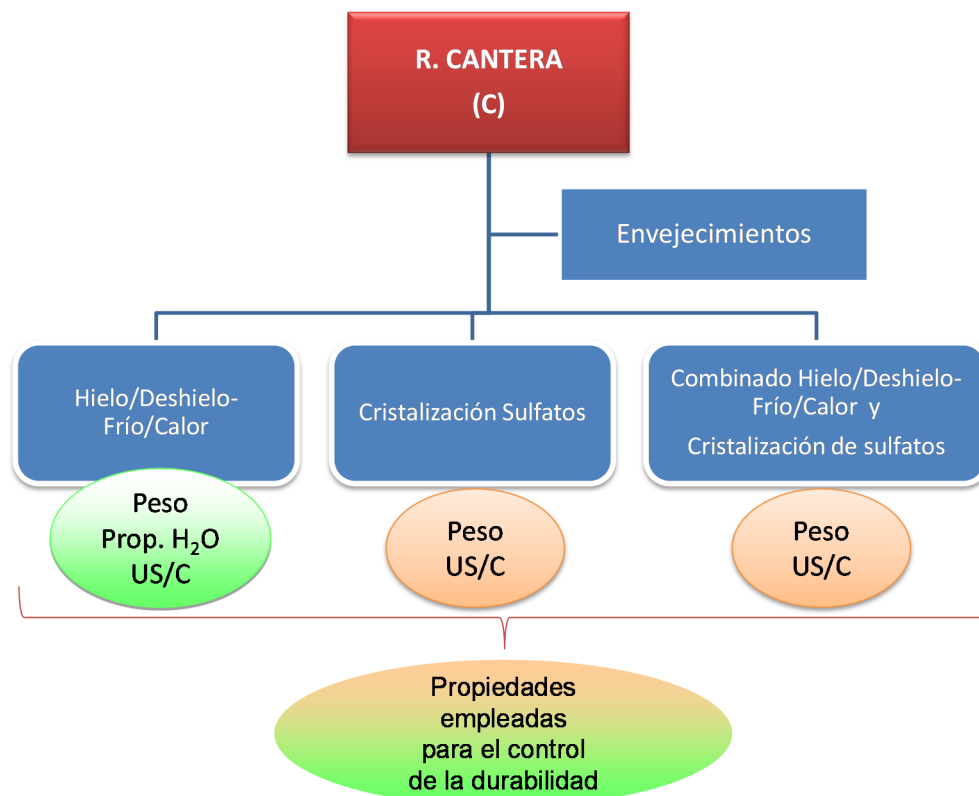


Figura 2.16. Esquema mostrando las distintas propiedades empleadas para el control de la durabilidad de las rocas de cantera frente a los distintos envejecimientos artificiales realizados. Prop. H₂O: propiedades hídricas. US/C: velocidad de propagación de ultrasonidos y color

El seguimiento de los resultados de los distintos envejecimientos artificiales acelerados se han estudiado de formas distintas, según sea la naturaleza del envejecimiento (Figura 2.16), aunque en todos los casos se han realizado exámenes de visu, como primer control del deterioro ocasionado y cuando sea considerado oportuno, se han analizado imágenes de MEB.

En las muestras sometidas a envejecimiento artificial acelerado por hielo/deshielo junto con frío/calor (HD) su durabilidad se establece mediante el estudio de:

- las variaciones ponderales
- las variaciones en la velocidad de propagación de ultrasonidos y del color
- las variaciones en las propiedades hídricas. Para estudiar las variaciones en las propiedades hídricas, los datos de las muestras así envejecidas se han incluido en el análisis Biplot Canónico (Vicente-Villardón, 1992) realizado para estimar la eficacia y durabilidad de los tratamientos de conservación mediante las variaciones en las propiedades hídricas.

En el caso de los envejecimientos por cristalización de sulfatos (CS) y el combinado de hielo/deshielo-frío/calor con cristalización de sulfatos (HD+CS), la durabilidad de las rocas de cantera se ha establecido mediante:

- el estudio de las variaciones ponderales, y
- las variaciones de en la velocidad de propagación de los ultrasonidos y del color.

En estos casos se ha prescindido del estudio de las variaciones de las propiedades hídricas, como recomiendan algunos autores (Silva *et al.*, 2000), pues la presencia de sales solubles en agua en los poros (que pueden quedar tras la desalación) interfiere en su determinación, al disolverse en el agua empleada en los ensayos, obteniendo así unas muestras no estables que cambiarían con el tiempo.

2.8.1 ENVEJECIMIENTO POR HIELO/DESHIELO JUNTO CON FRÍO/CALOR

Con este ensayo se pretende reproducir el efecto que los cambios bruscos de temperatura y humedad (termoclastia y gelifración) que se producen en Salamanca, y ver el efecto que tienen sobre la piedra. Para ello se ha empleado una cámara de simulación modelo UY600 de la marca ACS, con procesador J6000.

Se siguieron las recomendaciones de Tiano y Pecchioni (1990). Según estas, previo secado de las probetas hasta peso constante, se sumergen completamente en agua desionizada durante 16 h. Después se introducen en la cámara climática y se someten a un enfriamiento con una rampa de descenso, que lleva las probetas desde temperatura ambiente hasta $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 30 min. Se mantienen a esta temperatura durante 3 h para, a continuación, subir la temperatura a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 90 min, manteniendo esta temperatura durante otras 3 h. Finalmente, las probetas se sacan de la cámara y se dejan 2 h a temperatura ambiente y se reinicia el proceso hasta completar 25 ciclos.

Cada 5 ciclos realizados se controla el peso de las probetas, el color y la velocidad de propagación de ultrasonidos, con el fin de controlar e intentar cuantificar su deterioro. De igual modo, se observa si han sufrido alguna alteración apreciable, como fracturas, pérdida de material, etc.

Una vez finalizado el envejecimiento, además de controlar el peso, la velocidad de propagación de ultrasonidos y el color, se controlan las propiedades hídricas, tal como se ha descrito en apartados anteriores.

2.8.2 ENVEJECIMIENTO POR CRISTALIZACIÓN DE SALES

Como se ha indicado anteriormente, uno de los factores más degradativos es la cristalización de sales en la red poral de la piedra. Esta produce fuertes deterioros (arenizaciones, desplazaciones, disoluciones, etc.), dependiendo del tipo de material y sal o sales de que se trate.

Teniendo en cuenta que, tanto en los morteros comúnmente empleados (cal, yeso, cemento, etc.), como en los principales contaminantes atmosféricos (óxidos de nitrógeno, carbono y azufre) procedentes de la combustión de hidrocarburos, hay presencia azufre, se consideró apropiado el estudio de la cristalización de sales de sulfato como agente degradante del material pétreo. Con el fin de reproducir las patologías producidas por la acción física de su cristalización (aumenta su volumen al pasar de estado líquido a sólido), se sometieron algunas probetas de roca fresca a un ensayo de cristalización de sales de sulfato, para lo cual se empleó una variedad de sulfato sódico decahidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$), en disolución al 14 %.

El procedimiento para realizar los ciclos de cristalización es el siguiente (RILEM, 1980): las probetas, previamente secadas en estufa a 60 °C, hasta peso constante, se sumergen en una disolución de las sales antes indicadas, durante 2 h, sellando el recipiente para evitar la evaporación y mantener la concentración de sales constante. Pasado este tiempo, se sacan y se dejan escurrir durante 15 min a temperatura ambiente, antes de introducirlas en la estufa a 105 ± 5 °C, donde permanecen 16 h (tiempo mínimo recomendado por la normativa). Durante este tiempo las probetas deberán tener una humedad relativa elevada en la estufa, motivo por el cual, media hora antes de introducir las probetas, se pone en la estufa un recipiente con agua (unos 300 ml para 48 probetas). Posteriormente, se sacan de la estufa y se dejan enfriar durante 6 h al aire, de modo que ya quedan en disposición de comenzar nuevo ciclo con otra inmersión.

En la normativa se recomienda la repetición de 15 ciclos, a menos que la probeta se desagregue antes. En nuestro caso hemos modificado el número de ciclos, llevando las probetas hasta 50 ciclos dado que no se desagregaban. Debe controlarse la concentración de la disolución durante el tiempo que dura el ensayo, pues lo normal es que tenga que renovarse.

Para controlar la evolución de este proceso, se lleva un registro de los pesos, así como de los valores de color y de la velocidad de propagación de ultrasonidos cada cinco ciclos de envejecimiento, observando si se han producido fracturas, pérdida de material, etc. en la superficie de las probetas.

2.8.3 ENVEJECIMIENTO COMBINADO POR HIELO/DESHIELO JUNTO CON FRÍO/CALOR Y CRISTALIZACIÓN DE SALES

El procedimiento seguido, recomendación modificada de Tiano y Pecchioni (1990), es idéntico al del apartado 2.7.1 de la presente memoria, pero en lugar de sumergir las probetas en agua desionizada, estas se sumergen en una solución al 14 % de sulfato sódico decahidratado. Además, esta modificación se concreta en la suavización de las diferencias de temperatura empleadas (de -20 °C a 110 °C, en lugar de -28 °C a 160 °C) y un aumento de la concentración salina (14 % en lugar de 10 %).

Las probetas se sometieron a 25 ciclos, controlando cada 5 ciclos el peso, color y la velocidad de propagación de ultrasonidos, para estimar el deterioro de las mismas, verificándolo visualmente (presencia de fracturas, pérdidas de material, etc.).

2.9 TRATAMIENTOS

Se han ensayado tratamientos de limpieza, consolidación y protección (hidrofugación), los tres tipos principales de actuación de conservación sobre materiales pétreos.

Los productos de consolidación e hidrofugación se han elegido de forma que su composición permita prever que no se van a producir reacciones secundarias no deseables al entrar en contacto con la piedra (Villanueva, 1991), sobre la que inducirían la modificación de ciertas propiedades petrofísicas, que controlan y determinan la penetración de fluidos a través de las mismas. Del mismo modo los productos empleados en los diferentes tratamientos (consolidación, hidrofugación, etc.) no deben alterar el aspecto superficial de la piedra tratada (Iñigo *et al.*, 1997). Estos compuestos fueron suministrados por Bluestart SILICONAS HISPANIA, del grupo Rhône Poulenc.

Como ya se ha indicado anteriormente en este capítulo, tanto las rocas de cantera, como las CS se han sometido a estos tratamientos de conservación

(hidrofugante H224, consolidante RC70 y consolidante + hidrofugante RC80) (Figura 2.3 y Figura 2.5).

La eficacia de estos tratamientos sobre las rocas de cantera (C) (Figura 2.17) se evalúa mediante el control de:

- las variaciones ponderales,
- las variaciones en las propiedades hídricas y,
- las variaciones en la velocidad de propagación de ultrasonidos y del color

Para establecer la durabilidad de los tratamientos de conservación aplicados, estas rocas de cantera tratadas se someten a un envejecimiento artificial acelerado por hielo/deshielo junto con frío/calor, cuyo efecto se controla y observa con las mismas herramientas empleadas para determinar la eficacia de los tratamientos, y los datos se tratan estadísticamente junto con los datos de eficacia.

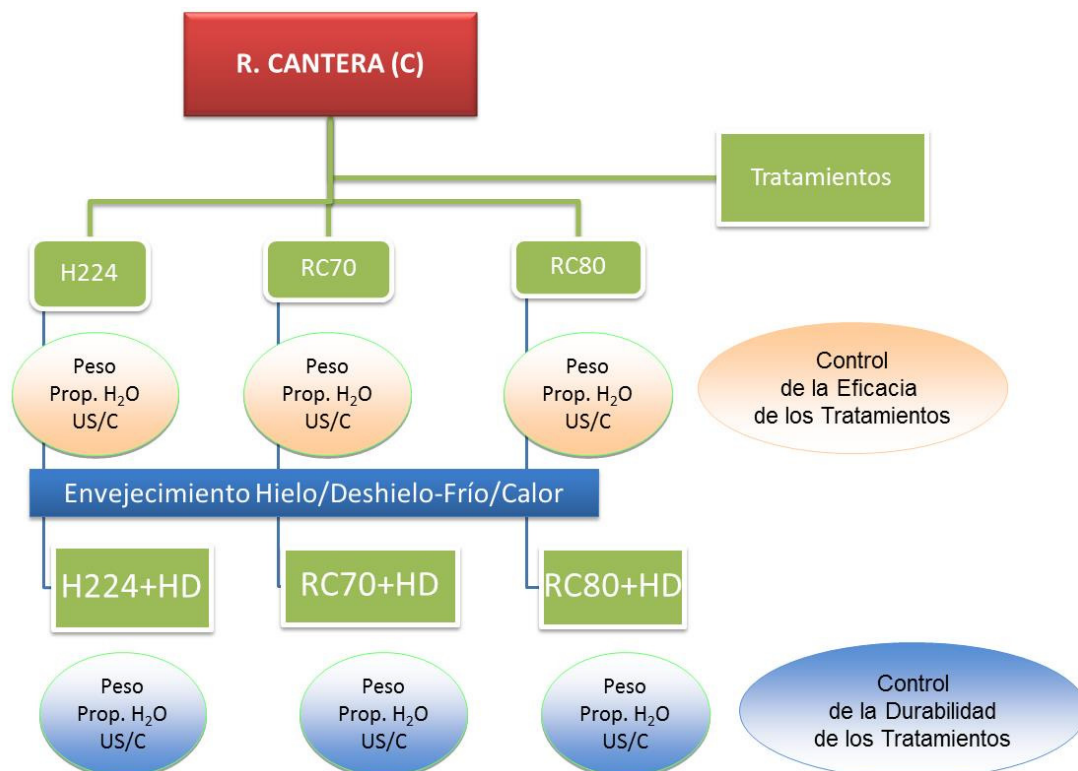


Figura 2.17. Esquema de los tratamientos aplicados a las rocas de cantera y las propiedades empleadas para controlar su eficacia y durabilidad frente a procesos de hielo/deshielo con frío/calor. Prop. H₂O: propiedades hídricas. US/C: velocidad de propagación de ultrasonidos y color

La eficacia de estos tratamientos sobre las rocas CS se evalúa mediante el control de:

- las variaciones ponderales y,
- las variaciones en la velocidad de propagación de ultrasonidos y del color

Para establecer la durabilidad de los tratamientos aplicados, estas rocas tratadas se someten a un envejecimiento artificial acelerado por hielo/deshielo junto con frío/calor, cuyo efecto se controla y observa con las mismas herramientas empleadas para determinar la eficacia de los tratamientos (Figura 2.18).

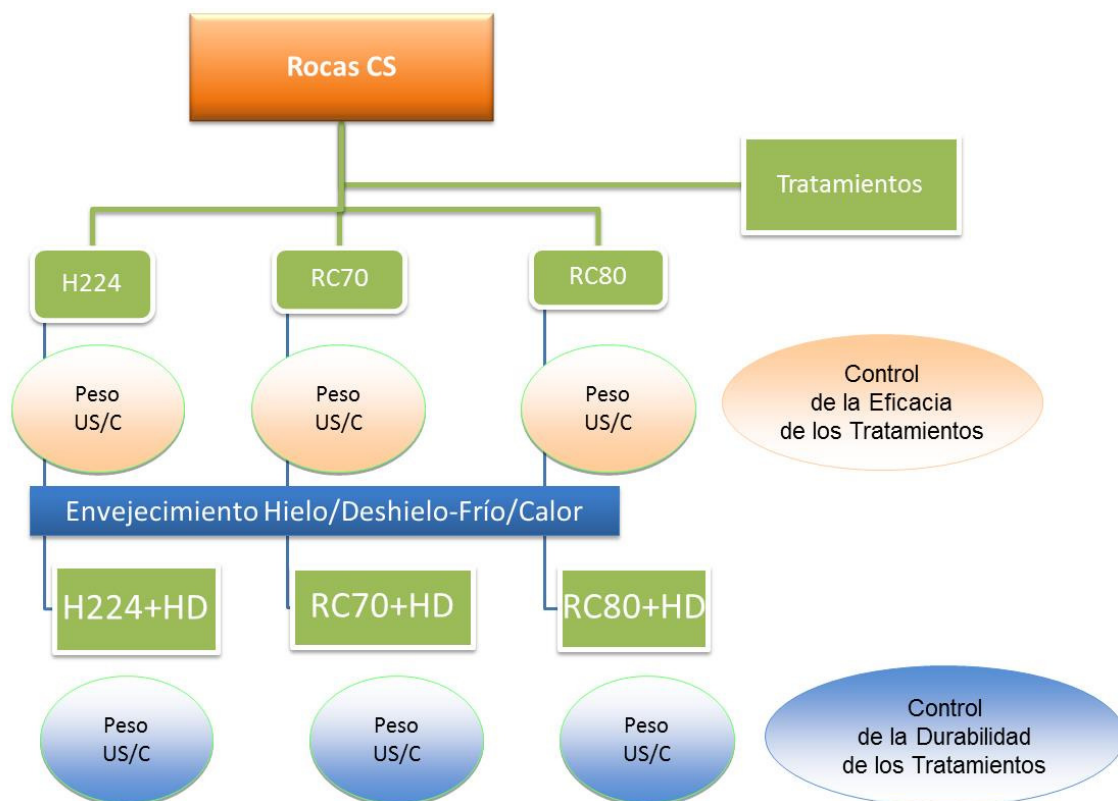


Figura 2.18. Esquema de los tratamientos aplicados a las rocas CS y las propiedades empleadas para controlar su eficacia y su durabilidad frente a procesos de hielo/deshielo con frío/calor. US/C: velocidad de propagación de ultrasonidos y color.

2.9.1 LIMPIEZA

La aplicación de cualquier tratamiento implica la limpieza previa del material a tratar, tanto en la superficie externa, como las sales cristalizadas en el interior de la red poral.

Dado que en Salamanca abundan las sales en las zonas degradadas y las costras debidas a contaminación atmosférica son prácticamente inexistentes, se ha ensayado un procedimiento de extracción de sales no agresivo para el sustrato pétreo y de gran efectividad, empleando cataplasmas de sepiolita (Trujillano *et al.*, 1995).

El procedimiento seguido ha sido el siguiente: Se han tomado las probetas previamente envejecidas artificialmente por el método de cristalización de sales (en este caso, sulfato sódico decahidratado) (RILEM, 1980). Se ha cepillado su superficie en seco, con el fin de eliminar las sales que habían formado eflorescencias salinas. Posteriormente, sobre esta superficie se han aplicado tres cataplasmas sucesivas, con un molde garantizando que la aplicación sea uniforme e igual, y que prácticamente se aplica en todas las probetas la misma cantidad de la suspensión de arcilla. En el ensayo se empleó como agente extractante PANSIL 400, que es una sepiolita con un tamaño de partícula inferior a 38 μm , (400 tallas de la serie ASTM) suministrado por TOLSA.

La sepiolita [$\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] es un filosilicato magnésico hidratado del grupo de las arcillas fibrosas (sepiolita-paligorskita) cuya particular estructura en la que los tetraedros de sílice alternan su orientación a ambos lados de la capa tetraédrica en grupos de seis pares de tetraedros crea amplios canales (de 3,6 a 10,6 Å), paralelos a la elongación de las fibras (Jones y Galan, 1988), en los que puede entrar agua y otras sustancias y que le dotan de su gran capacidad absorbente y escasa densidad (2 g/cm³), motivo por el cual se ha empleado en nuestro estudio.

Probetas de las tres variedades líticas, se sometieron a tres extracciones sucesivas con una pasta de PANSIL 400. La pasta que se aplicó a las probetas se realizó con 80 g del PANSIL 400 seco y 140 g de agua desionizada. La pasta de arcilla se mantiene en contacto con la piedra durante una semana, periodo tras el cual, se retira la cataplasma y se repite la aplicación de otros dos emplaste de igual composición.

La cataplasma retirada se seca en estufa a 110 °C. Posteriormente, se pulveriza, se homogeniza y se cuartea. Se toma muestras representativas de 200 mg y se mezcla con 100 ml de agua ultrapura para extraer las sales. Para ello, esta mezcla se somete al procedimiento de Iñigo *et al.* (2001), manteniéndola 45 min en un baño de ultrasonidos y después, centrifugándola para separar una fase sobrenadante, en la que están disueltas las sales.

De estas soluciones se controló la conductividad, analizándose el contenido en diversos cationes, por absorción atómica, y aniones, mediante cromatografía iónica, que formaban las especies salinas solubles en agua presentes en las rocas. Como blanco se empleó una mezcla de PANSIL 400 en agua ultrapura, tratada como se describe anteriormente.

Los valores de conductividad y sólidos disueltos totales (TDS: *Total dissolved solids*) se determinaron con un medidor de conductividad y TDS manual, modelo CON 110, de la casa comercial OAKTON, equipado con un sensor de compensación automático de temperatura (ATC). El medidor incluye un electrodo de conductividad de acero con una constante de electrodo de $K = 1,0$. El calibrado fue realizado de forma automática.

2.9.2 CONSOLIDACIÓN

La consolidación se realiza siguiendo las recomendaciones de la normativa NORMAL (1986b), modificada, aplicando el producto por todas las caras de la probeta, mediante inmersión. En esta aplicación, se sumergen las probetas en disoluciones del producto consolidante de distintas concentraciones, durante tiempos y condiciones diferentes, según el proceso siguiente: Primero, las probetas se sumergen completamente en *white spirit* durante treinta minutos; a continuación ocho horas en una solución del producto consolidante en *white spirit* al 5 %, que se va añadiendo al recipiente donde está la probeta a distintas alturas, en función del tiempo, hasta cubrir las probetas por completo y mantener la inmersión total durante, al menos, dos horas. Posteriormente, las probetas se sumergen por completo en una solución del producto en *white spirit* al 40 % durante un día, y por último, cuarenta horas, en una solución con *white spirit* al 75 %.

En este estudio hemos trabajado con dos consolidantes:

- Consolidante Rhodorsil® 70 (RC 70). Es un silicato de etilo orgánico más un catalizador que contiene Sn, con una viscosidad de 0,86 Pa·s, una densidad de 0,890 g/cm³, y un contenido del 70% en silicona. El disolvente es *white spirit*.
- Consolidante e hidrofugante Rhodorsil® 80 (RC 80). Formado también por silicato de etilo más una resina metálica y un polisiloxano resinoso con acción hidrófuga, además del catalizador metálico (Sn) en una solución de *white spirit*. Tiene una viscosidad de 1,13 Pa·s y densidad de 0,905 g/cm³.

Para evaluar la eficacia y durabilidad de los tratamientos de consolidación se han seguido las recomendaciones halladas en la normativa NORMAL (1986b) con modificaciones, controlando variaciones ponderales, color, velocidad de propagación de ultrasonidos, absorción de agua por capilaridad, absorción de agua por inmersión total, distribución porosimétrica, permeabilidad al vapor de agua, etc.

2.9.3 PROTECCIÓN

La protección se realiza mediante la aplicación de un tratamiento de hidrofugación de acuerdo con la indicado en NORMAL (1986b), apartado 3.4, y las recomendaciones dadas por Esbert *et al.* (1991), es decir, aplicando dos veces sucesivas, con un intervalo de 24 h, una solución al 10 % del producto de hidrofugación comercial disuelto en *white spirit*. El producto hidrofugante empleado es el H224 que es un oligómero alquilpolisiloxánico.

Para evaluar la eficacia y durabilidad de los tratamientos de protección se han seguido las recomendaciones halladas en la normativa NORMAL (1986b) con modificaciones, controlando las variaciones del color, de la absorción de agua por capilaridad, y de la permeabilidad al vapor de agua.

Tanto en el caso de los tratamientos de consolidación, como en de los de protección, se ha estudiado su durabilidad sometiendo una parte de las probetas a ensayos de envejecimiento artificial acelerado por hielo/deshielo junto con frío/calor, a fin de ver la idoneidad de los tratamientos frente a algunos de los procesos de deterioro antes descritos.

2.10 METODOLIGÍA ESTADÍSTICA

Las respuestas a los tratamientos de las distintas variedades de piedras naturales (de cantera) y/o envejecidas artificialmente se han determinado controlando la posible variación de una serie de características intrínsecas de las mismas (color, velocidad de propagación de ultrasonidos, porosidad libre y total en agua, densidad real y aparente, coeficientes de absorción, absorción capilar e imbibición, permeabilidad al vapor de agua, etc.).

Dado el gran volumen de datos que este estudio proporciona (los ensayos se diseñaron con un número de repeticiones suficiente para asegurar su valor estadístico), los valores de dichas características determinadas en las probetas antes y después de cada tratamiento, han sido tratados estadísticamente.

Los métodos multivariantes abordan el problema de búsqueda de los patrones de variación, cuando se dispone de un volumen muy elevado de datos, que hace que sea muy difícil su inspección directa. Las técnicas que reducen la dimensionalidad descomponiendo la variabilidad global, según direcciones principales de inercia, son claramente una herramienta de gran utilidad ya que permiten representar los datos de una matriz en un subespacio de dimensión reducida, donde es posible interpretar sus posiciones relativas.

Se han empleado métodos estadísticos multivariantes, aplicados a los datos de caracterización química de los materiales de cantera y monumento, para la posible identificación de las canteras originales. Estos métodos multivariantes han sido aplicados en nuestro grupo de investigación en numerosos estudios, entre los cuales cabe destacar el análisis HJ-biplot, empleando el método de inercia (Vicente-Tavera, 1992, Garcia-Talegon *et al.*, 1999, Iñigo *et al.*, 2005).

Para detectar las posibles diferencias en las coordenadas cromáticas (L^*, a^*, b^*), las velocidades de propagación de los ultrasonidos mediante las variables V_x, V_y, V_z , y las propiedades petrofísicas determinadas al agua se ha aplicado la técnica de MANOVA-biplot (Gabriel, 1995) o una extensión del mismo Biplot Canónico (Vicente-Villardón, 1992), que nos permite encontrar patrones de variación conjunta para un elevado número de variables, cuando se dispone de un gran número de datos divididos en grupos o poblaciones, previamente determinados, y que a la vez nos da información probabilística sobre las posibles diferencias (en media) entre un conjunto de poblaciones porque permite proyectar en los diferentes subespacios, las medias de los grupos, los individuos y las variables analizadas.

2.10.1 INTRODUCCIÓN AL BILOT: MÉTODOS BILOT CLÁSICOS

Los métodos biplot son un conjunto de técnicas de representación simultánea similares a la del Análisis de Componentes Principales (Reducción en la dimensión de los datos), con la diferencia que los individuos y las variables se representan conjuntamente sobre un espacio de dimensión reducida de forma que se tenga una visión más general de la matriz de datos. De esta forma, podemos interpretar las

posiciones relativas de individuos y variables por separado y las conexiones entre ambos conjuntos.

Según la definición que el propio autor de los métodos Biplot da en algunos de sus artículos (Gabriel, 1971): “Un Biplot es una representación gráfica de una matriz $\mathbf{X}_{(n \times p)}$ por medio de unos marcadores $\mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_n$ para sus filas y $\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_p$ para sus columnas (generalmente representados por vectores), elegidos de tal forma que el producto interno $\mathbf{g}_i' \mathbf{h}_j$ represente el elemento x_{ij} de la matriz \mathbf{X} ”.

El Biplot se diferencia del resto de las técnicas de representación de datos en que dibuja simultáneamente filas y columnas mientras que el resto dibuja sólo filas o sólo columnas.

Gabriel (1971) determinó dos diferentes tipos de representaciones Biplot, el denominado **GH-Biplot** que produce una representación óptima para las columnas pero pobre para las filas y el **JK-Biplot** que produce una representación óptima para las filas pero muy pobre para las columnas. Ambas representaciones, reproducen la matriz de datos. El autor realiza entonces una representación conjunta de las filas y columnas de la matriz de datos, ya que no consigue la misma bondad de representación para las filas que para las columnas.

Galindo (1986), utilizando las ideas básicas de los métodos Biplot (Gabriel, 1971, 1972, 1995) y del Análisis Factorial de Correspondencias (Benzecri, 1973) propone una nueva técnica que denomina **HJ-Biplot**, donde se consigue la misma calidad de representación para filas que para columnas, que además, es más alta que en los Biplots clásicos de Gabriel, donde la métrica de las filas o columnas es baja, y reproduce una aproximación de la matriz.

A modo de ejemplo, hemos tomado una hipotética representación Biplot de una matriz de datos de análisis químicos (columnas de la matriz) sobre diferentes tipos de roca de cantera y monumento (filas de la matriz) en el plano factorial compuesto por los ejes 1 y 2 (Figura 2.19). Los individuos, marcadores de las filas de la matriz, se presentan con las etiquetas en color negro (serían, por ejemplo, las diferentes muestras de granito, MAR2 y CA13), mientras que las variables, marcadores de las columnas de la matriz, se presentan con etiquetas que en color rojo y con vectores asociados (por ejemplo, los diferentes elementos determinados en los análisis químicos que hemos realizado sobre las muestras, SiO₂, MgO, K₂O y CaO).

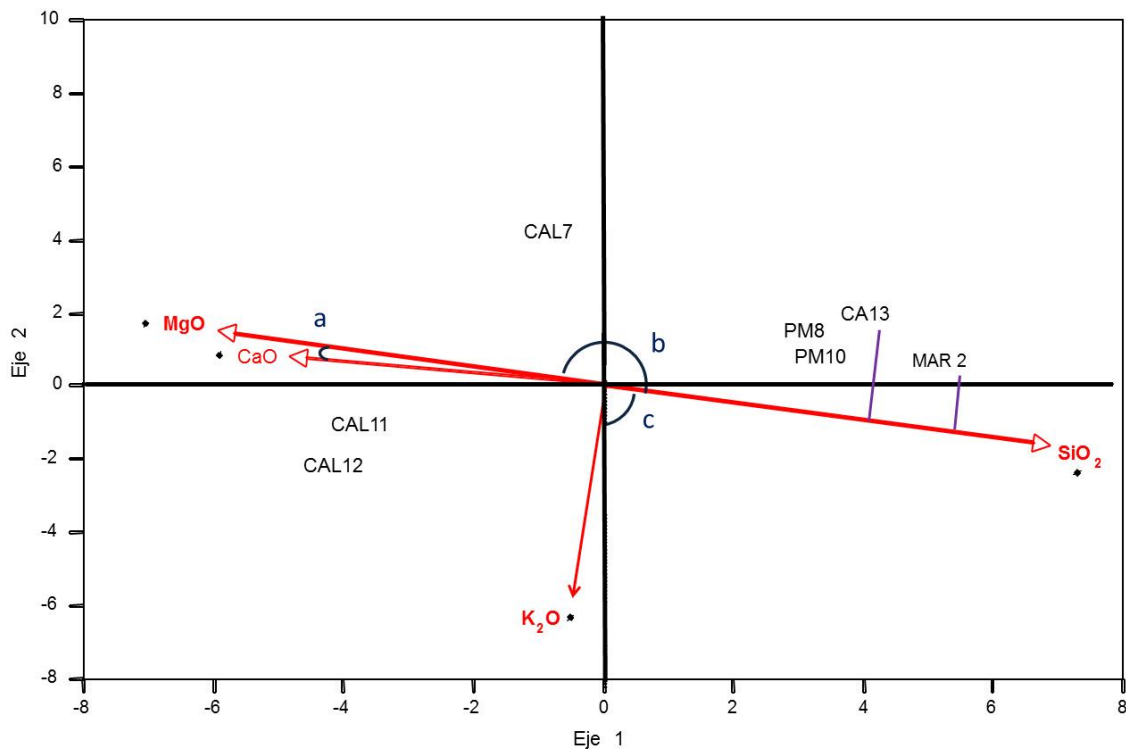


Figura 2.19. Representación HJ-Biplot en el plano factorial 1-2. Tipos de correlación entre las variables: a) fuertemente correlacionadas de forma positiva, b) relacionadas inversamente y c) independencia lineal.

Proyectando los individuos sobre los vectores, es posible determinar la distribución aproximada que los individuos toman sobre esa variable (Gabriel y Odoroff, 1990). Los marcadores de las fila MAR2 y CA13 proyectados sobre la variable SiO₂, se interpretan como elementos que toman valores altos en dicha variable (mayor en la primera que en la segunda, al ser un valor más alto en el sentido del vector) y al contrario, los individuos CAL11 y CAL12 toman valores altos en MgO, CaO y bajos en SiO₂.

Se interpreta la proximidad entre individuos, como similitud (parecido), como es el caso de los marcadores PM8 y PM10, muy próximos entre sí, indicando similitud en su composición, muy distinta a la de los marcadores CAL12 o CAL7.

Los ángulos entre dos vectores que unen dos variables con el origen se interpretan como correlación y la proximidad de un grupo de marcadores fila a un marcador columna se interpreta en términos de preponderancia. Así las variables MgO y CaO tienen un ángulo muy pequeño y esto se interpreta en el sentido de que ambas están altamente correlacionadas positivamente, pero hemos de tener en cuenta que CaO aparece un poco más tenue, lo que da a entender una regular calidad de representación (esta alta correlación podría ser errónea); por el contrario SiO₂ y MgO

se oponen, lo que nos da a entender que tienen una alta correlación en sentido inverso; por otro lado, K_2O y SiO_2 , son prácticamente perpendiculares, lo que se interpreta como independencia lineal.

A pesar de que la interpretación parece sencilla, hay que hacerla con cuidado ya que las posiciones de los puntos sobre los planos principales pueden ser sólo aparentes; para evitar los posibles errores de interpretación (Galindo y Cuadras, 1986) proponen varias medidas que serán útiles en la interpretación de los gráficos resultantes en un HJ-Biplot. La más importante de todas ellas es, quizás, la contribución relativa del factor al elemento, ya que permite determinar las variables responsables de las configuraciones de individuos resultantes al proyectar los puntos sobre los ejes.

Evidentemente, la interpretación sobre los distintos ejes y planos factoriales se realiza con mayor fiabilidad para aquellos elementos bien representados.

2.10.2 CLASIFICACIÓN (MÉTODO DE INERCIA BASADO EN UNA REPRESENTACIÓN FACTORIAL HJ-BIPLLOT)

En la búsqueda de asociaciones de muestras (clusters), se ha tratado de establecer un sistema de clases o partes, basándose en un conjunto de datos. Para ello, se ha utilizado como base la información suministrada por la representación simultánea HJ-Biplot (Galindo y Cuadras, 1986).

Existen muchos criterios clásicos de clasificación, ya sean jerárquicos (Ascendentes y Descendentes) o no jerárquicos.

El criterio de Inercia basado en una representación HJ-biplot es una extensión del Criterio de la Inercia propuesto por Benzecri (1973). La idea sobre la que se fundamenta este método consiste en ir descomponiendo la Inercia total del sistema, en cada partición, en dos tipos de Inercia, una denominada Inercia Dentro de las Clases y otra llamada Inercia Entre las Clases que forman la partición (Vicente-Tavera, 1992). Este método nos da un sistema de clasificación en forma de dendograma, el cual puede ser interpretado en función de las diferentes representaciones (planos factoriales), que se obtengan de la representación HJ-biplot. El objetivo final es determinar cuáles son las variables responsables de las diferentes agrupaciones (cluster) que se han formado.

A modo de ejemplo hemos establecido una hipotética clasificación de siete elementos que hemos representado en el plano principal (plano 1-2) de representación HJ-Biplot. En la Figura 2.20 aparece el dendograma obtenido y una

línea roja transversal que nos permite determinar tres agrupaciones claramente definidas a distintos niveles de agregación $n(2)$, $n(4)$ y $n(3)$, que engloba al nudo $n(1)$.

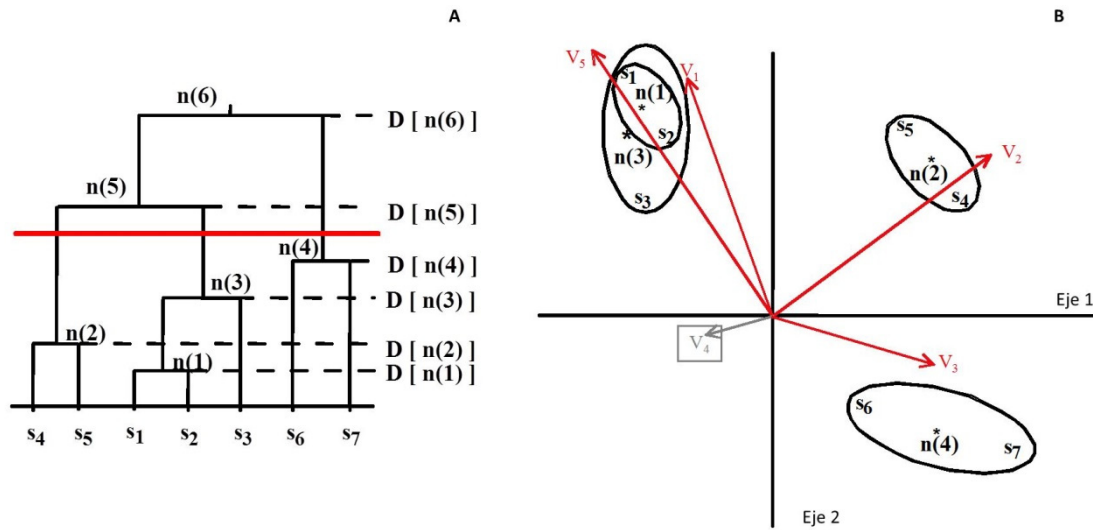


Figura 2.20. A) Dendrograma y B) representación Biplot del ejemplo demostrativo

El cluster cuyo nivel de agregación es el $n(2)$, que está formado por los elementos s_4 y s_5 , está influenciado por la variable V_2 ; el cluster cuyo nivel de agregación es el $n(3)$, que está formado por los elementos s_1 , s_2 y s_3 , está influenciado por las variables V_1 y V_5 y el tercer cluster, cuyo nivel es $n(4)$, está influenciado por V_3 . La influencia que tienen las variables viene determinada por la calidad de representación de las mismas y la de los elementos que componen cada cluster. Cuando el dendrograma se ha obtenido en función de más ejes, hemos de analizar los diferentes planos de representación con sus correspondientes calidades.

2.10.3 BIPLLOT CANÓNICO

El Biplot Canónico es una extensión, en términos Biplot, del MANOVA (Análisis Multivariante de la Varianza), pero incorpora todas las características de los métodos Biplot, cuyo fin es discriminar el conjunto de grupos de poblaciones previamente establecidos. Esta técnica ha sido desarrollada por Vicente-Villardón (1992) y complementada posteriormente por Amaro *et al.* (2004), aplicándose al campo de conservación del Patrimonio (Vicente y Vicente-Tavera, 2001, Iñigo *et al.*, 2004, Varas *et al.*, 2005).

Los resultados se resumen en diferentes planos factoriales, donde aparecen

representadas las variables como vectores, que parten desde un origen hipotético y las medias de los diferentes grupos como estrellas, en un mismo sistema de referencia. Si dos variables aparecen representadas con un ángulo muy pequeño, significa que esas variables están muy correlacionadas; si son opuestas su correlación es inversa. Además, si el ángulo es cercano a la perpendicularidad su correlación es mínima. Al proyectar perpendicularmente todos los marcadores estrellas sobre la dirección de cualquiera de las variables, el orden de las proyecciones en el sentido de la misma es equivalente al valor que toman en dicha variable las medias de las poblaciones. Estas interpretaciones están sujetas a una serie de medidas de calidad de representación para los diferentes planos (absorción de inercia de los planos, bondades de las proyecciones de las medias en las variables para las dimensiones seleccionadas, etc.).

Los resultados de esta técnica se suelen presentar en diagramas de dispersión, como el de la Figura 2.21, con marcadores (estrellas para los grupos G) y vectores para las diferentes variables (V).

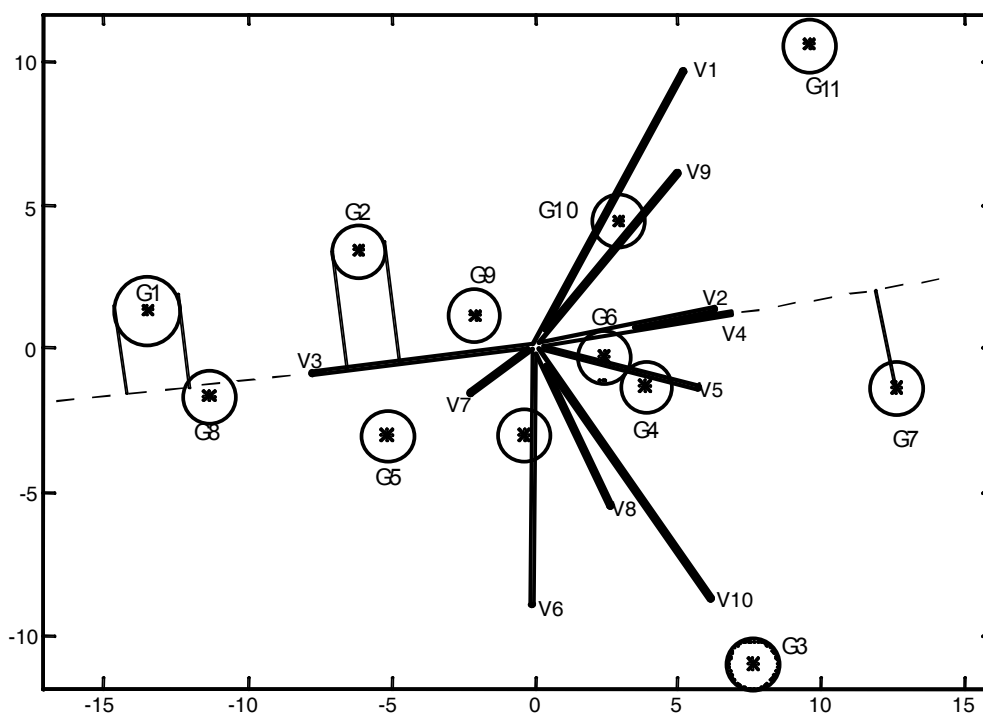


Figura 2.21. Ejemplo de representación en el plano 1-2 del Biplot Canónico

La interpretación del gráfico se realiza de forma similar a la empleada y comentada para los biplot clásicos (apartado 2.9.1 de la presente memoria, Figura 2.19); así, por ejemplo, si la proyección de un punto marcador de un grupo (por ejemplo G7 en Figura 2.21) está cercana a un marcador columna (extremo del vector) (por ejemplo V4) se interpreta en el sentido de que dicho grupo toma valores altos en dicha variable.

Los círculos representan las diferentes regiones de confianza entorno a la media proyectada en el subespacio y a un nivel de significación predeterminado y, los radios de los círculos son diferentes al tener los grupos tamaños distintos (Vicente-Villardón, 1992, Amaro *et al.*, 2004). Al proyectar dos círculos sobre una variable (en teoría lo podemos hacer sobre todas), nos permite hacer un contraste t de Student entre las medias de los dos grupos para esa variable; en el ejemplo, al proyectar los grupos G1 y G2 sobre la variable V3 (prolongando la misma) vemos como sus proyecciones no intersectan lo que nos permite afirmar que existen diferencias significativas entre estos dos grupos en esta variable; esto no se produce si proyectamos los grupos G1 y G8.

Este test t de Student es conservador, en el sentido de que puede que en un plano no encontremos diferencias, pero puede que en otros sí las haya. Si en un plano existen diferencias se puede afirmar que globalmente existe diferencia entre las medias.

3. LOS FACTORES GEOLÓGICOS DEL MATERIAL PÉTREO

Antecedentes

La ciudad de Salamanca reúne una gran variedad de materiales constructivos, de ellos, el más conocido y estudiado es la Arenisca de Villamayor. Otros materiales están menos estudiados, como es el caso de Areniscas de Salamanca (Corrochano, 1977; Jiménez Fuentes *et al.*, 1983) y las rocas plutónicas que aquí tratamos.

Ante la escasez, sino desconocimiento total, sobre el uso de las rocas plutónicas en la ciudad de Salamanca se planteó la conveniencia de su estudio que fructificó en una serie de trabajos preliminares vinculados a la presente memoria (López Plaza *et al.* (2007a); López Plaza *et al.* (2007b); López Plaza *et al.* (2009).

Las tres rocas plutónicas seleccionadas se extraen o extraían de canteras situadas en la provincia de Salamanca, geológicamente encuadradas dentro del basamento Varisco de la Zona Centro Ibérica del Macizo Ibérico, de acuerdo con Julivert *et al.* (1972). Desde un punto de vista estructural, las canteras del granito de Los Santos están encuadradas dentro del dominio de pliegues verticales (Díez Balda *et al.*, 1990a), mientras que las canteras de vaugneritas del Oeste de Ledesma y las del granito de Martinamor se encuadran en áreas de pliegues horizontales; en concreto, las de vaugneritas se insertan en el denominado Domo del Tormes (López Plaza y Carnicero, 1987; Martínez *et al.*, 1988), mientras que las de Martinamor aparecen en un área metamórfica comprendida entre el Domo del Tormes y el Sistema Central. Se trata de áreas metamórficas y graníticas bien conocidas, mediante diversas monografías y trabajos, tanto de índole petrológica como estructural [por ejemplo: García de Figuerola *et al.* (1980); Arenas *et al.* (1986); Corretgé *et al.* (1990); Díez Balda *et al.* (1990b); Gil Ibarguchi y Arenas (1990); Ribeiro *et al.* (1990); Pérez Estaún *et al.* (1991); Escuder Viruete *et al.* (1994); Martínez Catalán *et al.* (1996); Castro *et al.* (2002); Vera (2004); Díez Montes (2006)].

3.1 LAS ROCAS VAUGNERÍTICAS

3.1.1 SITUACIÓN GEOLÓGICA Y GEOLOGÍA DE CAMPO

En el centro-oeste de la provincia de Salamanca, a unos cuatro kilómetros al SO de la localidad de Ledesma se encuentra el plutón de Calzadilla del Campo (Figura 3.1), un cuerpo de pocos kilómetros de tamaño esencialmente constituido por rocas intermedias del tipo vaugnerítico, rodeado por leucogranitos peralumínicos del Domo del Tormes, en un área estudiada detalladamente por López Plaza (1982), sobre todo en lo que se refiere a la estructura y emplazamiento de los cuerpos graníticos.

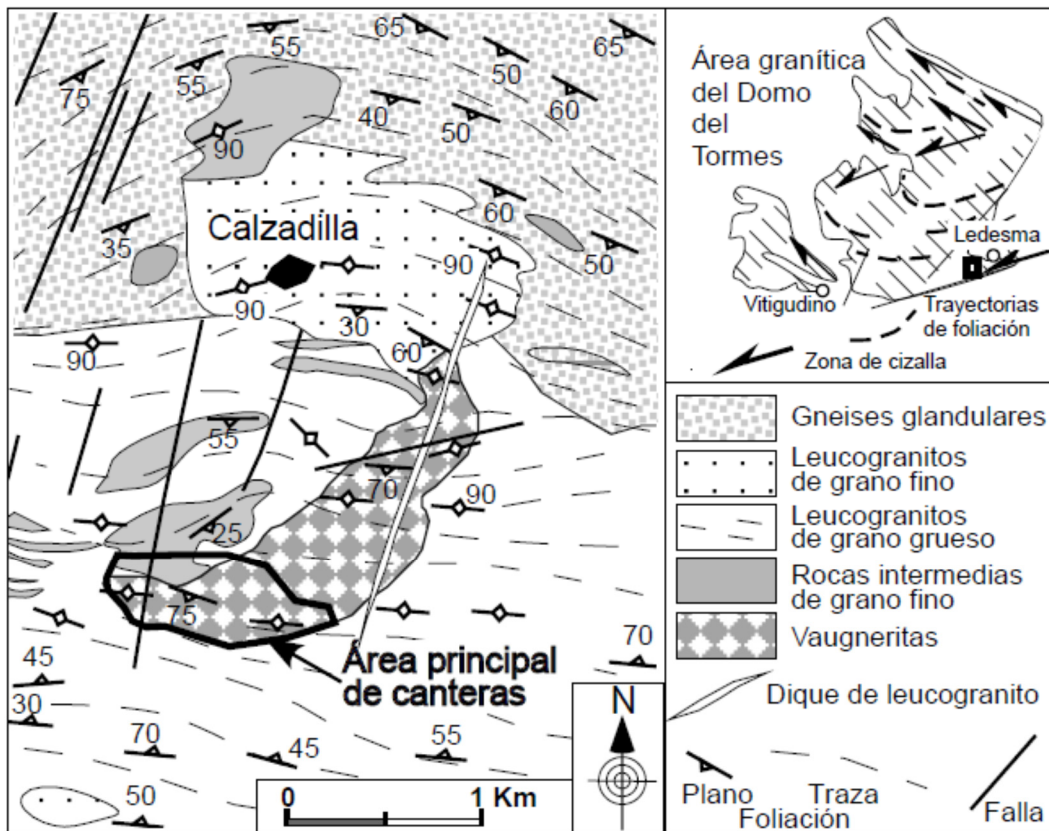


Figura 3.1. Esquema geológico del área de Calzadilla del Campo y localización de las posibles canteras históricas de vaugnerita (López Plaza *et al.*, 2007a)

Junto con el de Piñuel, Arcillo, Badilla y Pereruela, en la comarca zamorana de Sayago, son los plutones vaugneríticos de mayor tamaño del Domo del Tormes aunque existen numerosos cuerpos vaugneríticos y rocas relacionadas, de dimensiones decamétricas y hectométricas, en forma de enclaves o de cuerpos laminares, que están distribuidos principalmente en el eje de Sayago y en el de Vitigudino, así como en algunas partes centrales del Domo del Tormes (García de los Ríos Cobo, 1981;

DPUS, 1983; SIEMCALSA, 1997; López Plaza *et al.*, 1999; López Moro, 2000; Villar *et al.*, 2000; López Plaza y López Moro, 2003).

Además del Domo del Tormes, en el Macizo Ibérico se conocen distintas áreas donde afloran este tipo de rocas, como Finisterre (Gil Ibarra, 1982), Bayo-Vigo (Gallasategui Suárez, 2005) y Sanabria (Chacón Muñoz, 2005). Existen otras áreas en la Zona Centro Ibérica con rocas intermedias, como las del Sistema Central; sin embargo, carecen de textura vaugnerítica y, además de ser más básicas, tienen menor contenido en potásico (Castro *et al.*, 2002; López Plaza y López Moro, 2008).

Las rocas vaugneríticas presentan como rasgo textural más característico e identificativo la presencia de anfíbol y/o biotita en grandes cristales entrecruzados con textura decusada que sobresalen en una matriz compuesta por plagioclasa, anfíbol y biotita \pm cuarzo, además de cristales intersticiales y poiquilíticos de feldespato alcalino. Esta textura confiere a la roca una aparente fábrica isótropa que se refleja también a escala mesoscópica con la formación de bolos métricos de tendencia esférica.

El término «Vaugnerita» fue originariamente introducido por Fournet (1861) para designar a un grupo de rocas dioríticas de textura especial, que se encuentran en forma de diques en la región de Vaugneray, cerca de Lyon (Francia). Modernamente, este término ha sido incorporado por Sabatier (1991) después que registrara la aparición de rocas similares a lo largo de la cadena orogénica hercínica europea.

Normalmente, se restringe el término de «Vaugnerita» a aquellas rocas de contenidos relativamente altos en potasio, de composición variable, desde dioritas, monzodioritas y cuarzomonodioritas a cuarzomonzonitas, y con la textura vaugnerítica descrita anteriormente.

En el área del plutón de Calzadilla se han distinguido dos grupos de rocas (López Plaza *et al.*, 2007a):

1. Granitoides que rodean al plutón vaugnerítico, con dos subtipos:
 - a. Leucogranitos de dos micas inequigranulares
 - b. Leucogranitos de dos micas equigranulares de grano medio.
2. Vaugneritas y rocas asociadas del plutón de Calzadilla
 - a. Facies de borde de grano fino (Figura 3.2, Figura 3.3 y Figura 3.4)
 - b. Vaugneritas s.s., que a su vez incluye los siguientes subtipos:
 - i. Vaugneritas mesocráticas biotítico–anfíbólicas (Figura 3.5)
 - ii. Vaugneritas leucocráticas biotítico–anfíbólicas (Figura 3.6)
 - iii. Vaugneritas leucocráticas bitotíticas \pm anfíbol (Figura 3.7)

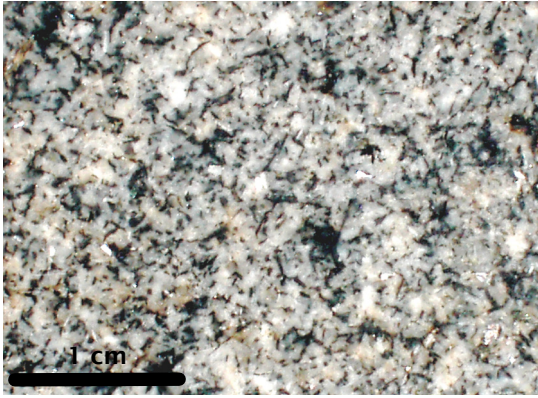


Figura 3.2. Facies de borde de grano fino con textura microvaugnerítica

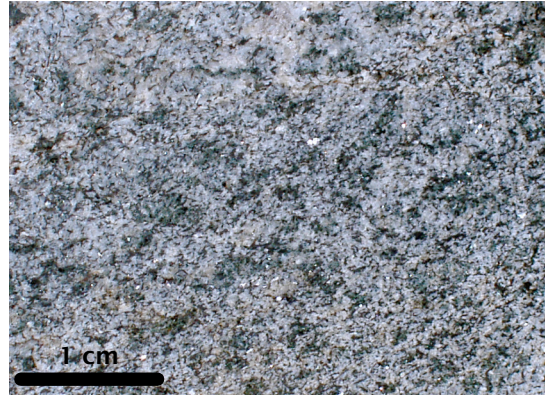


Figura 3.3. Facies de borde de grano fino con textura nodulosa

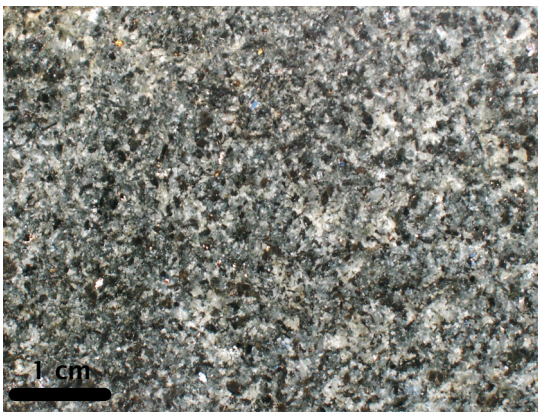


Figura 3.4. Facies de borde de grano fino de carácter mesocrático. Muestra correspondiente al borde NE del plutón

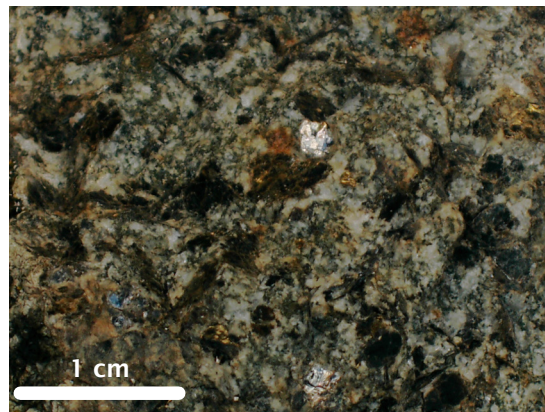


Figura 3.5. Vaugnerita mesocrática biotítico-anfibólica

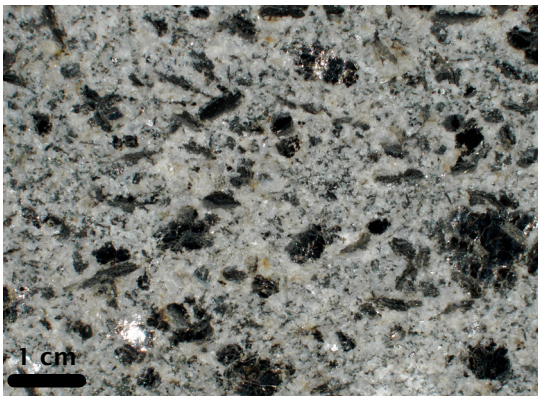


Figura 3.6. Vaugnerita leucocrática biotítico-anfibólica

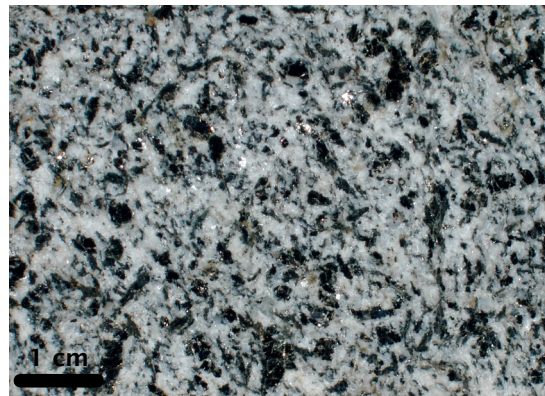


Figura 3.7. Vaugnerita leucocrática biotítica ± anfíbol

El plutón de Calzadilla es un cuerpo alargado en dirección NE-SW, con una longitud máxima de 2,5 km y una anchura máxima aproximada de 600 m (López Plaza *et al.*, 2007a). Su forma cartográfica general es de media luna con la convexidad hacia el SE (Figura 3.8).

El plutón está rodeado totalmente por leucogranitos de dos micas con *schlieren*, que cortan a los contactos externos del plutón. También se han reconocido algunas láminas graníticas en distintas zonas internas del plutón con contactos concordantes con las facies vaugneríticas. Igualmente se han encontrado diques de granito de dos micas dentro del plutón, alguno de los cuales aparece cartografiado en la parte E (Figura 3.1). El dique cartografiado, de extensión kilométrica, muestra enclaves de naturaleza pelítica, sugiriendo la presencia de *septa* o pantallas metamórficas residuales por debajo del plutón. Esta diferencia en el modo de yacer de los leucogranitos sugiere dos eventos separados, con una removilización tardía en relación con la fracturación regional. En coherencia, llama la atención el paralelismo del dique con el sistema principal de fallas tardihercínicas de dirección NNE-SSW.

Respecto de las facies del plutón ya indicadas, se observa la facies de borde en forma de una estrecha banda a todo lo largo del borde en la mitad SE y terminaciones NE y SW, mientras que en la mitad N es discontinua. En general, la disposición de esta facies configura una zonación concéntrica del plutón, en términos estrictamente geométrico–descriptivos. En distintas zonas, como en el extremo SW, se ha encontrado también la facies fina separada del plutón. También aparecen láminas concordantes de grano fino intraplutónicas.

Las facies vaugneríticas, de grano grueso o muy grueso, configuran el resto del plutón. Se constata una disposición bandeada, desde las facies mesocráticas hacia el SE y las facies leucocráticas hacia el N y NW, con una disminución progresiva del anfíbol en el mismo sentido. La mayor parte del plutón está constituido por la subfacies denominada «vaugneritas leucocráticas biotíticas ± anfíbol». En su conjunto, las facies vaugneríticas configuran una zonación más bien longitudinal, contrastando con el dispositivo geométrico deducido por la facies de borde.

Aunque no se ha hecho un estudio sistemático de carácter estructural, los datos de foliación que se han determinado revelan una cierta constancia en la dirección, de N 80 E a N 110 E (Figura 3.8), tanto para los granitos, como para el propio plutón vaugnerítico. Llama la atención la ausencia de direcciones netamente al NE, a pesar del alargamiento del cuerpo en esa dirección.

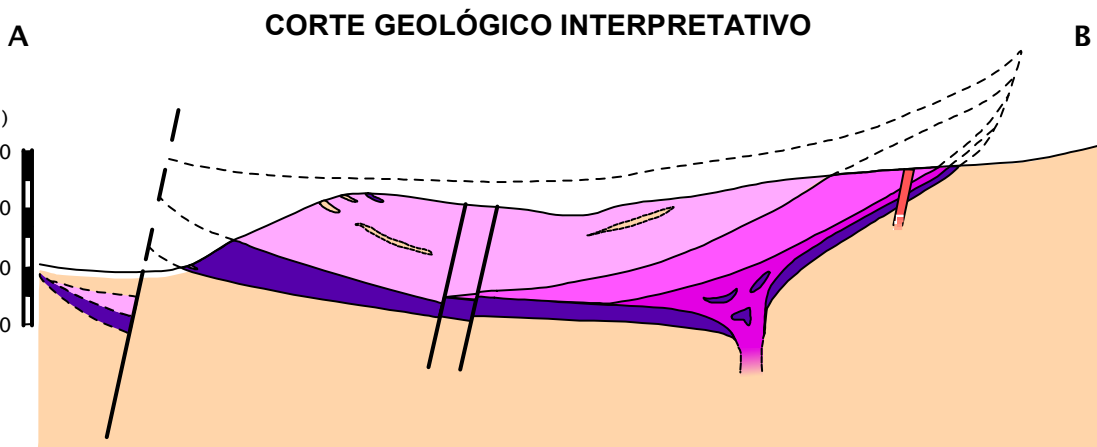
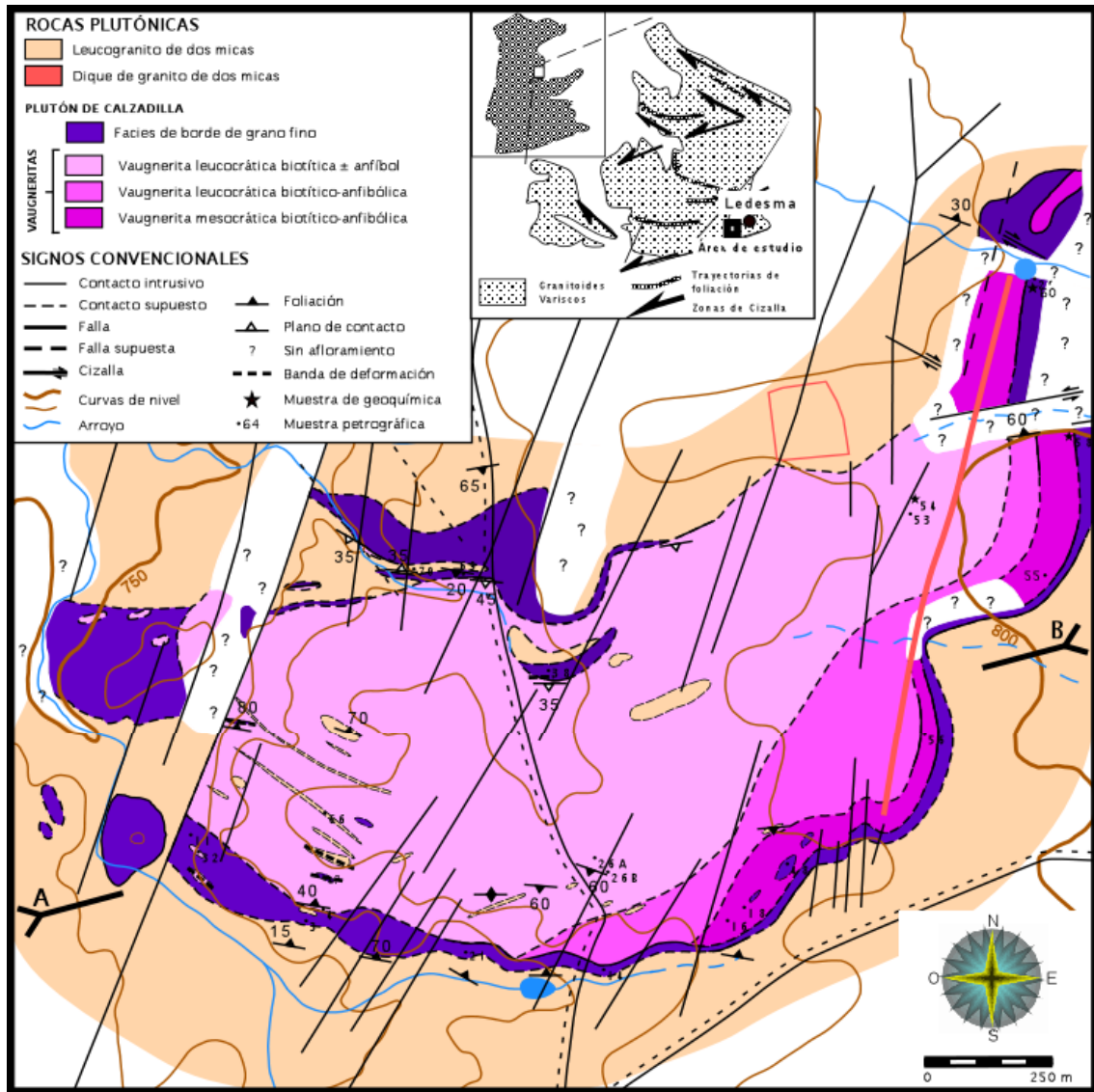


Figura 3.8. Mapa geológico del plutón vaugnerítico de Calzadilla del Campo (incluyendo la localización de las muestras petrográficas) y corte geológico interpretativo.

Este hecho junto con la ausencia de trayectorias paralelas a los contactos en las terminaciones SW y NE, nos indica que en su conjunto la foliación dominante representa un efecto deformativo, resultando en trayectorias discordantes a los

contactos. Esta deformación aparece también reflejada en el dique NNE de leucogranito, el cual muestra una foliación interna próxima a E-W y discordante a sus contactos. Cabe, pues, relacionar la foliación dominante del área con un evento deformativo sobreimpuesto no sólo al emplazamiento del plutón, sino también al evento anatéctico tardío. Las texturas encontradas nos confirman esta deducción, de tal manera que las texturas mirmequíticas generalizadas, la deformación plástica en el cuarzo, la fuerte extinción ondulante en el feldespatos potásico, todo ello sugiere condiciones de ductilidad o en la transición dúctil-frágil, a temperatura relativamente alta, tal vez alcanzando la facies anfibolítica (Simpson, 1985)

El carácter heterogéneo de la deformación, manifestado sobre todo en los granitoides, nos permite correlacionarla con los episodios de cizallamiento tardi-D₃ hercínicos, tan comunes en las áreas graníticas septentrionales (al N de la cizalla de Juzbado) de la Zona Centro Ibérica (Iglesias y Ribeiro, 1981; López Plaza y Martínez Catalán, 1987).

Hay que resaltar la aparente fábrica isótropa de algunas subfacies de las vaugneritas del plutón, en contraste con la facies de borde de grano fino, que siempre muestra una anisotropía muy marcada. La isotropía en las vaugneritas es un rasgo textural y estructural muy característico, como ya ha sido puesto de manifiesto para otras áreas del Domo del Tormes (García de los Ríos Cobo, 1981; López Plaza, 1982). La presencia de subfacies vaugneríticas deformadas, como las vaugneritas leucocráticas biotíticas ± anfíbol, sugiere que el contenido en cuarzo puede ser un factor determinante, dado que el módulo de Young debería ser mucho menor en este caso, facilitando la deformación (Llambías, 2001). A este respecto, es comparable la presencia de una fuerte anisotropía en los *layers* vaugneríticos extraplutónicos, afectando a facies muy leucocráticas. No obstante, el plutón representado por las facies vaugneríticas s.s. parece haberse comportado, en su conjunto, con una cierta rigidez, lo cual podría justificarse por la mayor deformación absorbida en la facies de borde.

Como consecuencia de la diferencia en la deformación, se produce un contraste morfológico muy acusado entre la facies de borde y las vaugneritas. Así, en la facies de borde se observa siempre un deslajamiento muy acusado, mientras que las vaugneritas, especialmente las mesocráticas, desarrollan bolos de alcance hasta decámetrico.

El contacto externo con los leucogranitos es siempre neto y subparalelo a la topografía en su mitad S (Figura 3.8). El contraste morfológico entre la facies de borde y los granitoides permite siempre el reconocimiento del exocontacto a escala de afloramiento. El contacto entre la facies de borde y las facies vaugneríticas del plutón se ha observado en numerosos lugares, constatándose un buzamiento de moderado o débil hacia el centro del plutón (Figura 3.8), de tal manera que en el borde N el

buzamiento es predominantemente hacia el S, mientras que en el borde S el buzamiento es hacia el N.

Fuera del plutón, hacia el borde SW, se ha encontrado una zona de *layers* consistente en sucesivas capas de la facies de grano fino o microvaugneríticas, que pasan a vaugneritas en pocos metros. Se trata de probables secuencias de capas gradadas (*graded layers*) con aumento progresivo del tamaño de grano hacia el techo.

Con respecto a las canteras, estas se localizan mayoritariamente en la parte S del plutón, aunque hay evidencias de procesos extractivos en toda la zona, que abarca unas 20 ha de monte aclarado de encinas en alternancia con estrechos valles y con zonas desprovistas de vegetación arbustiva.

A pesar de una supuestamente intensa actividad extractiva apenas se han encontrado superficies de cortes recientes, lo que, en principio, indica que su actividad principal se debió interrumpir en la antigüedad.

Los criterios utilizados para identificar la zona de explotación antigua son los siguientes:

- 1) Ausencia brusca de berrocal en zonas decamétricas y circunscritas, rodeadas por zonas de bolos que se interrumpen bruscamente sin cambio litológico apreciable y a la misma altura topográfica. Esta última circunstancia hace descartar una diferencia en las condiciones naturales de erosión; más aún en el caso de rocas vaugneríticas, cuyo boleo suele resistir mejor la meteorización que el de otros granitoides.
- 2) Identificación de superficies planas en las zonas de canteras, con presencia de fondos horizontales planos en las zonas circunscritas. Además, se reconocen superficies planas subverticales que no responden al diaclasado natural y que limitan, en algunos casos, la antigua zona de extracción a modo de pequeños frentes de explotación de pocos metros de altura en cuya arista superior, en muchos casos, se aprecian las huellas de las cuñeras que sirvieron para el corte de la roca.
- 3) La alteración meteorítica suele ser evidente en la mayor parte de los cortes, confiriendo a la roca un color verdoso o ligeramente marrón oscuro con desarrollo de cloritización y formación incipiente de arcillas, a la vez que supone la pérdida del color ligeramente azul claro de las muestras no alteradas.
- 4) Reconocimiento de restos abandonados de las técnicas extractivas. No es raro encontrar grietas con superficies curvas en el interior de grandes bloques o de bolos de roca vaugnerítica donde permanecen cantos de cuarzo empleados como cuñas o muescas de cuñas que fueron abandonadas en su posición de uso, actuando como separadores mientras se cortaba y abría la roca.

- 5) Presencia de huellas de los sistemas de corte utilizados. Se observan numerosas cuñeras alineadas que marcan los planos de corte. Estas cajas para el alojamiento de las cuñas son de grandes dimensiones (10-12 cm), lo que unido a la proximidad entre ellas denota la mala predisposición de la roca a su fisilidad. Asimismo, aparecen en los bolos seccionados barrenos de sección triangular
- 6) Presencia de pequeños montones de piedras junto a los antiguos frentes como producto de material de desecho o escombros. Su relativa escasez puede deberse bien a que los bloques extraídos la mayor parte de las veces no eran demasiado grandes, o bien a un aprovechamiento posterior del material de la escombrera con fines constructivos rústicos. Se trata de fragmentos irregulares, de pequeñas dimensiones, correspondientes a los sobrantes de la extracción, dimensionado y escuadrado de las piezas y del desbastado posterior a que eran sometidas.

Se deducen dos consecuencias derivadas de las características estructurales y geométricas del plutón:

- 1) Las huellas de extracción se observan, sobre todo, en las facies vaugneríticas; no obstante, la facies fina de borde, al estar generalmente más deformada, constituye un litotipo de más fácil extracción, proclive a un lajamiento natural, aunque, en consecuencia, el tamaño de los bloques obtenidos fue probablemente siempre menor.
- 2) El modo de yacer estratiforme del plutón, que origina un escaso carácter masivo y la alternancia en capas intraplutónicas de pequeño espesor, justifica la aparición de las distintas facies en las labores de extracción y consecuentemente también en los monumentos.

Estas canteras, son, en términos geográficos, el punto más cercano a la ciudad de Salamanca de afloramientos de rocas plutónicas no alteradas y de composición intermedia. Aunque su distancia en línea recta es aproximadamente de 34 km, cerca de la localidad de Añover de Tormes existen afloramientos de roca vaugnerítica a una distancia de la capital de unos 28 km en línea recta, pero su grado de alteración y de deformación hace muy improbable su utilización como roca industrial.

3.1.2 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y PETROLÓGICA

Caracterización mineralógica

Una vez identificadas las distintas facies, se partió de varios bloques de vaugnerita de la facies leucocrática biotítico-anfibólica, por estar ampliamente representada en los monumentos «piloto» seleccionados y ser una facies común en los afloramientos en el campo. Para la realización de los ensayos en el laboratorio se utilizaron probetas de 6x6x6 cm correspondientes a esa facies vaugnerítica. Igualmente, se procedió con esa facies a realizar los demás estudios pertinentes, como DRX, MEB, etc.

El gráfico obtenido tras el estudio por difracción de rayos-X (polvo desorientado) de una muestra de roca total, nos da una aproximación a su composición mineralógica (Figura 3.9), con gran abundancia en cuarzo (Q), mica (I/M), feldespato potásico (FdK) y menor proporción de plagioclasa (Ab).

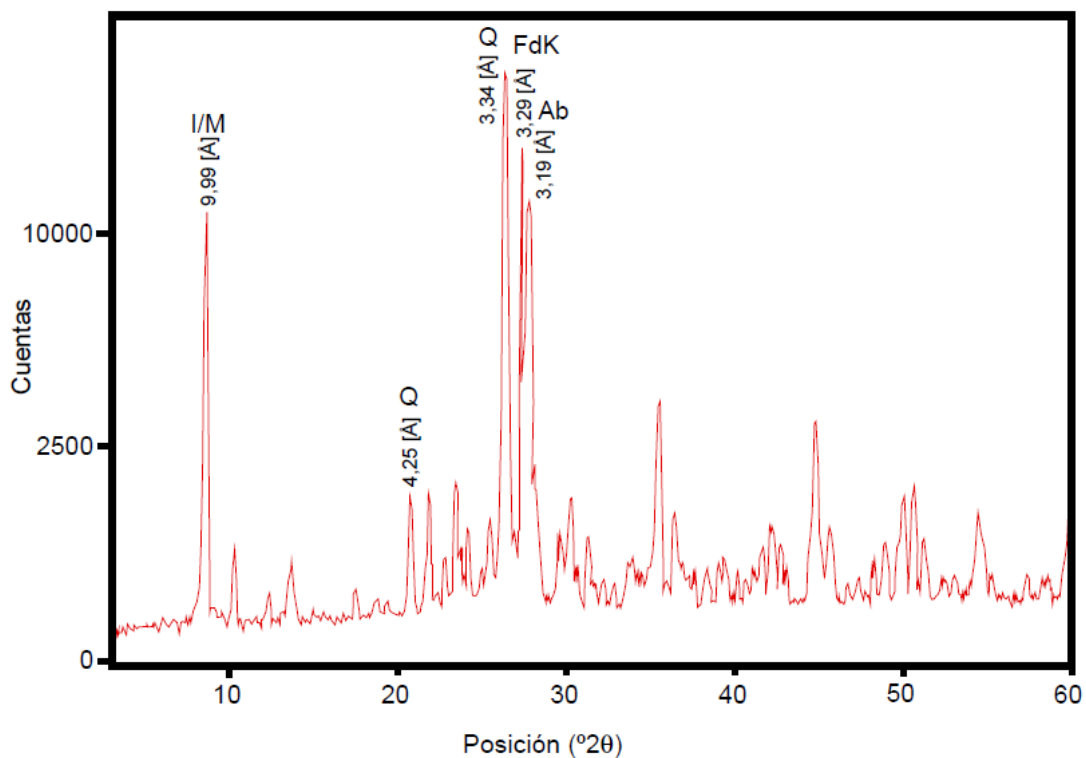


Figura 3.9. Difractograma de rayos X de la vaugnerita de cantera estudiada; polvo desorientado de la muestra de roca total. I/M: Illita/mica. Ab: Albita, FdK: feldespato potásico y Q: cuarzo.

Con anterioridad a cualquier tratamiento, se estudia, mediante MEB, el estado de algunos de los minerales presentes en una muestra de roca de cantera de vaugnerita (Figura 3.10, Figura 3.11 y Figura 3.12).

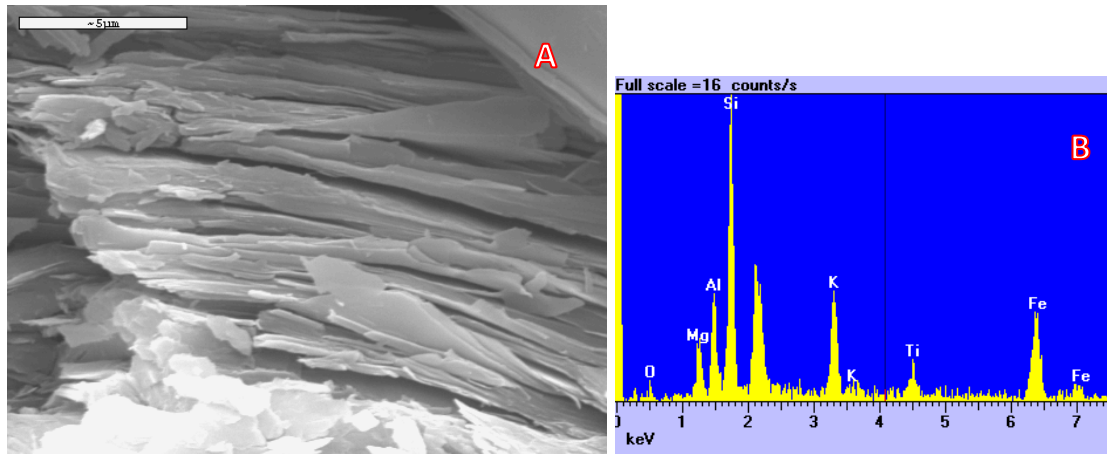


Figura 3.10. A: Imagen de MEB de láminas de biotita de una muestra de roca de cantera de Vaugnerita de Calzadilla. B: Espectro puntual de esa biotita.

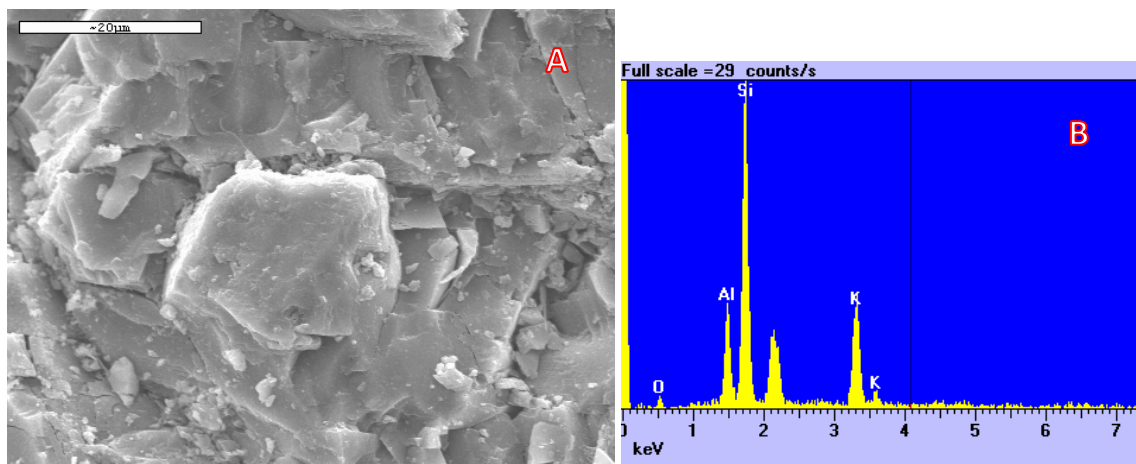


Figura 3.11. A: Imagen de MEB de un cristal de feldespato potásico en una muestra de roca de cantera de Vaugnerita de Calzadilla. B: Espectro puntual de ese feldespato, confirmando su composición

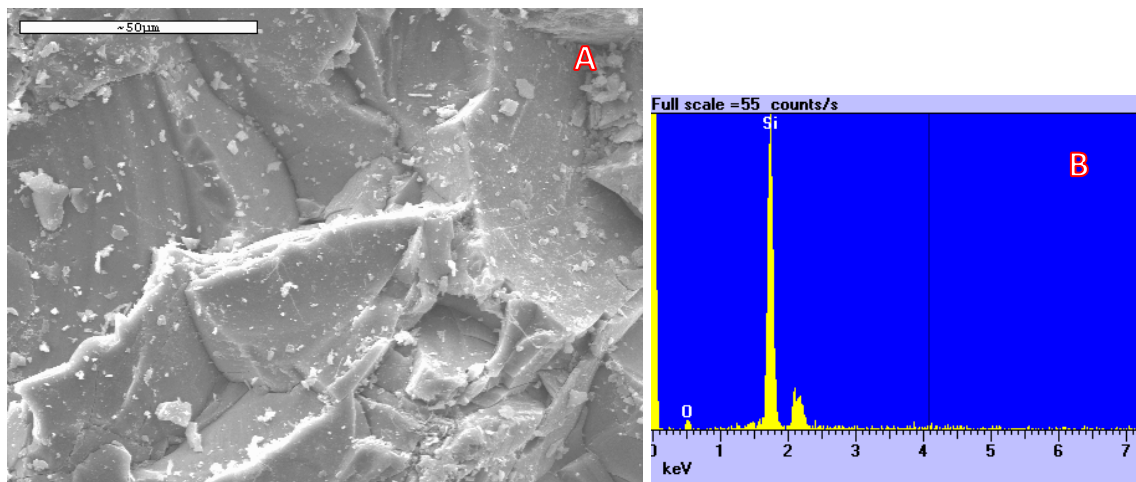


Figura 3.12. A: Imagen de MEB de parte de un cristal de cuarzo en una muestra de roca de cantera de Vaugnerita de Calzadilla. B: Espectro puntual del ese cuarzo

Esta técnica no sólo permite la estimación cualitativa de los minerales sino también el grado de alteración de los mismos, de cara a ser objeto de experimentación en los procesos de envejecimiento artificial acelerado, o cualquier tratamiento de conservación. En todos los casos, la apariencia de los minerales es más o menos limpia, sin corrosiones ni otros signos de deterioro o alteración profunda.

Caracterización petrológica

Las vaugneritas de Calzadilla son rocas mesocráticas o leucocráticas de composición cuarzo-monzodiorítica, con una asociación mineralógica de anfíbol, biotita, plagioclasa, con cuarzo y feldespato potásico intersticial, así como abundantes cristales de apatito. Su característica más relevante es, sin embargo, su textura vaugnerítica, consistente en grandes cristales entrecruzados de biotita, claramente visibles a simple vista (Figura 3.13), que le confieren una conspicua fábrica isotropa, aunque en este afloramiento también existen otras rocas con textura casi equigranular en las que apenas sobresale la biotita López Plaza *et al.* (2007a)

La composición modal en porcentaje de los subtipos o subfacies identificadas en el plutón de Calzadilla del Campo está recogida en la Tabla 3.1. Las características de estas facies quedan detalladas a continuación.

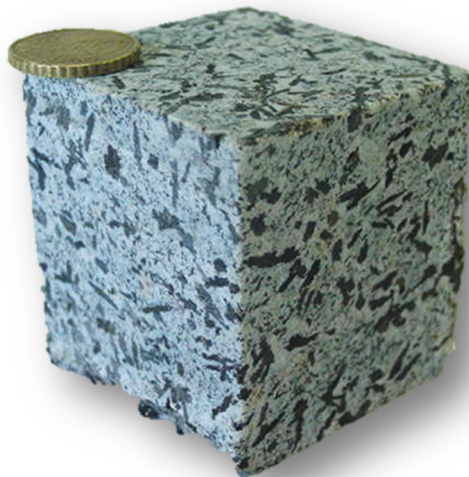


Figura 3.13. Aspecto de *visu* de las vaugneritas de Calzadilla de Campo en una de las probetas empleadas para la caracterización del material.

Tabla 3.1 Composición modal, valores Q, A y P e índice de color (M') de las vaugneritas y rocas asociadas.

| Muestra\Minerales | Q | FdK | Pl | Hrn | Bt | Ap | All | Q | A | P | M' |
|--|------|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|
| <i>Facies de borde</i> | | | | | | | | | | | |
| C-7 | 3,6 | 16,4 | 55,3 | 0,0 | 21,0 | 3,1 | 0,4 | 4,8 | 21,7 | 73,5 | 21,6 |
| C-11 | 7,2 | 19,5 | 48,6 | 0,0 | 22,7 | 1,7 | 0,3 | 9,6 | 25,8 | 64,6 | 23,0 |
| C-14 | 3,8 | 10,1 | 49,1 | 8,2 | 26,9 | 1,9 | 0,0 | 6,0 | 16,1 | 77,9 | 36,2 |
| C-48 | 1,7 | 3,4 | 53,7 | 8,9 | 30,0 | 2,0 | 0,3 | 2,8 | 5,8 | 91,4 | 40,3 |
| C-60 | 3,7 | 24,4 | 36,0 | 17,0 | 17,5 | 1,5 | 0,0 | 5,7 | 38,1 | 56,2 | 24,7 |
| <i>Vaugneritas mesocráticas biotítico-anfibólicas</i> | | | | | | | | | | | |
| C-58 | 4,2 | 7,6 | 43,2 | 19,7 | 24,4 | 0,7 | 0,1 | 7,7 | 13,8 | 78,6 | 32,1 |
| <i>Vaugneritas leucocráticas biotítico-anfibólicas</i> | | | | | | | | | | | |
| POR-101 | 5,6 | 17,9 | 42,9 | 6,1 | 25,2 | 1,6 | 0,7 | 8,4 | 26,9 | 64,6 | 45,3 |
| POR-103 | 11,4 | 16,6 | 45,8 | 4,2 | 20,5 | 1,1 | - | 15,4 | 22,6 | 62,1 | 34,5 |
| <i>Vaugneritas leucocráticas biotíticas ± anfíbol</i> | | | | | | | | | | | |
| C-32 | 8,1 | 19,6 | 47,6 | 6,1 | 17,1 | 1,3 | 0,0 | 10,8 | 26,0 | 63,2 | 23,5 |
| C-54 | 7,2 | 19,5 | 48,6 | 0,0 | 22,7 | 1,7 | 0,3 | 9,6 | 25,8 | 64,6 | 23,2 |

Muestras POR, López Moro (2000). Abreviaturas de Kretz (1983)

a. Facies de borde de grano fino

Las rocas de esta facies, de visu, se caracterizan por su textura equigranular de grano fino-medio (Figura 3.2, Figura 3.3 y Figura 3.4). Con frecuencia manifiestan una textura nodulosa (Figura 3.3) definida por agregados de unos 2 mm compuestos por cristales de biotita y/o anfíbol de 0,1 a 0,4 mm de tamaño. Excepcionalmente, se ha visto algún agregado de anfíbol de carácter idiomórfico, lo que sugiere la presencia de pseudomorfos de anfíbol provenientes, tal vez, de clinopiroxeno (Sabatier, 1991). En algunas muestras se inicia una cierta tendencia a una textura microvaugnerítica, desarrollándose de manera incipiente una población de cristales de biotita de mayor tamaño (hasta 3 mm).

La variación en los contenidos en anfíbol (de 17 % a 0 %) y biotita (30 % a 17,4 %) justifica la gran diversidad en el índice de color, desde rocas leucocráticas (M' = 21,6) hasta claramente mesocráticas (M' = 40,3) (Tabla 3.1).

Sus componentes félsicos son: cuarzo, de 1,7 a 7,2 % en el total de la roca, feldespatos alcalinos, de 3,4 a 24,4 % y plagioclasa, de 36 a 55,3 %. Esto indica, por tanto, una gran diversidad composicional, desde dioritas a cuarzomonzodioritas y cuarzomonzonitas, en virtud de la variable proporción de feldespatos alcalinos y plagioclasa (Tabla 3.1 y Figura 3.2). No obstante, hay que resaltar la pobreza en cuarzo para todos los términos, de tal manera que llega a definirse una secuencia monzonítica

en el triángulo QAP (Figura 3.14, B), equiparable a las series monzoníticas de Córcega y de Los Vosgos (Lameyre y Bowden, 1982); si bien, las muestras de composición cuarzomonzonítica y más enriquecidas en cuarzo (ej. muestra C-7, Tabla 3.1) no registran apenas la tendencia hacia el campo de los granitoides. La determinación de esta tendencia monzonítica nos permite la distinción de estas rocas de grano fino con respecto a las metatonalitas y metadioritas tan abundantes en el Domo del Tormes que definen una secuencia diorítica–tonalítica (García de los Ríos Cobo, 1981; López Plaza *et al.*, 1999).

El feldespato potásico se presenta en cristales anhedrales, generalmente poiquilíticos, con inclusiones de cristales idiomorfos o subidiomorfos de plagioclasa, además de biotita y/o anfíbol. La plagioclasa muestra contenidos en anortita del 38 % al 26 % en el núcleo sausuritizado, mientras que en el resto del cristal se manifiesta un zonado normal que termina en oligoclasa ácida (25 % a 23 % de anortita).

Los minerales accesorios son apatito, allanita y titanita, principalmente. Hay que resaltar la gran abundancia de apatito, siempre superior al 1,5 %. Esta fase mineral aparece en cristales de hábito acicular y de pequeño tamaño (en torno a 0,25 mm).

b. Vaugneritas *sensu stricto*

Se caracterizan todas ellas por su textura típicamente vaugnerítica, es decir, inequigranular con grandes cristales de biotita y/o anfíbol en disposición decusada, además de la presencia de cristales poiquilíticos de feldespato alcalino (Figura 3.5, Figura 3.6 y Figura 3.7). Son comparables a los tipos texturales vaugneríticos definidos originalmente por Fournet (1861) y descritos posteriormente por García de los Ríos Cobo (1981) y Sabatier (1991) para distintas zonas de la cadena Varisca.

Todas las rocas de este grupo se han clasificado en el triángulo QAP como cuarzomonzodioritas (Figura 3.14).

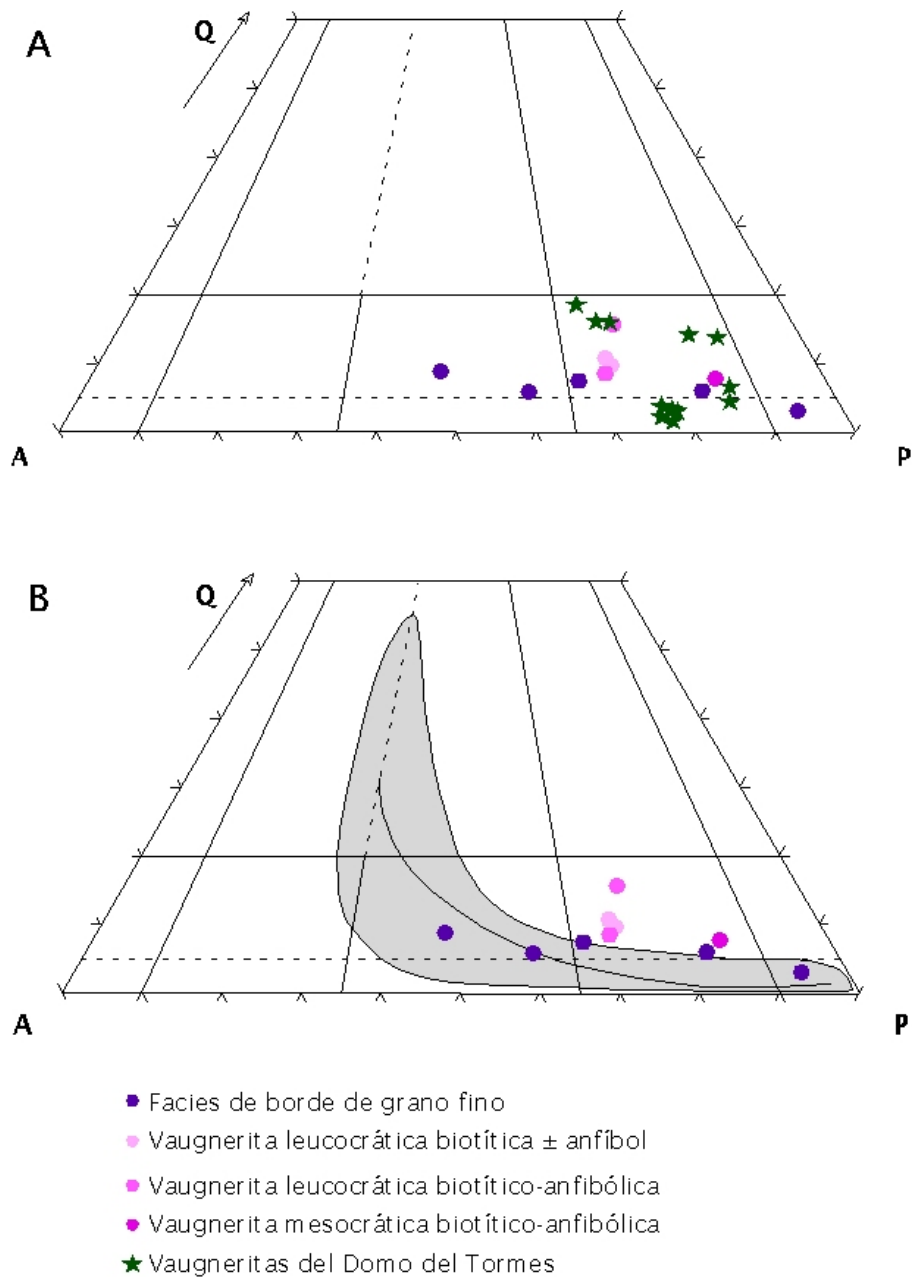


Figura 3.14. Diagrama QAP de las vaugneritas y rocas asociadas: A) Domo del Tormes y Plutón de Calzadilla. Datos del Domo del Tormes (García de los Ríos Cobo, 1981; López Moro, 2000). B) Plutón de Calzadilla. La zona sombreada corresponde a las series monzoníticas establecidas por Lameyre y Bowden (1982)

Dentro de este grupo se han distinguido los siguientes subtipos:

- Vaugneritas mesocráticas biotítico-anfibólicas
- Vaugneritas leucocráticas biotítico-anfibólicas
- Vaugneritas leucocráticas biotíticas ± anfíbol

b.i Vaugneritas mesocráticas biotítico-anfibólicas

Están compuestas por plagioclasa (típicamente An_{37-22}), feldespato alcalino y cuarzo, como minerales félsicos (Figura 3.5). La plagioclasa aparece en cristales zonados con un núcleo intensamente sausuritizado de composición próxima a andesina o incluso superior. El resto del cristal muestra un zonado normal o a veces oscilatorio, terminando siempre en oligoclasa ácida hacia el borde.

Los minerales máficos están representados por biotita (24,4 %) y hornblenda (19,7 %) que confieren a la roca un carácter mesocrático (Tabla 3.1). Estos dos minerales aparecen de manera textural muy contrastada: por un lado, el anfíbol, que se presenta en cristales subidiomorfos de tamaño variable (0,3 a 1,2 mm), así como en agregados de cristales anhedrales de tamaño en torno a 0,2–0,3 mm; y por otro lado, la biotita, que aparece mayoritariamente en grandes cristales cuyo tamaño está comprendido entre 1,2 mm y 15 mm, existiendo también una población de pequeños cristales subidiomorfos, pero a diferencia del anfíbol, se trata de una población minoritaria. Por tanto, podrían distinguirse dos tipos de asociaciones: por un lado, plagioclasa–anfíbol y biotita I, formando parte del componente de grano fino o mesostasis; y por otro lado, la asociación de biotita II–feldespato potásico y cuarzo. Esta doble asociación resulta en una doble textura observable de visu en el conjunto de las vaugneritas, pero especialmente en esta subfacies (Figura 3.15).

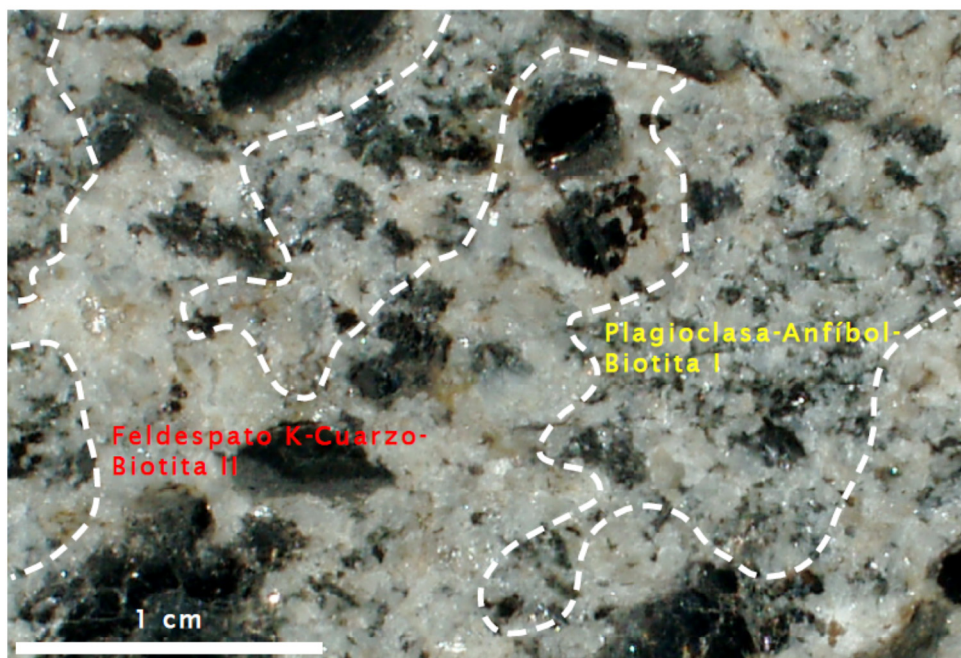


Figura 3.15. Detalle de la doble textura observable de visu, presente en las rocas vaugneríticas s.s., en concreto en las vaugneritas mesocráticas biotítico-anfibólicas.

Como minerales accesorios aparecen apatito (0,7 %) y allanita (0,1 %), principalmente. Respecto de los minerales secundarios hay que resaltar la abundancia en titanita, que puede superar el 1 %, de acuerdo con los datos de López Plaza y López Moro (2003).

b.ii Vaugneritas leucocráticas biotítico–anfibólicas

Tienen la misma asociación mineralógica que la facies anterior; si bien, el contenido en minerales máficos es sensiblemente menor, con proporciones de 25–20 % de biotita y 6–4 % de hornblenda, pasando la roca a ser leucocrática (Tabla 3.1).

La textura es similar a las del grupo anterior, mostrando las dos poblaciones de cristales de minerales máficos (Figura 3.6), así como el mismo tipo de zonado normal u oscilatorio para la plagioclasa. Se ha determinado con precisión la variación del contenido en anortita mediante microperfiles (López Plaza y López Moro, 2003), que nos permite compararlos con el tipo A («Fenocristales complejos de plagioclasa») de Sabatier (1991), constatándose una gran diferencia entre los valores del núcleo ($An_{\approx 50}$) con respecto al resto del cristal ($An_{\approx 25}$) (Figura 3.16).

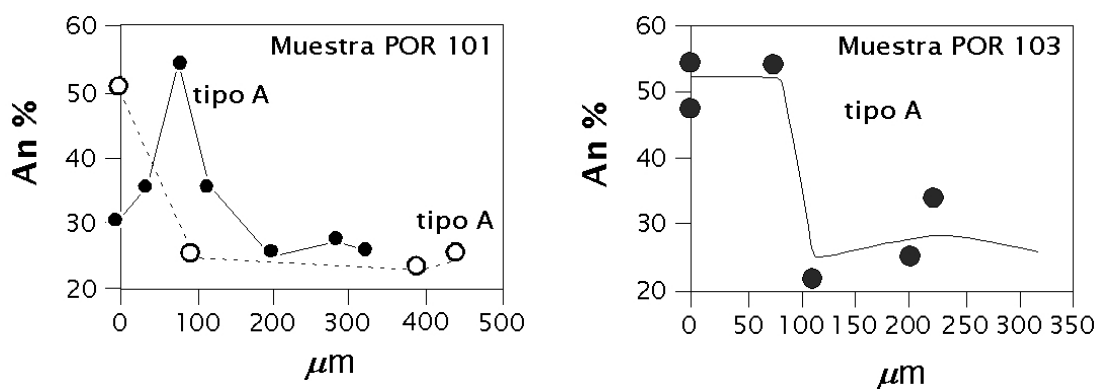


Figura 3.16. Microperfiles del contenido en anortita en los cristales de plagioclasa de la facies de vaugneritas leucocráticas biotítico–anfibólica. (López Plaza y López Moro, 2003)

b.iii Vaugneritas leucocráticas biotíticas ± anfíbol

Muestran la misma asociación mineralógica que los subgrupos anteriores, pero los cristales de anfíbol están dispersos con el resto de los componentes y apenas se reconocen agregados monominerálicos (Figura 3.7); su proporción es variable y llega a desaparecer. La biotita disminuye también hasta proporciones del 17 % en el total de la roca, confiriendo a la misma un carácter netamente leucocrático (Tabla 3.1).

Además, su tamaño manifiesta una cierta gradación, definiendo una textura seriada, desde los cristales de menor tamaño, de 0,2 a 0,3 mm, a menudo incluidos en el feldespató alcalino, hasta los de mayor tamaño, con valores que alcanzan 10 mm. En cualquier caso, el tamaño máximo es siempre menor que el de los dos subgrupos anteriores.

En su conjunto, las facies estrictamente vaugneríticas no muestran gran dispersión composicional, a excepción de la subfacies mesocrática, que aun tratándose de cuarzomonzodiorita, se aparta sensiblemente del resto de las vaugneritas, mostrando una aproximación al campo de las dioritas en el triángulo QAP (Figura 3.14). En ningún caso, se evidencia una secuencia lineal, a diferencia de la tendencia monzonítica establecida para la facies de borde.

Respecto de los minerales accesorios, en su conjunto se deduce para el apatito un cierto incremento progresivo desde los subgrupos **b.i** (0,7 %), **b.ii** (1,6-1,1 %) a **b.iii** (1,7-1,3 %) (Tabla 3.1), aunque con rangos siempre inferiores a los de la facies de grano fino. La forma de los cristales de apatito en la facies vaugnerítica difiere de la de grano fino, siendo más bien tabulares en lugar de aciculares.

3.1.3 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

Elementos mayores y traza

Se han realizado seis análisis de muestras frescas pertenecientes al plutón de Calzadilla del Campo, de las cuales cuatro corresponden a las facies vaugneríticas en sentido estricto y las dos restantes a las facies de borde (Tabla 3.2 y

Tabla 3.3). También se ha determinado FeO por valoración, y también el flúor en algunas muestras. Además, se han realizado análisis de isótopos, tanto radiogénicos (Rb/Sr y Sm/Nd) como estables (oxígeno) para cinco de las muestras anteriores (

Tabla 3.4), siguiendo las especificaciones analíticas descritas en el apartado 2 de la presente memoria.

Tabla 3.2. Contenido en elementos mayores (% peso) y parámetros geoquímicos de las muestras representativas de las vaugneritas y rocas asociadas del plutón del Calzadilla del Campo.

| <i>Facies</i> | <i>V. Leucocrática biotítica-anfibólica</i> | | <i>V. Mesocrática</i> | <i>V. Leucocrática biotítica</i> | | <i>Facies borde</i> | |
|---|---|----------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------|---------------------|--|
| <i>Muestras</i> | <i>POR-103</i> | <i>POR-101</i> | <i>C-58A</i> | <i>C-54</i> | <i>C-60</i> | <i>C-14</i> | |
| <i>SiO₂</i> | 58,24 | 58,52 | 55,90 | 60,67 | 59,99 | 56,19 | |
| <i>TiO₂</i> | 1,33 | 0,83 | 0,60 | 0,87 | 0,71 | 0,85 | |
| <i>Al₂O₃</i> | 17,70 | 17,22 | 15,80 | 17,06 | 16,43 | 17,78 | |
| <i>FeO analizado</i> | | 3,57 | 4,09 | 3,07 | 3,62 | | |
| <i>FeO T</i> | 4,69 | 5,00 | 5,48 | 4,43 | 4,81 | 5,51 | |
| <i>MnO</i> | 0,07 | 0,07 | 0,08 | 0,06 | 0,06 | 0,08 | |
| <i>MgO</i> | 3,54 | 3,85 | 6,80 | 2,66 | 4,25 | 4,89 | |
| <i>CaO</i> | 3,96 | 3,86 | 4,96 | 3,34 | 4,18 | 4,89 | |
| <i>Na₂O</i> | 3,96 | 3,78 | 2,69 | 3,70 | 3,36 | 3,58 | |
| <i>K₂O</i> | 4,54 | 4,51 | 3,74 | 4,70 | 4,08 | 4,16 | |
| <i>P₂O₅</i> | 0,54 | 0,38 | 0,22 | 0,56 | 0,26 | 0,31 | |
| <i>H₂O</i> | 1,11 | 1,83 | 2,76 | 1,74 | 1,82 | 1,51 | |
| TOTAL | 100,20 | 100,33 | 103,12 | 103,67 | 103,57 | 100,40 | |
| <i>Parámetros</i> | | | | | | | |
| <i>Parámetro A</i> | -19 | -18 | -34 | -4 | -22 | -30 | |
| <i>Parámetro B</i> | 170 | 176 | 254 | 139 | 182 | 209 | |
| <i>A/CNK</i> | 0,98 | 0,97 | 0,96 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | |
| <i>Mg#</i> | 36,93 | 26,48 | 49,05 | 31,78 | 40,67 | 40,77 | |
| <i>Composición normativa parcial (% en peso, recalculado a 100)</i> | | | | | | | |
| <i>Quarzo</i> | 2,61 | 3,91 | 3,44 | 9,65 | 8,02 | 3,18 | |
| <i>Anortita</i> | 16,12 | 16,67 | 20,00 | 12,91 | 17,70 | 21,37 | |
| <i>Albita</i> | 33,51 | 31,98 | 22,76 | 31,30 | 28,43 | 32,07 | |
| <i>Ortosa</i> | 26,83 | 26,65 | 22,10 | 27,77 | 24,11 | 26,06 | |

Tabla 3.3. Contenido en elementos trazas (ppm) de la muestras representativas de las vaugneritas y rocas asociadas del plutón del Calzadilla del Campo.

| Facies | V. Leucocrática biotítica-anfibólica | | V. | V. Leucocrática biotítica | Facies borde | |
|----------|--------------------------------------|---------|-------------|---------------------------|--------------|---------|
| | POR-103 | POR-101 | Mesocrática | C-54 | C-60 | C-14 |
| Muestras | | | C-58A | | | |
| Li | 38,00 | 54,00 | - | - | - | - |
| Cs | 9,20 | 14,00 | 6,80 | 8,50 | 6,50 | 9,20 |
| Rb | 198,00 | 179,00 | 114,00 | 184,00 | 150,00 | 190,00 |
| Sr | 535,00 | 459,00 | 424,00 | 528,00 | 363,00 | 412,00 |
| Ba | 1223,00 | 1158,00 | 901,00 | 1413,00 | 1149,00 | 1350,00 |
| Pb | 52,00 | 38,00 | 39,00 | 31,00 | 36,00 | 30,00 |
| V | 68,00 | 68,00 | 100,00 | 55,00 | 75,00 | 103,00 |
| Cr | 62,00 | 96,00 | 288,00 | 53,30 | 165,00 | 160,00 |
| Co | 48,00 | 58,60 | 60,70 | 54,30 | 59,90 | 35,00 |
| Ni | 86,00 | 78,00 | 140,00 | 39,00 | 81,00 | 90,00 |
| Cu | 27,00 | 4,00 | 33,00 | 6,00 | 22,00 | 20,00 |
| Ga | 26,00 | 19,00 | 13,00 | 21,00 | 20,00 | 24,00 |
| Ge | 1,30 | 1,00 | 0,60 | 0,90 | 0,90 | 1,20 |
| Sb | 0,13 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | - |
| Sc | - | 12,30 | 17,50 | 8,60 | 14,00 | 15,00 |
| Sn | 2,50 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 2,00 | 2,00 |
| Tl | - | 1,44 | 0,72 | 1,34 | 1,16 | 1,33 |
| Zn | 86,00 | 83,00 | 74,00 | 84,00 | 77,00 | 90,00 |
| Y | 18,00 | 18,00 | 13,00 | 17,00 | 14,00 | 17,40 |
| Zr | 391,00 | 283,00 | 146,00 | 403,00 | 267,00 | 281,00 |
| Nb | 15,00 | 283,00 | 146,00 | 403,00 | 267,00 | 10,10 |
| Hf | 9,60 | 6,60 | 3,80 | 8,60 | 7,00 | 7,00 |
| Ta | 1,08 | 0,93 | 0,60 | 1,19 | 0,89 | 0,85 |
| Th | 38,40 | 23,20 | 14,70 | 31,70 | 24,20 | 18,20 |
| U | 4,72 | 2,80 | 3,54 | 3,85 | 5,51 | 3,68 |
| La | 97,90 | 69,20 | 32,00 | 100,00 | 49,00 | 46,30 |
| Ce | 178,00 | 125,00 | 57,60 | 192,00 | 90,50 | 87,90 |
| Pr | 18,80 | 13,80 | 6,59 | 19,30 | 10,40 | 11,00 |
| Nd | 63,60 | 47,10 | 23,40 | 64,20 | 37,60 | 39,30 |
| Sm | 9,15 | 7,05 | 3,83 | 8,96 | 6,09 | 7,11 |
| Eu | 1,64 | 1,51 | 0,90 | 1,79 | 1,31 | 1,64 |
| Gd | 5,01 | 5,00 | 3,04 | 5,29 | 4,47 | 5,29 |
| Tb | 0,68 | 0,63 | 0,39 | 0,61 | 0,54 | 0,68 |
| Dy | 3,35 | 2,99 | 1,91 | 2,98 | 2,46 | 3,40 |
| Ho | 0,57 | 0,54 | 0,35 | 0,49 | 0,41 | 0,58 |
| Er | 1,58 | 1,48 | 1,01 | 1,27 | 1,07 | 1,55 |
| Tm | 0,21 | 0,21 | 0,14 | 0,18 | 0,15 | 0,21 |
| Yb | 1,21 | 1,26 | 0,90 | 1,12 | 0,96 | 1,32 |
| Lu | 0,18 | 0,18 | 0,13 | 0,15 | 0,14 | 0,19 |
| F (%) | - | 0,13 | 0,10 | 0,13 | 0,14 | - |
| S | - | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,04 | - |

-: No determinado

Tabla 3.4. Valores de isótopos radiogénicos (Rb/Sr y Sm/Nd) y estables (oxígeno) para las muestras del plutón de Calzadilla. La edad de 323 Ma está basada en Kovarikova et al. (2010) para rocas afines del Macizo de Bohemia. Entre paréntesis: errores 2 SD.

| <i>Facies</i> | <i>Vaugnerita mesocrática</i> | <i>V. leucocrática biotítico-anfibólica</i> | <i>V. leucocrática biotítica ± anfíbol</i> | <i>Facies de borde</i> | |
|---|-------------------------------|---|--|------------------------|--------------|
| <i>Muestra</i> | <i>C-58A</i> | <i>POR101</i> | <i>POR103</i> | <i>C-54</i> | <i>C-60</i> |
| $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | 0,713016 (9) | 0,712912 (6) | 0,712149 (6) | 0,712575 (8) | 0,713785 (7) |
| $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ | 0,778192 | 1,128713 | 0,976100 | 1,008585 | 1,196094 |
| $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{323}$ | 0,70943854 | 0,70772315 | 0,70766173 | 0,70793839 | 0,70828639 |
| $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ | 0,512247 (5) | 0,512225 (5) | 0,512214 (5) | 0,512193 (6) | 0,512233 (4) |
| $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ | 0,097255 | 0,089132 | 0,087 | 0,0827 | 0,0978 |
| $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{323}$ | 0,51204133 | 0,51203651 | 0,51203002 | 0,51201811 | 0,51202618 |
| ϵNd_{323} | -3,53 | -3,63 | -3,79 | -4,03 | -3,87 |
| $\delta^{18}\text{O}$ | 8,1 | 8,2 | 9,2 | 8,8 | 8,5 |

En virtud del contenido en sílice en roca total se deduce que todas las rocas analizadas del plutón son de naturaleza intermedia, con un rango comprendido entre 55,90 % para la facies de las vaugneritas mesocráticas y un 60,67 % para la vaugnerita leucocrática biotítica (Tabla 3.2).

Clasificación

A parte de la clasificación modal vista en el diagrama QAP (Figura 3.14) se puede hacer una clasificación basada en los análisis químicos cuya cantidad de muestra hace minimizar el error. A tal efecto, se han calculado los minerales normativos mediante la norma CIPW, así como los parámetros adecuados, que nos posibilitan el empleo del diagrama Q'-ANOR' de Debon y Le Fort (1988) (Figura 3.17) para la clasificación. Según esta clasificación las muestras de vaugneritas corresponden a cuarzomonzonitas y monzonitas.

Diagramas de caracterización

La elaboración de datos con elementos mayores permite una clasificación geoquímica más precisa mediante diagramas convencionales que incluyen la mayor parte de los elementos. En este caso y debido a el amplio rango de variación entre las muestras, se utiliza el diagrama A-B de Debon y Le Fort (1983) (Figura 3.18), donde las muestras analizadas definen una asociación cafémica meta-aluminosa, proyectándose en el campo IV (bi ± anf), meta-aluminoso, dato también confirmado por los valores

del índice A/CNK de Shand (1943) inferior a 1 (Tabla 3.2). En este diagrama se evidencia una linealidad que conduce a términos cercanos al campo peraluminico, como lo refleja la muestra de la vaugnerita leucocrática biotítica.

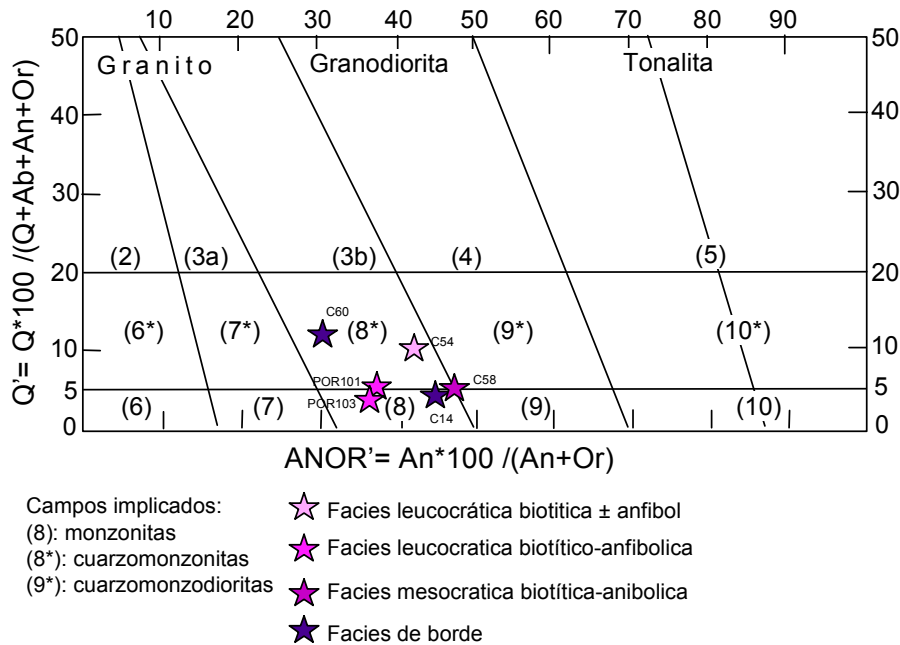


Figura 3.17. Clasificación según el diagrama Q'-ANOR' de Debon y Le Fort (1988) de muestras de vaugnerita de las canteras, y de los monumentos piloto estudiados, así como la media de las muestras del plutón.

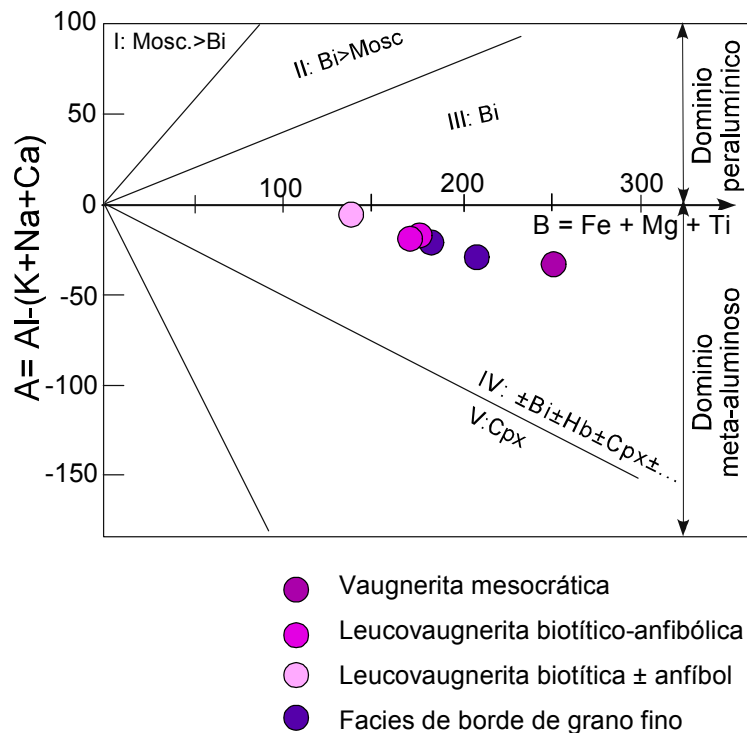


Figura 3.18. Diagrama A-B de Debon y Le Fort (1983) para la clasificación de las vaugneritas.

El Mg# calculado para las distintas facies oscila entre los valores más altos de 49,05 en las vaugneritas mesocráticas, hasta 26,48 en la facies leucocrática biotítica-anfibólica, apoyando la idea de un acusado proceso de diferenciación en la génesis de estas rocas.

Diagramas de normalización

En cuanto al contenido en elementos trazas, en las últimas décadas el tratamiento de datos de elementos traza ha cobrado una gran importancia en los estudios geológicos de caracterización, y en particular, en los estudios petrogenéticos (Rollinson, 1993; M., 2013). Sin duda, este impulso ha sido facilitado por la utilización de los diagramas de normalización que permiten la comparación con patrones, como el de la composición condritica, además de la comparación entre las rocas del propio plutón. En nuestro caso, los diagramas de normalización al condrito, tanto para las tierras raras como para los diagramas multi-elementales (Figura 3.19) indican patrones generales de enriquecimientos en los elementos más incompatibles, con rectas de pendiente negativa.

Todas las muestras del plutón indican un alto enriquecimiento en tierras raras ligeras especialmente las vaugneritas leucocráticas que alcanzan un valor máximo de Σ LREE: 384,46 (Figura 3.19A). El grado de fraccionamiento es siempre alto, con valores más bajos para las facies de borde (LREE/HREE: 14,50-18,98) y para la vaugnerita mesocrática (LREE/HREE: 15,68). Todas las muestras reflejan una ligera anomalía negativa de Eu, con un estrecho rango de variación (Eu/Eu*: 0,75-0,82). El grado de fraccionamiento considerando las tierras raras medias y pesadas es bastante más alto para la vaugnerita mesocrática [(Gd/Lu)_N: 2,89], frente al valor máximo de la vaugnerita leucocrática bitotítica [(Gd/Lu)_N: 4,33], La razón de esta diferencia estriba en el mayor contenido en anfíbol en la vaugnerita mesocrática.

Mediante el diagrama multi-elemental de normalización al condrito (Figura 3.19B) se pone de manifiesto, en primer lugar, una similitud en los patrones para todas las muestras y facies del plutón, lo que sugiere un carácter general de cogenetismo. Hay que resaltar las pronunciadas anomalías negativas de Pb, Ta, Nb, Sr y P, y las ligeramente negativas de Ba, y Ti. Las anomalías de Nb, Ta y Ti, en principio, podrían indicar una retención de estos elementos inmóviles en la capa fuente, como es característico en los magmas de subducción o de magmas mantélicos con intensa contaminación cortical.

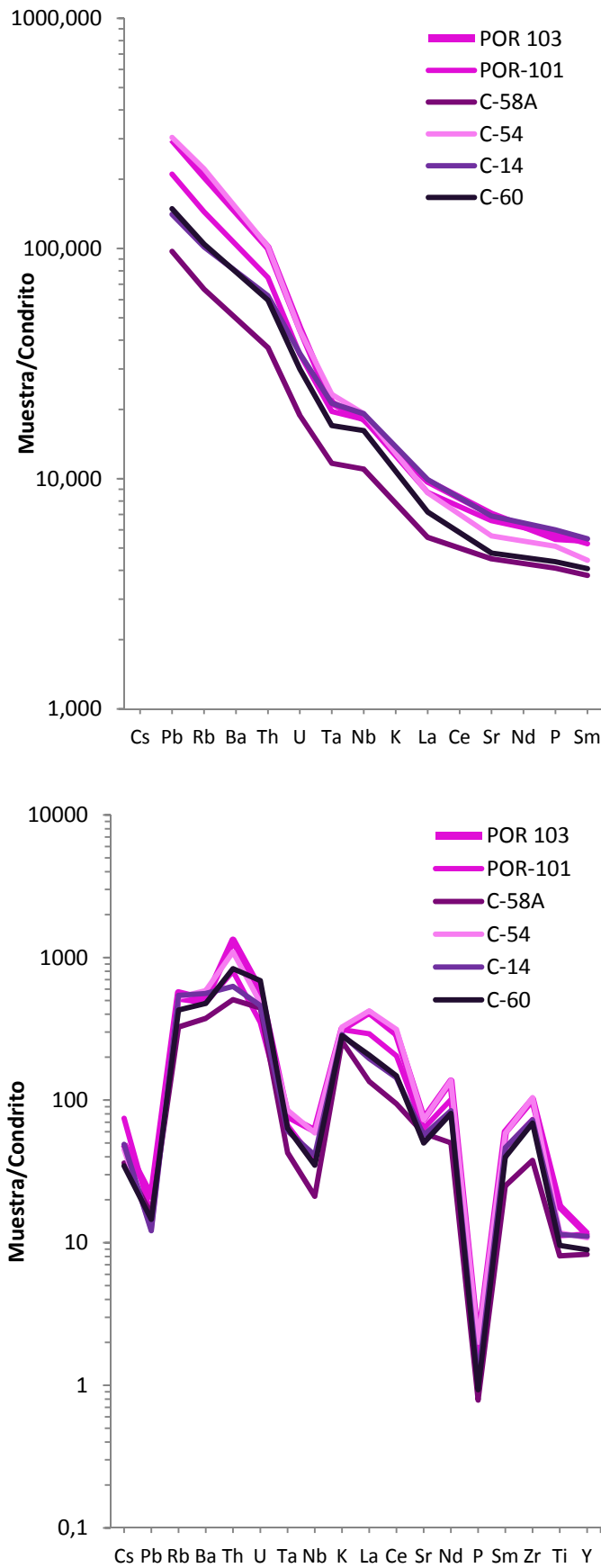


Figura 3.19. Diagramas multielementales de las vaugneritas y rocas asociadas del Plutón de calzadilla y del Domo del Tormes. Tierras raras: Nakamura (1974), multielemental: Sun y McDonough (1989)

Llama la atención la pronunciada anomalía en P, incluso mayor que para otras rocas vaugneríticas del Domo del Tormes. Para las rocas vaugneríticas de Sanabria, Chacón Muñoz (2005) ha explicado la anomalía en P junto con la de Sr en relación con un mecanismo de exsolución de fundidos hidratados portadores de P y enriquecidos en los componentes de la plagioclasa. Si bien, en nuestro caso no podemos descartar la presencia de plagioclasa en la capa fuente o en una cámara magmática, justificándose también la anomalía generalizada en Eu.

Los contenidos en CaO de las vaugneritas de Calzadilla son significativamente más bajos que los del resto de las vaugneritas del Domo del Tormes, como ya hemos indicado. Este hecho se puede relacionar también con las anomalías de Sr y Eu, confirmándose algún tipo de fraccionación de plagioclasa.

Respecto del Ba, es significativa su ligera anomalía negativa, que contrasta con las otras vaugneritas, sugiriendo una fraccionación de feldespatos potásicos, que tal vez podría estar representado en los términos menos diferenciados de Sayago en Zamora, con anomalía claramente positiva en Ba.

Los elementos de alto potencial iónico (*HFS*) muestran contenidos muy variables que conduce a picos positivos para las facies de vaugneritas leucocráticas, como es el caso del Th, tierras raras y Zr. Todo hace pensar que su comportamiento geoquímico está, pues, controlado por la diferenciación. Este comportamiento es opuesto al observado para otras series appiníticas del macizo Ibérico, tanto monzoníticas (López Moro y López Plaza, 2004), como vaugneríticas (Chacón Muñoz, 2005), que se caracterizan por una progresiva disminución con la diferenciación.

La posible explicación a esta divergencia con las demás vaugneritas precisamente se basa en que esos elementos reflejan un comportamiento incompatible. La consecuencia de esta constatación resulta bastante clara: ni allanita ni apatito se están fraccionando en los estadios precoces, porque de lo contrario las LREE, MREE, Sr, Th, entre otros elementos, mostrarían un comportamiento compatible, que es precisamente lo que ocurre en la serie monzonítica del Domo del Tormes (López Moro y López Plaza, 2004).

Los isótopos de Rb/Sr, Sm/Nd y oxígeno

Es evidente que la utilización de los isótopos en toda su extensión desborda los propósitos de esta Tesis. No obstante, el estudio de su variación en el plutón de Calzadilla del Campo permite deducir una serie de consecuencias de carácter general:

1) Los isótopos de Sm/Nd en la forma normalizada de ϵNd_{323} al confrontarlos, por ejemplo, con la sílice y LREE (Tierras Raras Ligeras) (figura 3.22 A y B) permiten confirmar que el conjunto de las rocas del Plutón de Calzadilla del Campo guardan un

cierto cogenetismo, estableciéndose una disminución del $\epsilon_{Nd_{323}}$ con la diferenciación, sugiriendo un proceso combinado de cristalización fraccionada + asimilación / contaminación (AFC o *assimilation-fractional crystalization*) e indicando un progresivo papel cortical con la diferenciación.

2) Los isótopos combinados de Sr y de oxígeno permiten una evaluación básica del papel de los fluidos en toda la historia del plutón. Así, el diagrama $\epsilon_{Sr_{323}}$ frente a $\delta^{18}O$ (figura 3.22 C) muestra una gran dispersión del conjunto de las muestras. Esta incoherencia geoquímica ha de ser atribuida al papel desigual de los fluidos y a los posibles re-equilibrios minerales sub-solidus de alta temperatura, por ejemplo, procesos hidrotermales que no modifican la signatura isotópica del Nd, aunque de gran sensibilidad para los sistemas del Rb/Sr y del oxígeno. Estos re-equilibrios no darían lugar a nuevos minerales, sino a reajustes composicionales, ya que, de lo contrario, se hubiera reflejado por la difracción de rayos-X y otras técnicas cualitativas utilizadas.

Estos resultados nos permiten concluir que el uso de los isótopos radiogénicos y estables en la identificación de canteras para el tipo de rocas plutónicas del presente estudio no constituye una técnica de gran fiabilidad si se consideran sólo muestras puntuales que van a estar sometidas a complejos procesos magmáticos y post-magmáticos.

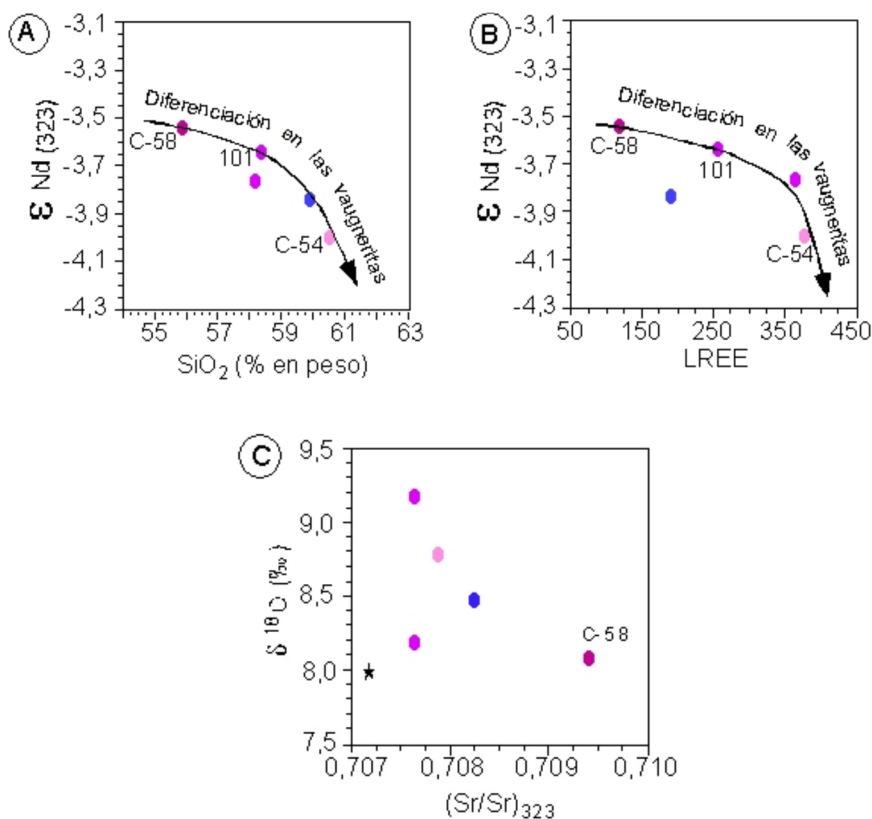


Figura 3.20. Diagramas de variación de las vaugneritas y rocas asociadas del Plutón de Calzadilla (estrella)

3.2 LEUCOGRANITO TURMALINÍFERO DE MARTINAMOR

3.2.1 SITUACIÓN GEOLÓGICA Y GEOLOGÍA DE CAMPO

El leucogranito de Martinamor se extraía de las canteras próximas al pueblo de Martinamor, al sur de Salamanca. Geológicamente, el plutón de Martinamor pertenece a la antiformal de Martinamor, que ha sido objeto de numerosos estudios, no sólo por su interés estructural (Martínez García y Nicolau, 1973; Díez Balda *et al.*, 1995); sino también por sus especiales características mineralógico-petroológicas (García de Figuerola *et al.*, 1983; Pesquera *et al.*, 2005), con las abundantes turmalinitas y aplopegmatitas asociadas, y desde luego, por el interés geoquímico-metalogenético, con numerosos indicios de Sn y W (Gonzalo *et al.*, 1975; Saavedra Alonso *et al.*, 1984).

En este área, Monteserin López *et al.* (1991a) (Figura 3.21) definen tres tipos de rocas graníticas:

- un granitoide pre-fase 2 hercínico (Ortoneis de San Pelayo) y,
- dos granitoides hercínicos, que son,
 - granitos y leucogranitos de dos micas con granate y turmalina (sintardicinemáticos D2) y,
 - el granito porfídico de dos micas de Sta. Genoveva (tardi-postcinemático).

El granito de Martinamor pertenece al grupo de granitos y leucogranitos sintardicinemáticos y se dispone como sills, de potencia métrico-decamétrica, inyectados en metasedimentos de la formación Monterrubio y en los ortoneis de S. Pelayo. Estas bandas de direcciones hercínicas de NO-SE a E-O definen *grosso modo* el área antiformal desde Martinamor hasta la zona de Sando-Porqueriza (Gonzalo *et al.*, 1975; Díez Balda, 1986; López Plaza y Carnicero, 1987), representando un espacio interbatolítico comprendido entre el Domo del Tormes y los batolitos del Sistema Central. La lámina canterada está ubicada en el flanco N de la antiformal, Estructuralmente, aparece una esquistosidad subhorizontal de fase 2 hercínica plegada por la fase 3 hercínica, con el desarrollo de una megaestructura de antiformal abierta y de plano axial subvertical (Díez Balda, 1986; Díez Balda *et al.*, 1995) y con deformación u orientación coherente con la estructura antiformal.

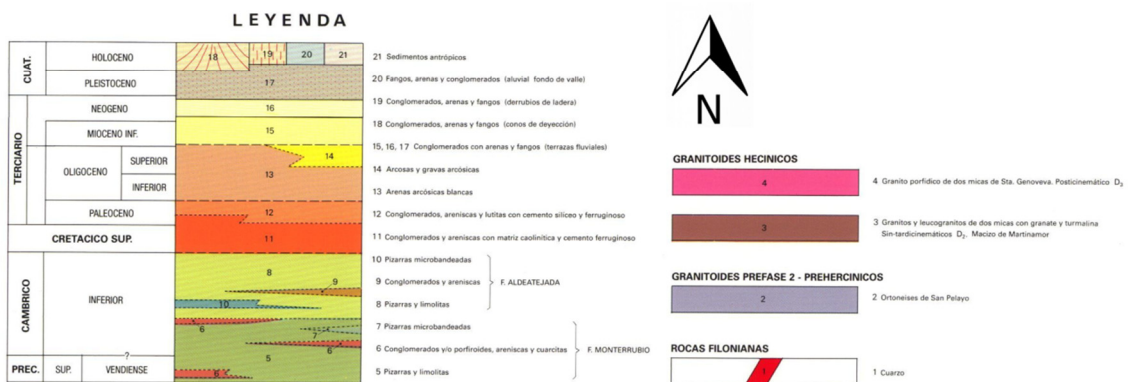
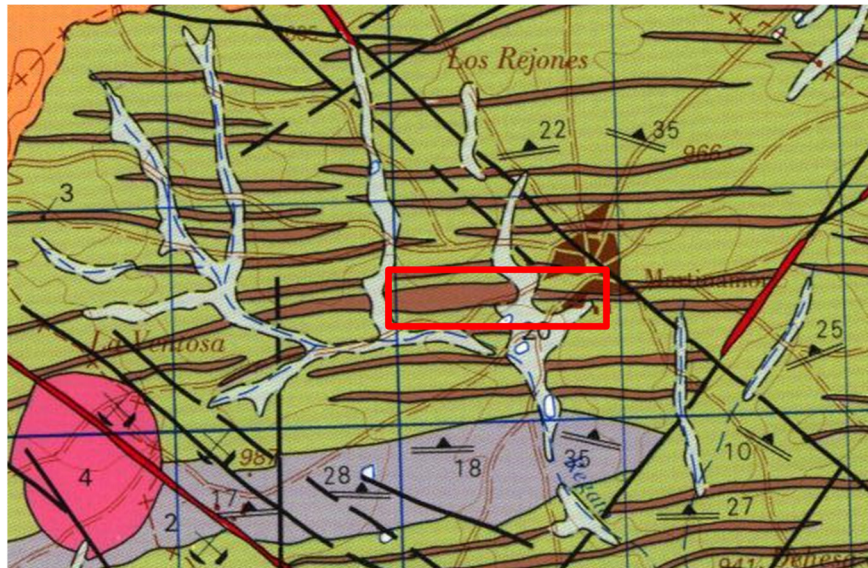


Figura 3.21. Mapa geológico de la zona de las canteras de Martínamor (rectángulo rojo) (Monteserin López *et al.*, 1991a)

El leucogranito turmalinífero explotado en las canteras de Martínamor pertenece a una intrusión laminar en forma de sill, de dirección próxima a E-W, anchura variable de 100 a 20 m, y longitud de unos 2 km (Figura 3.22).

La lámina canterada está ubicada en el flanco N de la antiforma, la cual principalmente incluye:

- a) una serie metasedimentaria pre-ordovícica perteneciente a la Unidad de Monterrubio del Complejo Esquisto Grauváquico
- b) leucogranitos deformados, tanto de dos micas como turmaliníferos, que están acompañados de un cortejo aplo-pegmatítico
- c) granitos tardíos porfídicos de dos micas, y
- d) cobertera terciaria, que aparece al NW del área y al E de la falla de Alba.

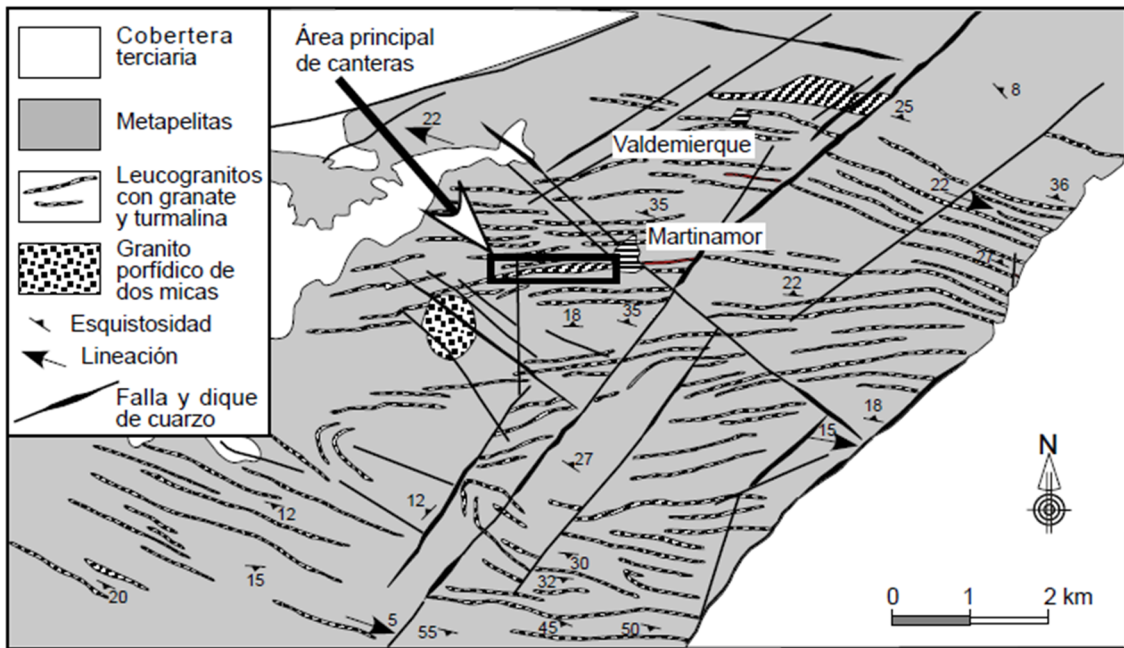


Figura 3.22. Esquema geológico del antiforme de Martinamor y localización de las canteras

Gonzalo *et al.* (1975) diferencian una serie de facies en este cuerpo: general, biotítica, aplítica, pegmatítica y diferenciaciones de cúpula o granitos albiticos, algunas de ellas con contenidos relativamente altos en Sn y W. Posteriormente, Pellitero (1981) amplía la descripción de dos de las facies, la pegmatoide y la normal o general, semejante a la pegmatoide pero de grano más fino. No obstante, y tras el estudio recogido en López Plaza *et al.* (2007a) podemos diferenciar, en el cuerpo laminar estudiado, las siguientes facies graníticas :

- a) Leucogranitos turmaliníferos de grano grueso, caracterizados por un aspecto moteado o noduloso, definido por agregados de turmalina (\pm cuarzo) (Figura 3.23)
- b) Leucogranitos turmaliníferos de grano fino, con cristales de turmalina que no superan un centímetro (Figura 3.24)
- c) Leucogranitos de dos micas, texturalmente similares a los anteriores, pero sin turmalina (Figura 3.25)

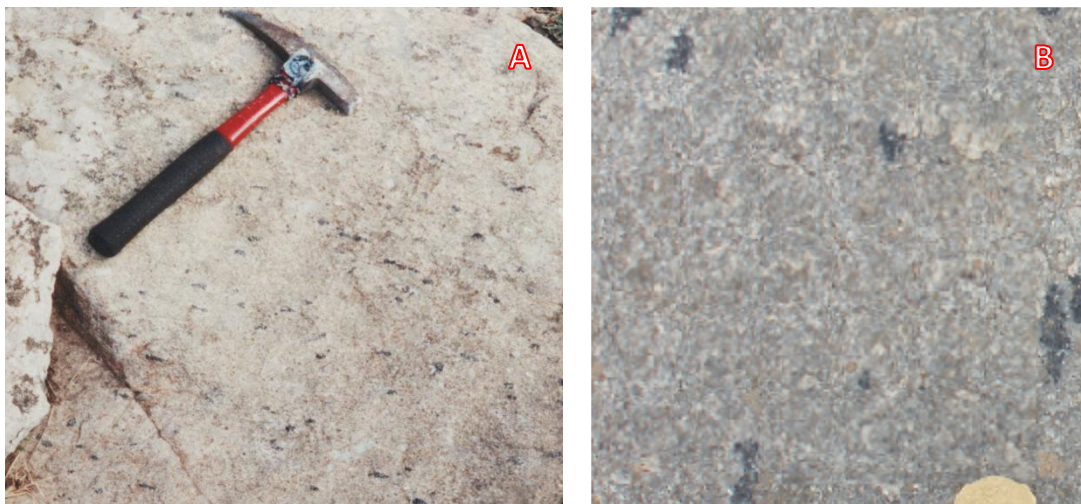


Figura 3.23. Leucogranito turmalinífero de grano grueso, en campo (A) y en detalle (B)

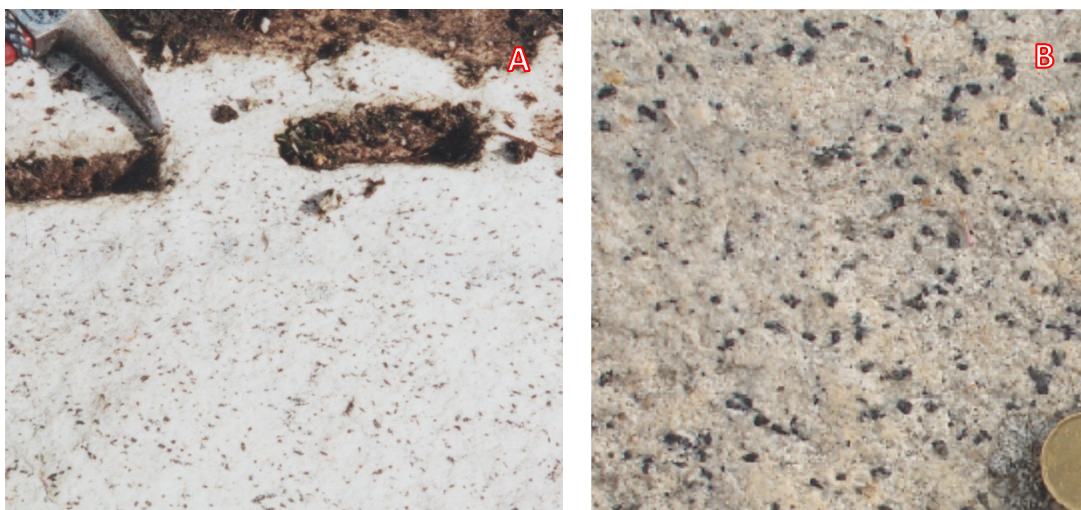


Figura 3.24. Leucogranito turmalinífero de grano fino, en campo (A) y en detalle (B)



Figura 3.25. Leucogranito de dos micas muy deformado

La morfología y disposición del principal cuerpo canterado en Martinamor puede verse resumida en la Figura 3.26. El principal plutón es un sill alargado en dirección E-W, discontinuo, con una longitud máxima de 0,6 km y una anchura no inferior a 12 m. El plutón está rodeado totalmente por un encajante de naturaleza pizarroso-esquistoso, de la formación Monterrubio.

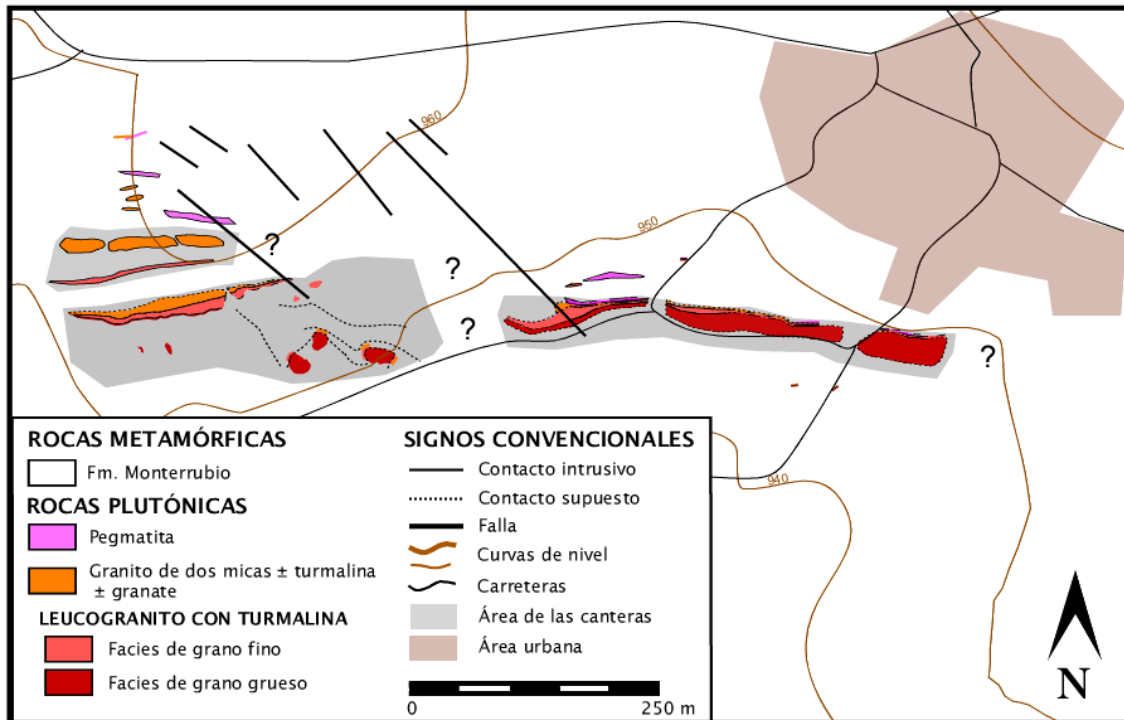


Figura 3.26. Mapa geológico del cuerpo laminar de Martinamor.

Dado que el cuerpo aflora mal, los contactos solo se aprecian en la vertical y la topografía es bastante plana (dificultando su representación), se decidió representar dos columnas, a cada lado del cuerpo laminar en las zonas con resalte, para establecer la potencia de sus capas (Figura 3.27). En ambos casos, se observa cómo las tres facies graníticas diferenciadas se disponen en láminas sucesivas de muro a techo, definiéndose un cuerpo estratiforme en capas (*layered body*); sin embargo, en ninguna de las dos zonas de las columnas se llega a apreciar el muro de la facies de grano grueso, haciendo imposible la estimación concreta de su potencia máxima real, ya que además, dicho contacto no aflora en las proximidades.

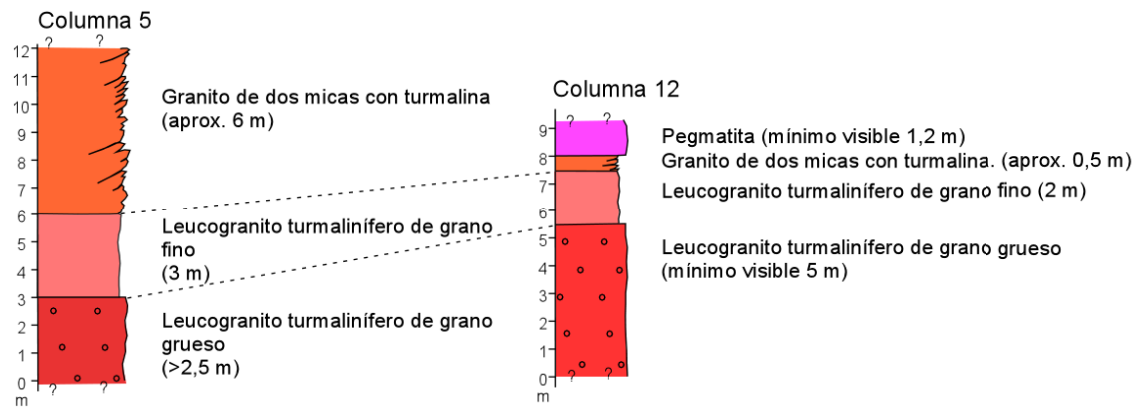
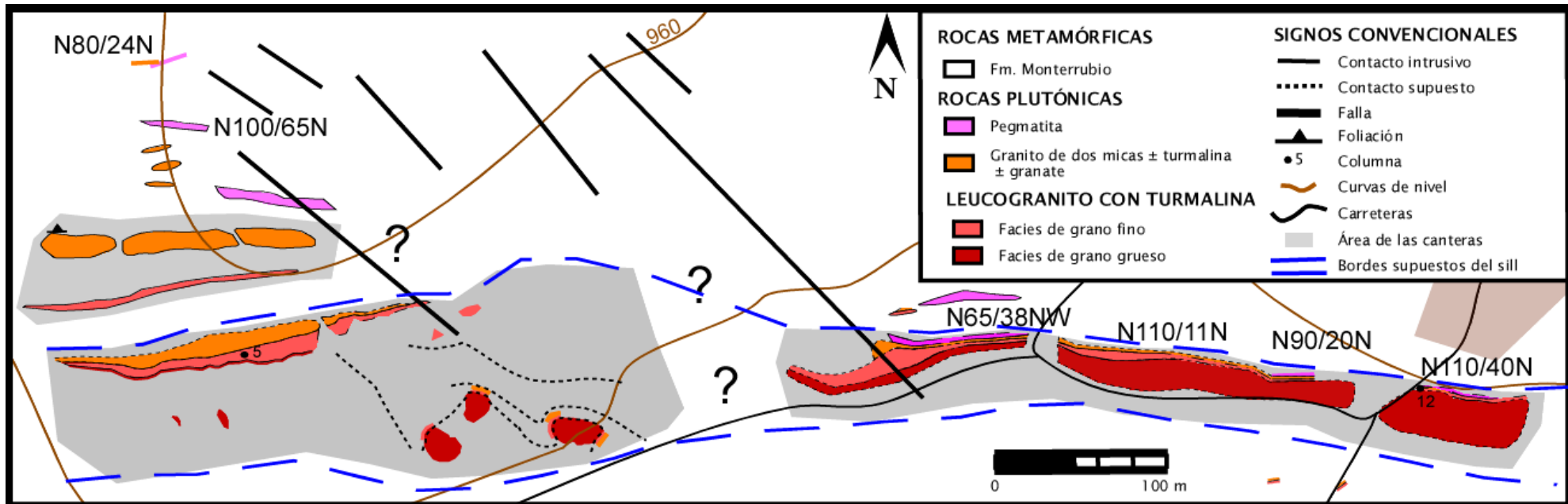


Figura 3.27. Detalle de la figura 3.26 con el área de las canteras, el contorno supuesto del sill y las columnas representativas de la unidad al oeste (5) y este (12) del cuerpo.

Dentro del área de las canteras (Figura 3.27), en la zona sur de las mismas, se observa la misma secuencia descrita en las zonas de resalte, pero esta vez en los restos de las extracciones de roca en profundidad. A techo de la secuencia, en la columna del este, se observan aplo-pegmatitas culminando la secuencia, concordantemente con el granito, rocas que también aparecen de forma aislada más al norte de la columna oeste, bien como cuerpos bien definidos o, en otras ocasiones, como bolsadas pegmatíticas dentro del granito de dos micas.

A pocos metros al norte de estos cuerpos, se pueden encontrar niveles de granito con turmalina de grano fino de hasta 60 cm de potencia, con bolsadas y *layers* de pegmatita, con granate y niveles del encajante metamórfico. Conforme avanzamos hacia el sur, las pegmatitas desaparecen y aumenta la presencia de granito con turmalina, hasta llegar al afloramiento principal, que comienza con granito de dos micas muy deformado, con orientación E-W y buzamiento al N, con *layers* de turmalina que presentan granoselección positiva, o bolsadas de granito con turmalina de grano fino y algunas zonas de deformación posteriores (N110/50N, planos c) que también afectan a las bolsadas de granito con turmalina. Este granito no se ha explotado por lo deformado que está. Constituye un nivel de visera y da resalte (Figura 3.28).

Más al sur del área de canteras la secuencia comienza por granitos de dos micas, para pasar a los leucogranitos turmaliníferos de grano grueso, leucogranitos de grano fino y leucogranitos de dos micas de nuevo hacia el techo, donde con frecuencia aparecen aplo-pegmatitas culminando la secuencia (Figura 3.29). Esta secuencia podría indicar una cierta simetría del cuerpo, con diferenciación magmática en distintas etapas, y no unidireccional; si bien, se evidencia una etapa tardía de diferenciación hacia el techo, con las aplo-pegmatitas, y estructuras de *way up*. Esta misma secuencia que se aprecia a escala métrica, también se puede apreciar a menor escala con la presencia de *layers* de granito pobres en turmalina alternantes con otros ricos en este mineral (Figura 3.30).

El contacto superior (techo) e inferior (muro) del cuerpo laminar, así como los contactos internos, las estructuras internas de flujo magmático y los planos de foliación buzcan muy ligeramente hacia el norte (5-25°), como consecuencia de su ubicación en el flanco N de la antifirma, deduciéndose una potencia máxima de 35 m.



Figura 3.28. Resalte producido por el granito de dos micas muy deformado en las antiguas canteras de Martinamor. Bajo el granito deformado, restos de la actividad de extracción de las facies de grano fino y grano grueso.



Figura 3.29. Afloramiento de las canteras de Martinamor mostrando la disposición de las tres principales facies graníticas en la parte superior del cuerpo laminar



Figura 3.30. Granito de Martinamor con *layers* enriquecidos en turmalina.

Se reconocen en el campo los efectos de la explotación de las canteras por medio del camino, que las ha ido bordeando a lo largo del tiempo por su límite sur, con las consecuentes etapas en la construcción de las paredes rústicas que delimitan las fincas. El trazado del camino se ha ido desplazando, de sur a norte unos 30 m como consecuencia del avance del frente de cantera.

El modo estratiforme de yacer del plutón y su geometría en capas de poco espesor hace inevitable que en las labores de extracción se obtengan bloques de las dos facies turmaliníferas, lo cual se refleja también en la utilización en los monumentos. No obstante, la mayor superficie explotada corresponde a la facies de leucogranitos de grano grueso, con los agregados nodulosos de turmalina, quedando preservado el contacto interno con los leucogranitos turmaliníferos de grano fino (Figura 3.29). Sin duda, esta última facies no ofrece las cualidades que la gruesa, por su heterogeneidad y relativa escasez, haciendo que las labores se hayan abandonado al ser alcanzado el contacto por el frente de explotación. En las partes superiores del cuerpo laminar, y por tanto, en las labores más tardías, se reconocen restos de sondeos de sección triangular (Figura 3.31A) en la facies de grano grueso, así como cuñeras en la facies de grano fino (Figura 3.31B).



Figura 3.31. Sondeos de sección triangulas en la facies de grano grueso (A) y restos de cuñeras en la facies de grano fino (B)

3.2.2 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y PETROLÓGICA

Caracterización mineralógica

Para la realización de los estudios por difracción de RX, MEB y otros, así como para los ensayos con probetas de 6x6x6 en el laboratorio, se partió de varios bloques de granito de facies de grano grueso, ampliamente representado en los monumentos «piloto» seleccionados y común en los afloramientos en el campo.

El gráfico obtenido tras el estudio por difracción de rayos-X (polvo desorientado) de una muestra de roca total de leucogranito con turmalina, nos da una aproximación a su composición mineralógica (Figura 3.32), con gran abundancia en cuarzo (Q), plagioclasa (Ab) y menos mica (I/M) y feldespato potásico (FdK).

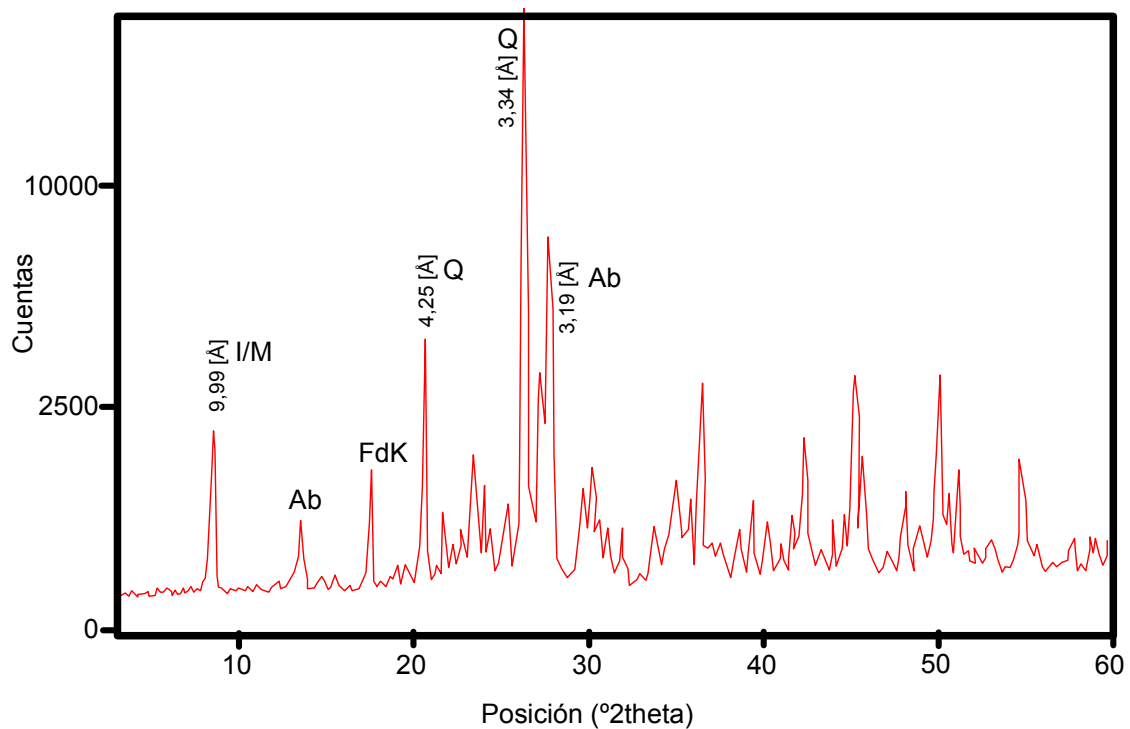


Figura 3.32. Difractograma de rayos X de una muestra de vaugnerita de cantera; polvo desorientado de la muestra de roca total. I/M: Illita/mica. Ab: Albita, FdK: feldespato potásico y Q: cuarzo.

Con anterioridad a cualquier tratamiento, se estudia, mediante MEB, el estado de algunos de los minerales presentes en una muestra de roca de cantera de (Figura 3.33, Figura 3.34, Figura 3.35 y Figura 3.36), permitiéndonos conocer y confirmar la composición cualitativa de los minerales, así como poseer una referencia del estado de los minerales antes de realizar cualquier intervención sobre las rocas, ya sean procesos de envejecimiento artificial acelerado, o cualquier tratamiento de conservación. En todos los casos, la apariencia de los minerales es más o menos limpia, sin corrosiones ni otros signos de deterioro o alteración profunda.

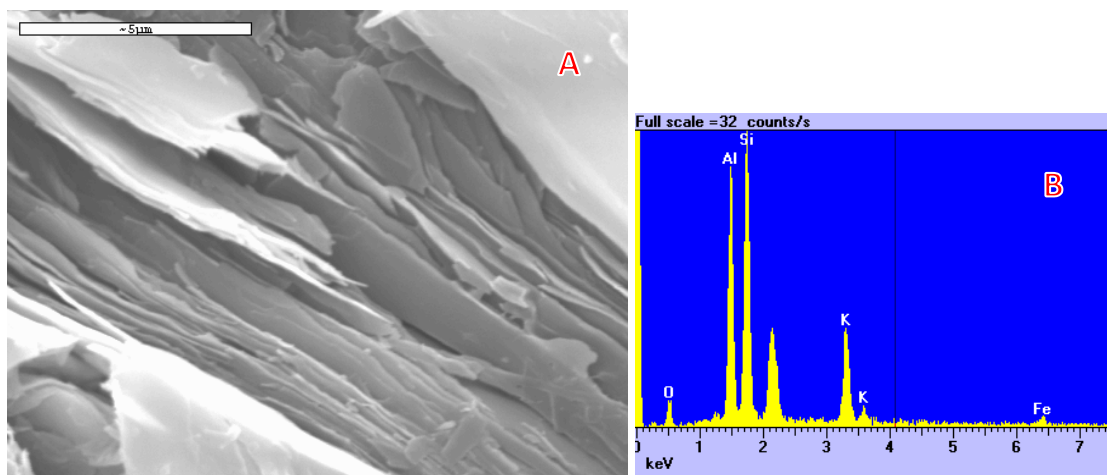


Figura 3.33. A: Imagen de MEB de láminas de moscovita de una muestra de roca de cantera de leucogranito con turmalina de Martinamor. B: Espectro puntual de esa moscovita

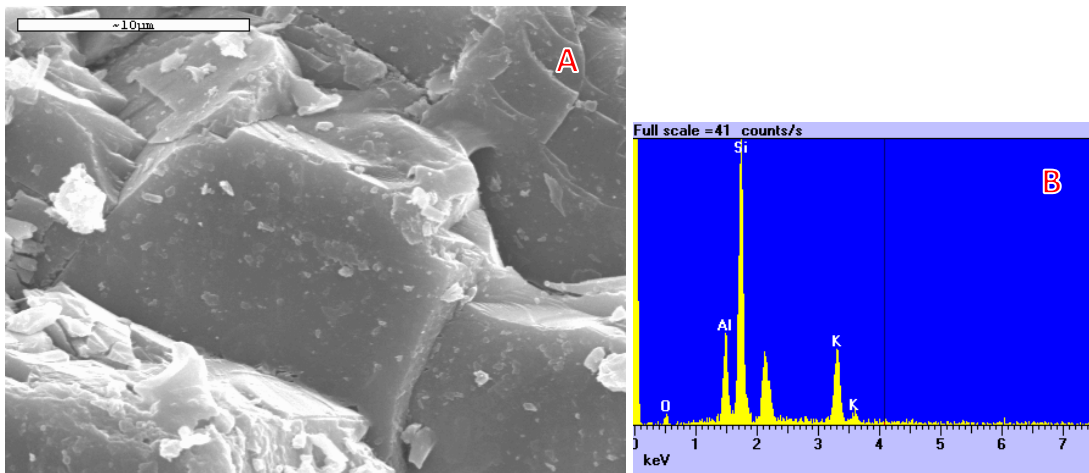


Figura 3.34. A: Imagen de MEB un cristal de feldespato potásico de una muestra de roca de cantera de leucogranito con turmalina de Martinamor. B: Espectro puntual de ese cristal

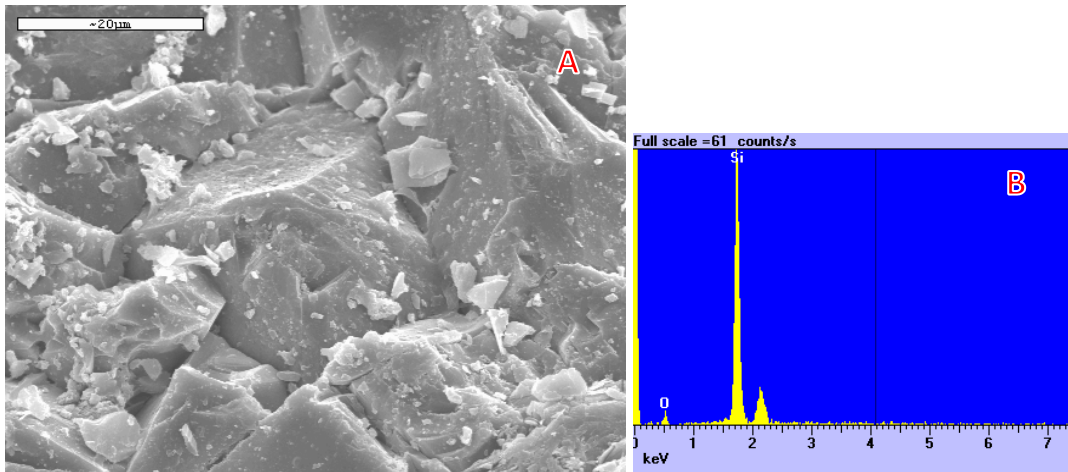


Figura 3.35. A: Imagen de MEB un cristal de cuarzo de una muestra de roca de cantera de leucogranito con turmalina de Martinamor. B: Espectro puntual de la imagen de A.

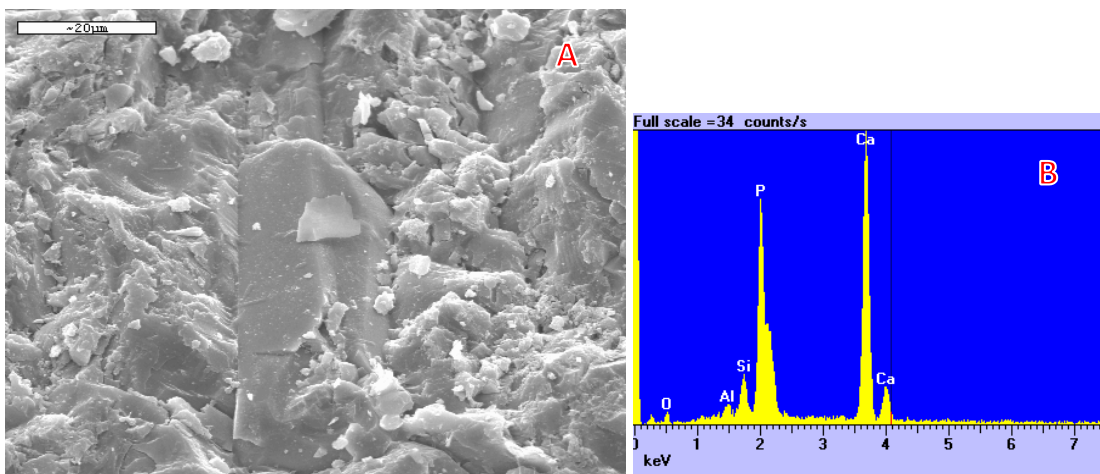


Figura 3.36. A: Imagen de MEB un cristal de apatito de una muestra de roca de cantera de leucogranito con turmalina de Martinamor. B: Espectro puntual del apatito de la imagen de A.

Caracterización petrológica

Petrográficamente, el granito de Martinamor presenta una textura heterogranular (Figura 3.37), de grano fino a grueso, con orientación deformativa. Los minerales esenciales son: cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, con proporciones variables, aunque generalmente escasas, de moscovita, turmalina y biotita, por lo que estos tres últimos minerales en muchos casos pueden ser considerados simplemente accesorios al no superar el 5 % en volumen. Típicamente accesorios son el granate, apatito, minerales de hierro y circón. Como minerales secundarios hay sericita, clorita y rutilo, como resultado de los distintos tipos de desestabilización de los minerales esenciales y accesorios.



Figura 3.37. Aspecto de *visu* del leucogranito de Martinamor en una de las probetas empleadas para la caracterización del material.

3.2.3 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

Elementos mayores y traza

Se han realizado análisis de muestras frescas pertenecientes al plutón de Martinamor, de cada una de una de las tres facies definidas anteriormente (Tabla 3.5 y Tabla 3.6).

Tabla 3.5. Análisis químico de elementos mayores (laboratorios ACTLABS, Ancaster, Canadá), parámetros geoquímicos, cálculos modales (% en volumen) y cálculos normativos para las tres principales facies del plutón de Martinamor.

| | M-10 | M-11 | M-12 |
|---|--|--|------------------------------|
| Tipo de roca | Leucogranito turmalinífero de grano grueso | Leucogranito turmalinífero de grano fino | Leucogranito de dos micas |
| <i>Cálculos modales (% en volumen)</i> | | | |
| Cuarzo | 32,5 | 33,9 | 31,7 |
| Plagioclasa | 35,3 | 30,1 | 36,8 |
| Feldespato K | 23,5 | 26,7 | 21,4 |
| Moscovita | 5,5 | 2,4 | 8,6 |
| Turmalina | 1,7(*) | 6,2 | 0,0 |
| Biotita | 1,3 | 0,0 | 1,4 |
| Apatito | 0,2 | 0,7 | 0,0 |
| <i>Elementos Mayores</i> | | | |
| SiO ₂ | 74,41 | 75,01 | 75,61 |
| TiO ₂ | 0,058 | 0,044 | 0,028 |
| Al ₂ O ₃ | 14,6 | 14,55 | 14,23 |
| Fe ₂ O ₃ (Total) | 0,68 | 0,78 | 0,46 |
| MnO | 0,025 | 0,015 | 0,017 |
| MgO | 0,14 | 0,25 | 0,09 |
| CaO | 0,67 | 0,54 | 0,59 |
| Na ₂ O | 3,94 | 3,79 | 4,23 |
| K ₂ O | 4,37 | 4,49 | 4,01 |
| P ₂ O ₅ | 0,21 | 0,22 | 0,18 |
| H ₂ O | 0,79 | 0,50 | 0,60 |
| Total | 99,89 | 100,20 | 100,10 |
| <i>Parámetros Geoquímicos</i> | | | |
| M | 3,0 | 6,2 | 1,4 |
| Índice A/CNK | 1,17 | 1,20 | 1,15 |
| <i>Composición normativa parcial (% en peso, recalculado a 100)</i> | | | |
| Cuarzo | 35,55 | 36,82 | 36,21 |
| Anortita | 2,06 | 1,31 | 1,82 |
| Albita | 35,16 | 33,86 | 37,28 |
| Ortosa | 27,23 | 28,01 | 24,68 |

(*) Corresponde a la proporción de agregados de turmalina estimada por tratamiento de imagen en placas métricas.

Tabla 3.6. Elementos traza (en ppm) de las rocas del plutón de Martinamor (laboratorios ACTLABS, Ancaster, Canadá)

| | M-10 | M-11 | M-12 | | M-10 | M-11 | M-12 |
|----|------|-------|-------|----|-------|-------|-------|
| Cs | 29,3 | 40 | 23 | U | 6,46 | 2,53 | 1,31 |
| Rb | 216 | 205 | 188 | La | 4,77 | 3,54 | 2,12 |
| Sr | 83 | 79 | 64 | Ce | 9,72 | 6,94 | 4,06 |
| Ba | 206 | 216 | 113 | Pr | 1,13 | 0,78 | 0,44 |
| Pb | 53 | 55 | 49 | Nd | 4,74 | 3,26 | 1,9 |
| V | < 5 | < 5 | < 5 | Sm | 1,21 | 0,89 | 0,49 |
| Cr | < 20 | < 20 | < 20 | Eu | 0,482 | 0,45 | 0,345 |
| Co | 84 | 97 | 83 | Gd | 1,53 | 0,99 | 0,49 |
| Ni | < 20 | < 20 | < 20 | Tb | 0,33 | 0,23 | 0,13 |
| Cu | < 10 | < 10 | < 10 | Dy | 2,15 | 1,49 | 0,84 |
| Ga | 19 | 15 | 16 | Ho | 0,36 | 0,26 | 0,16 |
| Ge | 1,6 | 1,6 | 1,7 | Er | 1,05 | 0,78 | 0,46 |
| Sb | 1 | < 0,2 | < 0,2 | Tm | 0,163 | 0,129 | 0,081 |
| Sc | 3 | 2 | 2 | Yb | 1,03 | 0,84 | 0,57 |
| Sn | 16 | 17 | 17 | Lu | 0,141 | 0,119 | 0,086 |
| Tl | 1,33 | 1,3 | 1,13 | Be | 15 | 8 | 9 |
| Zn | < 30 | 40 | < 30 | Bi | 9,8 | 4,7 | 4,2 |
| Y | 12 | 8,7 | 5,1 | As | 42 | 29 | 32 |
| Zr | 31 | 22 | 18 | Mo | < 2 | < 2 | < 2 |
| Nb | 9,6 | 2,4 | 7,2 | Ag | < 0,5 | < 0,5 | < 0,5 |
| Hf | 1,1 | 0,9 | 0,7 | In | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| Ta | 3,1 | 4,81 | 3,01 | W | 454 | 527 | 458 |
| Th | 1,37 | 0,99 | 0,52 | | | | |

Del estudio petrográfico, el trabajo de campo y los cálculos modales realizados (Tabla 3.5) se distinguen las siguientes facies graníticas:

a. Leucogranitos turmaliníferos de grano grueso

De visu se caracterizan por un aspecto moteado o noduloso definido por agregados de turmalina (\pm cuarzo), de tamaño comprendido entre 0,5 y 6 cm, mostrando a menudo una orientación por flujo. Los agregados sobresalen netamente en una mesostasis leucocrática de grano medio-grueso (Figura 3.38A).

Al microscopio, sin embargo, la mesostasis es inequigranular, con cristales de feldespato potásico y plagioclasa que alcanzan 3 mm, mientras que los cristales xenomorfos más pequeños de cuarzo no pasan de 0,1 mm. El cuarzo siempre presenta señales de una fuerte deformación plástica, con extinción ondulante y subgranos. Por la forma de los cristales, la textura de la mesostasis es alotriomorfa-hipidiomorfa, con cristales subidiomorfos de plagioclasa albitica (An_{08-04}), y cristales xenomorfos de cuarzo y de feldespato potásico escasamente micropertitizado. La presencia de

turmalina está restringida a los agregados alargados, cuya proporción oscila entre 1,4 y 2,0 % en el total de la roca, según estimaciones realizadas por tratamiento de imagen (CANVASTM X, 2005, ACD Systems, Inc.) para varias placas de 1 x 1 m². La abundante moscovita y la escasa biotita completan el cuadro de los minerales esenciales y subordinados, además de escasísimos minerales accesorios como circón y apatito.

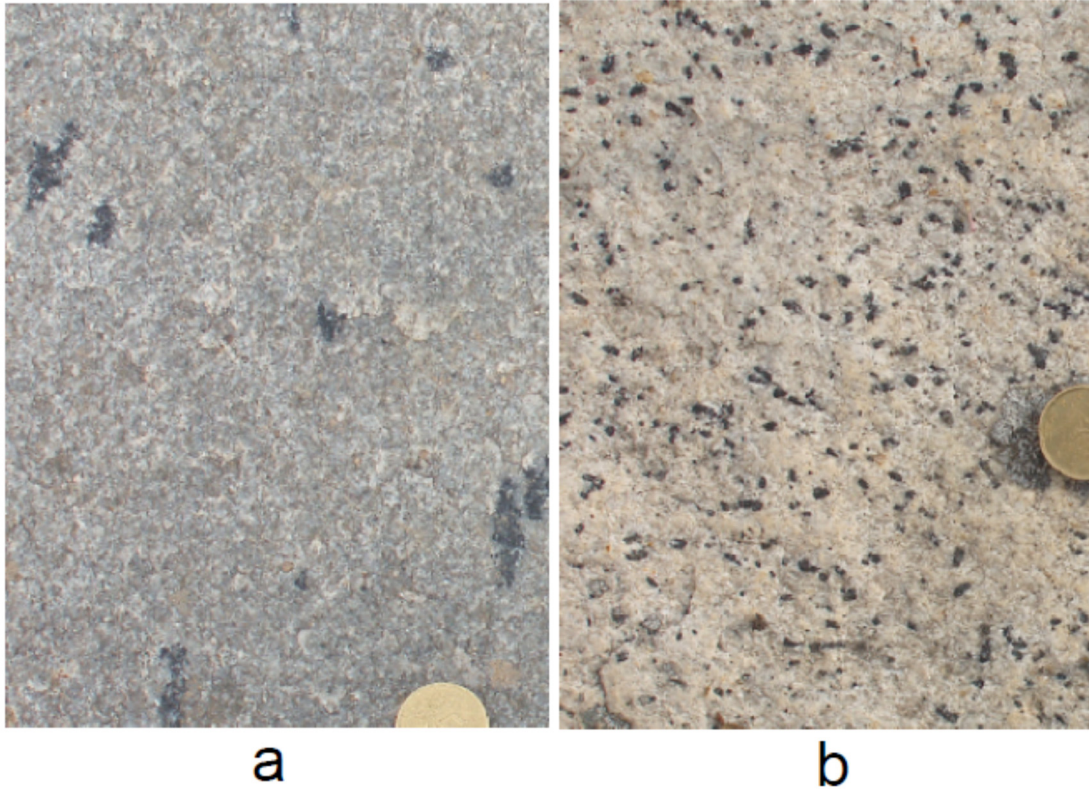


Figura 3.38. Aspecto mesoscópico de la facies de grano grueso con agregados nodulosos de turmalina (A) y de la facies de grano fino (B).

b. Leucogranitos turmaliníferos de grano fino

Se diferencian fundamentalmente en el tamaño de los cristales de turmalina, que no superan 1 cm (Figura 3.38B). Además, es una facies mucho más heterogénea, y suelen aparecer estructuras en capas o *layering* magmático, constituidas por concentraciones de turmalina. Muestran una textura general de tendencia equigranular de grano medio-fino, aunque al microscopio, al igual que en el caso anterior, se constata su carácter inequigranular, además de su tendencia panalotriomorfa. La proporción de turmalina es mucho más abundante, al igual que el apatito, que forma a veces agregados de cristales prismáticos.

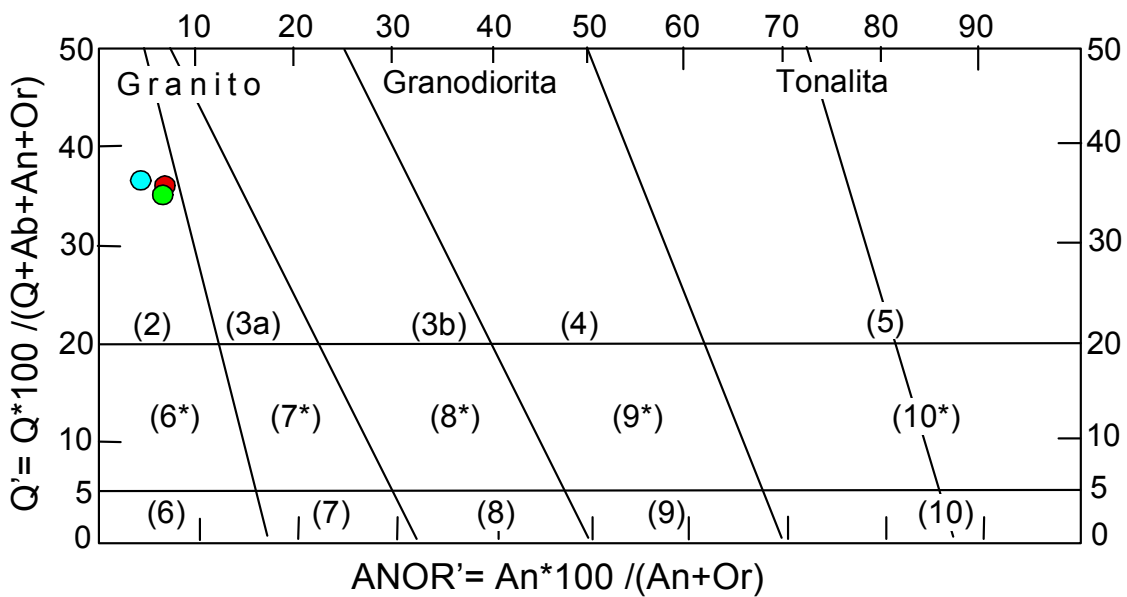
c. Leucogranitos de dos micas

Muestran características texturales similares a los anteriores, pero con mayor contenido en moscovita, sin turmalina y presencia ocasional de granate.

Clasificación

En virtud del contenido en sílice en roca total se deduce que todas las rocas analizadas del plutón son de naturaleza ácida, con un contenido en sílice muy constante (Tabla 3.5).

El contenido en minerales oscuros, M, es inferior a 90. Su clasificación se realiza mediante el diagrama Q'-ANOR', empleando los minerales normativos calculados mediante la norma CIPW (Tabla 3.5 y Figura 3.39), tratándose claramente de granitos de feldespato alcalino, por cuanto su plagioclasa es albítica. La proporción de albíta (An₀₀₋₀₅) con respecto a plagioclasa cálcica (An_{>05}) ha sido estimada por la relación Ab/An de los cálculos normativos (Tabla 3.5), lo que supone una relación modal de Feldespato alcalino / Feldespato total comprendida entre 0,97-0,98.



- Campos implicados:
- (2): granitos de feldespato alcalino
 - M10 Leucogranito turmalinífero de grano grueso
 - M11 Leucogranito turmalinífero de grano fino
 - M12 Granito de dos micas

Figura 3.39. Clasificación de las muestras en el diagrama Q'-ANOR' de Debon y Le Fort (1988)

Las tres facies graníticas muestran elevados contenidos en sílice y álcalis (Tabla 3.5), mucho más altos que la media de los granitos de tipo S, mientras que los contenidos en TiO_2 , FeO, MgO y CaO son considerablemente más bajos, tratándose, en consecuencia, de fundidos graníticos muy diferenciados. Su carácter altamente peraluminico se manifiesta por los elevados contenidos en corindón normativo (de 2,3 a 3,0) (no incluidos en la Tabla 3.5) y altos índices A/CNK (1,15-1,20) (Tabla 3.5)

Diagramas de normalización

Los diagramas de normalización al condrito, tanto para las tierras raras (Figura 3.40) como para los diagramas multi-elementales (Figura 3.41) indican patrones generales de enriquecimientos en los elementos más incompatibles, con rectas de pendiente negativa.

Todas las muestras del plutón indican enriquecimiento en tierras raras ligeras, mayor en las de grano grueso (M10 Σ LREE: 21,57) que en las de grano fino (M11 Σ LREE: 15,41) y en granito de dos micas (M12 Σ LREE: 9,01) (Figura 3.40). El grado de fraccionamiento es bajo y similar para las tres facies (LREE/HREE: M10: 2,98; M11: 2,91; M-12: 2,84). Todas las muestras reflejan una ligera anomalía positiva de Eu, menos acusada en la facies de grano grueso (Eu/Eu* M10: 1,08) y más acusada en el granito de dos micas (Eu/Eu* M12: 2,16). Esto se puede deber, por un lado, a la ausencia de fases feldespáticas residuales en el proceso de fusión y, por otro lado, a un enriquecimiento relativo en feldespato de los leucosomes resultantes de fundir un protolito pelítico. Además, la ausencia de empobrecimiento en tierras raras pesadas indica que no existió una fase residual granatífera.

Mediante el diagrama multi-elemental de normalización al condrito (Figura 3.41) se observa una similitud en los patrones para todas las muestras del plutón, lo que sugiere un carácter general de cogenetismo. Hay que resaltar la pronunciada anomalía negativa de Ti, y las ligeramente negativas de Th y Sm, y Nb en la muestra M-11.

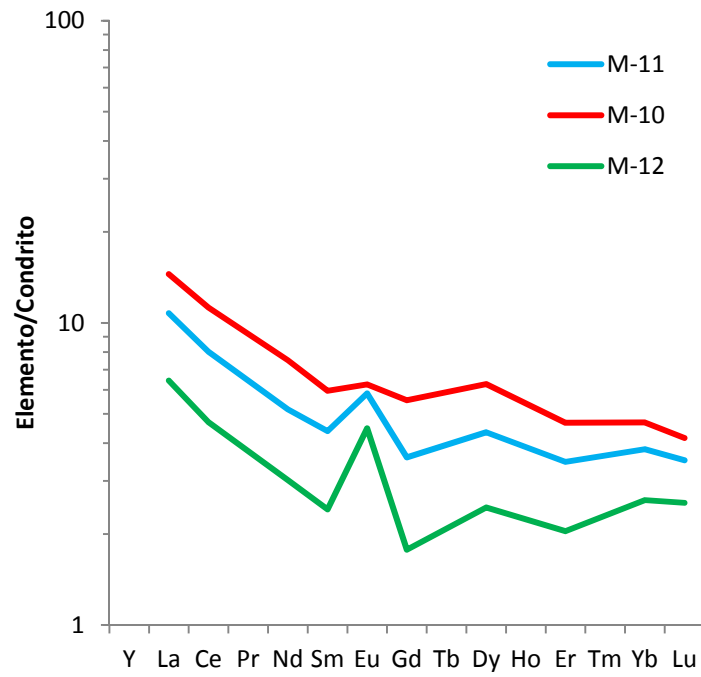


Figura 3.40. Diagrama de tierras raras de las rocas del plutón de Martinamor. Nakamura (1974)

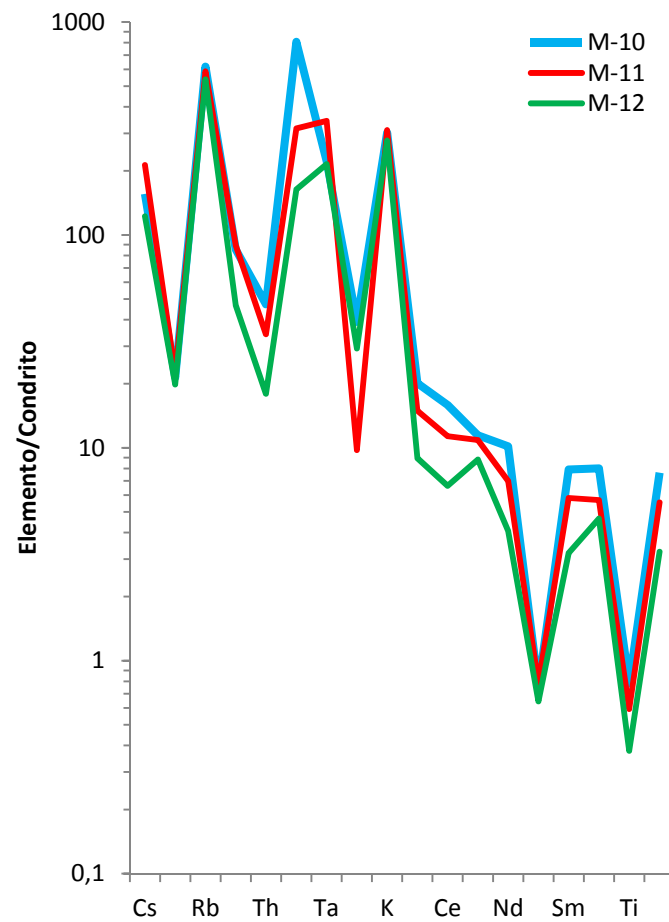


Figura 3.41. Diagrama multielemental de las rocas del plutón de Martinamor. Sun y McDonough (1989)

3.3 GRANITO DE LOS SANTOS

3.3.1 SITUACIÓN GEOLÓGICA Y GEOLOGÍA DE CAMPO

El granito de Los Santos se extrae del área próxima a la localidad salmantina de Los Santos, una zona muy estudiada estructural, petrogenética y mineralógicamente (Martínez García y Nicolau, 1973; Díez Balda, 1986; Monteserin López *et al.*, 1991b; Díez Balda *et al.*, 1995; Yenes *et al.*, 1999; Timón *et al.*, 2007; López Plaza *et al.*, 2009). Los granitos del área de las canteras de Los Santos, al sur del pueblo, han sido descritos como «conjunto granítico de Los Santos-Valdelacasa», dentro del grupo de granitoides hercínicos, ocupando una extensión aproximada de 65 Km² al SE de la provincia de Salamanca.

Para el presente estudio se han diferenciado dos grupos litológicos a escala cartográfica en esta área: 1) un granito porfídico cordierítico, en la parte septentrional, y 2) un granito porfídico biotítico, en el sector meridional (Figura 3.42). El primero de ellos, se corresponde con el Grupo Valdelacasa (formado por monzogranitos biotíticos) y el segundo, con el Grupo Los Santos (formado por monzogranitos biotíticos con moscovita accesoria) (Monteserin López *et al.*, 1991b). El Grupo Valdelacasa, es equiparable a los granitos cordieríticos del borde del Sistema Central estudiados por Ugidos y Recio (1993), mientras que el Grupo de Los Santos, el más biotítico, corresponde a las facies internas del batolito y comparable, en parte, a las granodioritas de otros sectores más centrales del Sistema Central.

El granito de Los Santos se extrae de las canteras situadas al sur de la localidad del mismo nombre, en la parte más septentrional del área batolítica de Los Santos-Valdelacasa, como hemos indicado anteriormente. En un trabajo preliminar vinculado a la presente memoria (López Plaza *et al.*, 2009) se han diferenciado dos grupos litológicos a escala cartográfica en este cuerpo (Figura 3.42):

- un granito porfídico cordierítico, en la parte septentrional y,
- un granito porfídico biotítico, en el sector meridional.

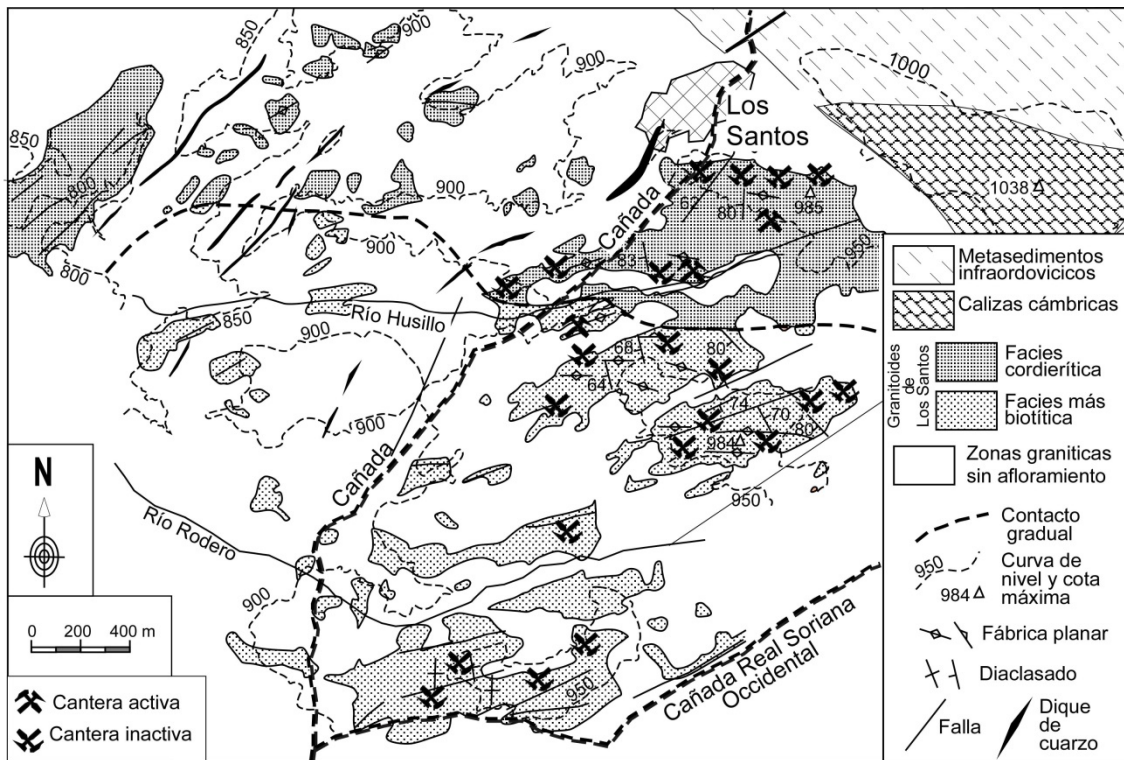


Figura 3.42. Esquema geológico del área de las canteras de Los Santos (López Plaza *et al.*, 2009)

Ambos son monzogranitos porfídicos con megacrystales de feldespatos, menos abundantes en el grupo biotítico, con cuarzo, plagioclasa, microclina y biotita como minerales esenciales y apatito y circón como accesorios más comunes en los dos grupos; en el granito porfídico biotítico, también hay moscovita como accesorio (Monteserin López *et al.*, 1991b).

En el campo, el contacto entre este conjunto granítico y los metasedimentos cámbricos al N, se realiza con la facies de borde porfídica cordierítica, siendo neto e intrusivo. Hacia el S, el contacto entre las dos facies, cordierítica (de borde) y biotítica (interna), es de naturaleza híbrida, determinado por una banda de escala decamétrica en la que existe gran profusión de enclaves de rocas microgranudas y de metamórficas. Hacia el noroeste, el grupo de Los Santos presenta una relación gradual de pérdida de porfirismo y enclaves, que lleva a describir una facies equigranular (Monteserin López *et al.*, 1991b).

A lo largo del área batolítica, hay numerosas explotaciones ya abandonadas en ambas facies del cuerpo granítico, como puede verse en la Figura 3.42.

La obtención de bloques en las canteras está condicionada por las estructuras y heterogeneidades de carácter magmático que muestran los granitos en el área canterable, que son tipificadas de la siguiente manera:

- 1) Enclaves microgranudos tonalíticos y cuarzodioríticos, generalmente más abundantes en la facies interna meridional (Figura 3.43), aunque también

presentes en la facies cordierítica, lo que sugiere la implicación de algún tipo de proceso de hibridación. Los enclaves aparecen con tal ubicuidad que su presencia llega a ser uno de los rasgos litológicos más característicos de la piedra de Los Santos.

- 2) Meso-estructuras, del tipo de capas biotíticas (*layering*), *schlieren* de flujo, *schlieren* truncados, similares a los descritos por Barrière (1981) y elipsoides [tipificados por Weimberg *et al.* (2001)] que aparecen localizadas especialmente en la zona de contacto de las dos facies principales (Figura 3.44). Todas estas estructuras podrían ser interpretadas como reajustes internos de flujo magmático, fenómeno común entre facies o pulsaciones magmáticas que no están separadas en el tiempo, como ocurre en esta área del borde occidental del Sistema Central (Yenes *et al.*, 1999).
- 3) Bolsadas pegmatíticas, capas (*layers*) aplo-pegmatíticas y estructuras tubulares a modo de pipas ricas en megacristales de feldespatos, todas ellas a menudo en asociación con enclaves microgranudos arrastrados en un ambiente magmático muy dinámico que habría originado algún tipo de exsolución de volátiles.

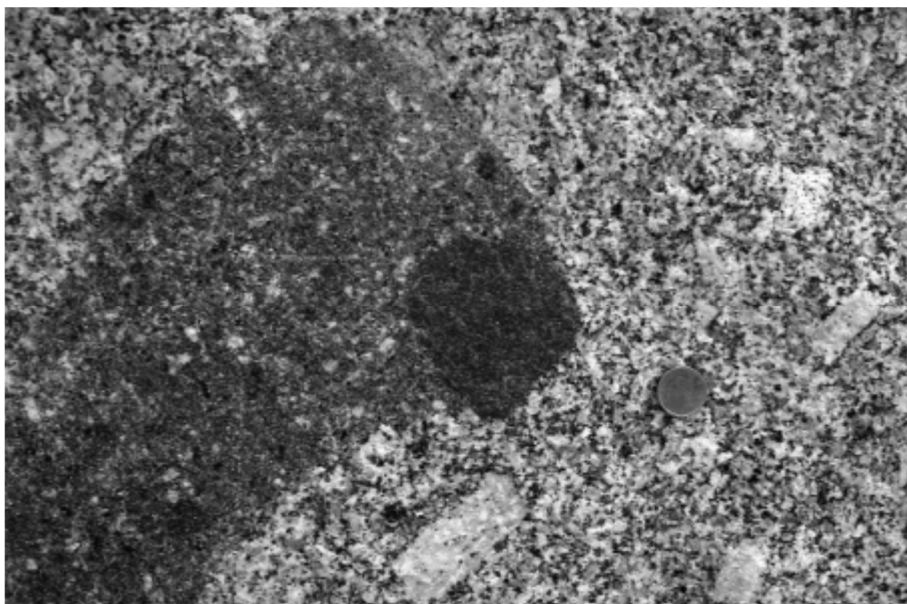


Figura 3.43. Doble enclave en la facies biotítica del granito de Los Santos



Figura 3.44. Estructuras de flujo magmático en la zona de contacto entre las dos facies principales del granito de Los Santos

Los dos últimos tipos de heterogeneidades son especialmente frecuentes en la zona de contacto entre las dos facies, dificultando la obtención de bloques homogéneos. No obstante, la explotación en esta zona ha sido y es también intensa, lo que permite observar estas heterogeneidades especialmente en el enlosado más reciente de la ciudad.

A parte de las estructuras magmáticas, se identifican otra serie de condicionantes a la extracción de bloques de forma industrial en las canteras:

- La deformación varisca dio lugar a una débil fábrica plano-lineal subvertical marcada sobre todo por la biotita, cuyos planos muestran una dirección próxima a E-O, variando desde N 50 a N 105, en coherencia con los modelos de emplazamiento sincinemáticos respecto de la fase 3 hercínica (Yenes *et al.*, 1999). En los planos se observa, además, una lineación mineral subvertical definida por la biotita. En general, la fábrica se manifiesta mejor hacia el N, es decir, en las zonas próximas al borde del batolito, donde los megacrystales de feldespato potásico

definen planos de fuerte buzamiento al N, o en todo caso subparalelos al exocontacto.

A efectos industriales la anisotropía planar condiciona una cierta debilidad en la roca («mano buena», «ley» o «hilo») que ha sido aprovechada sistemáticamente, explicándose así el predominio de la dirección próxima a E-O en los frentes de explotación.

- El diaclasado tardío se manifiesta en diversas familias subverticales, una de ellas de dirección predominante N 177, y la otra de dirección media N 84 (desde N 64 a N 109). No obstante, debido a su espaciado relativamente alto la explotación industrial no se ha visto nunca afectada seriamente por este tipo de estructuras
- La descompresión subhorizontal tardi-alpina ha originado a escala cristalina una microfracturación subhorizontal puesta de manifiesto, sobre todo, en el cuarzo y en menor medida en los feldespatos, facilitando el laboreo de manera tan sutil como efectiva al aprovechar el denominado «levante». Igualmente, a escala megascópica los procesos descompresivos tardi-alpinos han generado un sistema de diaclasado subhorizontal o descamación (*sheeting*), cuyo espaciado se hace cada vez mayor en profundidad, determinando el levante natural con una potencia mínima de 15-20 cm en la parte más superficial.
- Por otra parte, el sistema de fracturación al NE, característico en el Sistema Central, ha condicionado el alineamiento de los afloramientos graníticos en esa dirección, con direcciones de alrededor N 70 en la parte meridional, y de N 40 en la parte septentrional, donde se han producido estructuras de silicificación o «sierros».

3.3.2 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y PETROLÓGICA

Caracterización mineralógica

Para la realización de los estudios de DRX, MEB, ensayos con probetas de 6x6x6 en el laboratorio, etc. se partió de varios bloques de granito biotítico, ampliamente representado en los monumentos «piloto» seleccionados.

El gráfico obtenido tras el estudio por difracción de rayos-X (polvo desorientado) de una muestra de roca total de granito de Los Santos nos da una aproximación a su composición mineralógica (Figura 3.45), con gran abundancia en cuarzo (Q), feldespato potásico (FDK), plagioclasa (Ab) y menos mica (I/M).

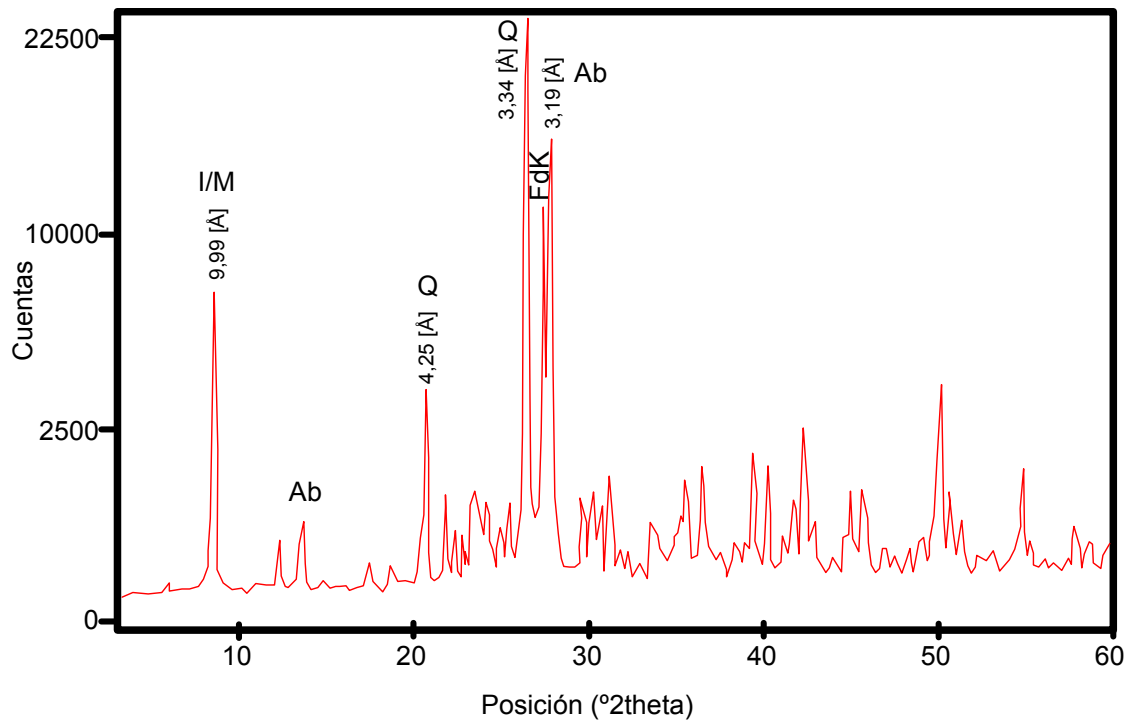


Figura 3.45. Difractograma de rayos X del granito de Los Santos de cantera estudiado; polvo desorientado de la muestra de roca total. I/M: Illita/mica. Ab: Albite, FdK: feldespato potásico y Q: cuarzo.

Ayudados de MEB se estudia el estado de los minerales presentes en una muestra de roca de cantera de (Figura 3.46 y Figura 3.47), para conocer y confirmar la composición cualitativa de los minerales, así poseer una referencia del estado de los minerales antes de realizar cualquier intervención sobre las rocas, ya sean procesos de envejecimiento artificial acelerado, o cualquier tratamiento de conservación. En todos los casos, la apariencia de los minerales es más o menos limpia, sin corrosiones ni otros signos de deterioro o alteración profunda.

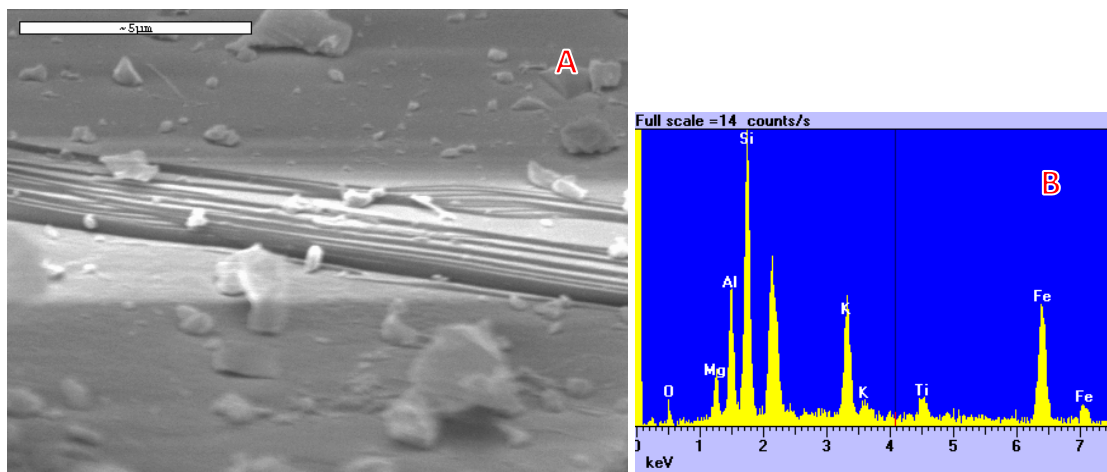


Figura 3.46. A: Imagen de MEB de láminas de biotita de una muestra de roca de cantera de granito de Los Santos. B: Espectro puntual de esa biotita.

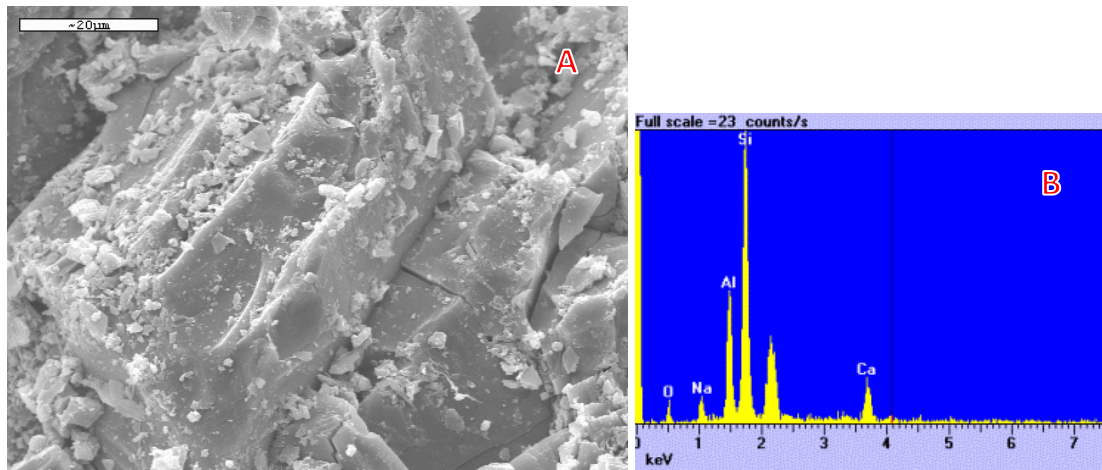


Figura 3.47. A: Imagen de MEB de un cristal de plagioclasa en una muestra de roca de cantera de granito de Los Santos. B: Espectro puntual de ese cristal.

Caracterización petrológica

Petrográficamente, el granito de Los Santos presenta una textura heterogranular porfídica con megacristales de feldespato potásico en una matriz de grano medio a grueso. Los minerales esenciales son: cuarzo, plagioclasa, microclina y biotita, en torno al 8-10%. De forma accesoria hay moscovita, apatito y circón. Como secundarios se encuentran moscovita, sericita, clorita, epidota y feldespato potásico (Monteserin López *et al.*, 1991b) (Figura 3.48).



Figura 3.48. Aspecto de *visu* del granito de Los Santos en una de las probetas empleadas para la caracterización del material.

Desde un punto de vista mineralógico, las dos facies diferenciadas en campo reúnen ciertas semejanzas, con megacristales de feldespato potásico poiquilítico, plagioclasa con zonado oscilatorio desde el núcleo con un contenido en anortita superior al 30 % hasta el borde de oligoclasa ácida. La presencia de cordierita (1,5 % del volumen total) en cristales de hasta 1 cm, más o menos pinnitizados, junto con moscovita secundaria (2,1 % del total) y una menor proporción de biotita (12 %) son los rasgos distinguibles de la facies cordierítica (García de los Ríos Cobo, 1991) (Figura 3.49), mientras que la mayor proporción de biotita (15 % del total) (Ugidos *et al.*, 1990) unido a un carácter porfídico más acentuado son los rasgos más característicos de la facies más interna (Figura 3.43). Los minerales accesorios varían poco en las dos facies, con abundante circón y apatito, mientras que los aluminosilicatos, principalmente andalucita, son casi exclusivos de la facies cordierítica, tanto más abundantes cuanto mayor es su proximidad al exocontacto.

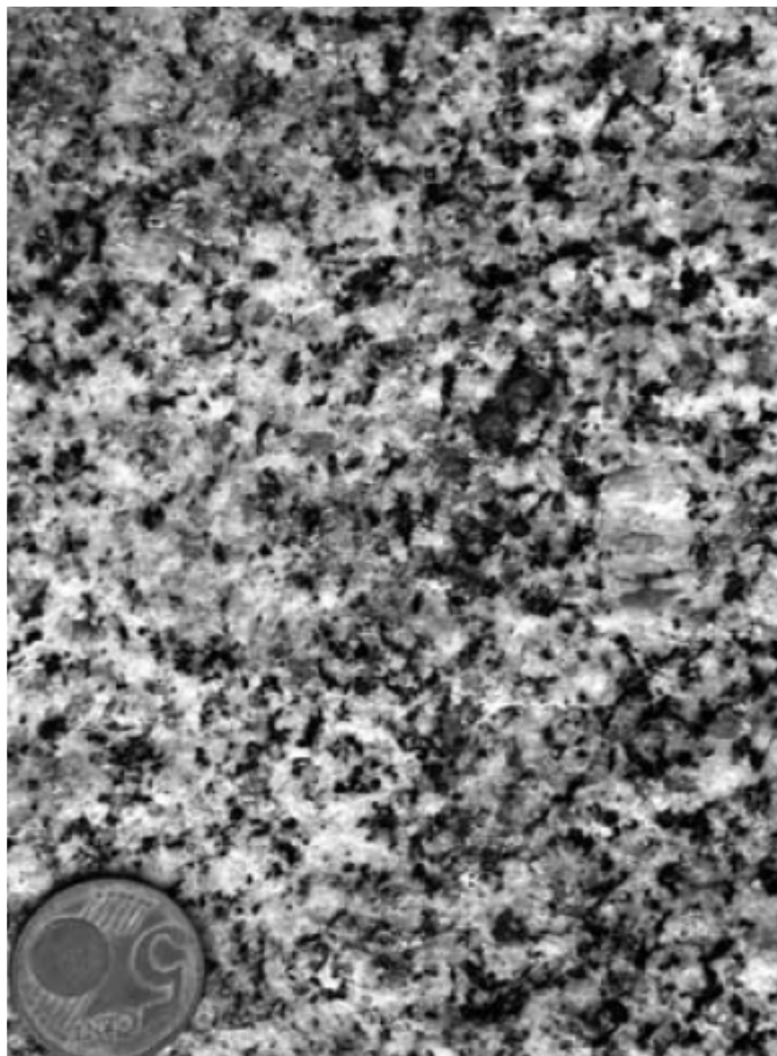


Figura 3.49. Facies de borde del granito de Los Santos con un cristal apreciable de cordierita hacia el centro de la imagen.

3.3.3 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

Elementos mayores y traza

Los análisis realizados de elementos mayores y trazas, realizados en los laboratorios ACTLABS, Ancaster, Canadá, se presentan en las Tabla 3.7 y Tabla 3.8.

En virtud del contenido en sílice en roca total se deduce que todas las rocas analizadas del plutón son de naturaleza ácida, con un contenido en sílice constante (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Elementos mayores (% en peso), minerales normativos y parámetros de las rocas de Los Santos y similares del Batolito del Sistema central

| | LS-1 | LS-2 |
|---|------------------------------------|--------------------------------------|
| | <i>Granito porfídico biotítico</i> | <i>Granito de dos micas de borde</i> |
| <i>SiO₂</i> | 68,68 | 70,96 |
| <i>TiO₂</i> | 0,56 | 0,43 |
| <i>Al₂O₃</i> | 15,14 | 14,66 |
| <i>Fe₂O₃ (Total)</i> | 3,66 | 2,84 |
| <i>MnO</i> | 0,07 | 0,05 |
| <i>MgO</i> | 1,16 | 1,08 |
| <i>CaO</i> | 2,34 | 1,94 |
| <i>Na₂O</i> | 3,36 | 3,38 |
| <i>K₂O</i> | 4,2 | 4,01 |
| <i>P₂O₅</i> | 0,24 | 0,23 |
| <i>H₂O</i> | 0,59 | 0,72 |
| <i>Total</i> | 100,01 | 100,31 |
| <i>Parámetros</i> | | |
| <i>A/CNK</i> | 1,05 | 1,07 |
| <i>Q'</i> | 29,90 | 33,79 |
| <i>ANOR'</i> | 28,80 | 25,52 |
| <i>Composición normativa parcial (% en peso, recalculado a 100)</i> | | |
| <i>Cuarzo</i> | 29,90 | 33,79 |
| <i>Anortita</i> | 11,12 | 8,90 |
| <i>Albita</i> | 31,49 | 31,34 |
| <i>Ortosa</i> | 27,49 | 25,97 |

Tabla 3.8. Elementos traza (ppm) de las rocas de Los Santos y similares del Batolito del Sistema central

| | LS-1 | LS-2 |
|----|------------------------------------|--------------------------------------|
| | <i>Granito porfídico biotítico</i> | <i>Granito de dos micas de borde</i> |
| Hf | 5,6 | 4,0 |
| Ta | 2,13 | 2,51 |
| Ba | 560 | 445 |
| Cr | 20 | 20 |
| Nb | 11,00 | 9,90 |
| Rb | 192 | 198 |
| Sr | 142 | 193 |
| Th | 14,80 | 12,40 |
| U | 3,04 | 3,74 |
| Y | 26,2 | 18,2 |
| Zr | 206 | 141 |
| Be | 4 | 4 |
| Ga | 20 | 19 |
| Sc | 10 | 7 |
| V | 42 | 36 |
| Zn | 60 | 50 |
| Y | 26,2 | 18,2 |
| Th | 14,8 | 12,4 |
| Ta | 2,13 | 2,51 |
| Cs | 14,3 | 15,0 |
| Pb | 24 | 30 |
| La | 34,6 | 27,1 |
| Ce | 71,6 | 57,0 |
| Nd | 31,5 | 25,1 |
| Sm | 6,33 | 4,94 |
| Eu | 1,00 | 0,78 |
| Gd | 5,19 | 3,93 |
| Dy | 4,82 | 3,56 |
| Er | 2,50 | 1,77 |
| Yb | 2,42 | 1,78 |
| Lu | 0,335 | 0,248 |
| Tb | 0,90 | 0,69 |
| Tm | 0,376 | 0,275 |

Clasificación

El carácter porfídico del granito, junto con su mesostasis gruesa, hace poco adecuada una clasificación modal, que requeriría un gran número de láminas delgadas para su fiabilidad. Por esto, son preferibles, en este caso, las clasificaciones basadas en los análisis químicos cuya cantidad de muestra hace minimizar el error. A tal efecto, se han calculado los minerales normativos mediante la norma CIPW, así como los

parámetros adecuados (Tabla 3.7), que nos posibilitan el empleo del diagrama Q'-ANOR' de Debon y Le Fort (1988) (Figura 3.50) para la clasificación.

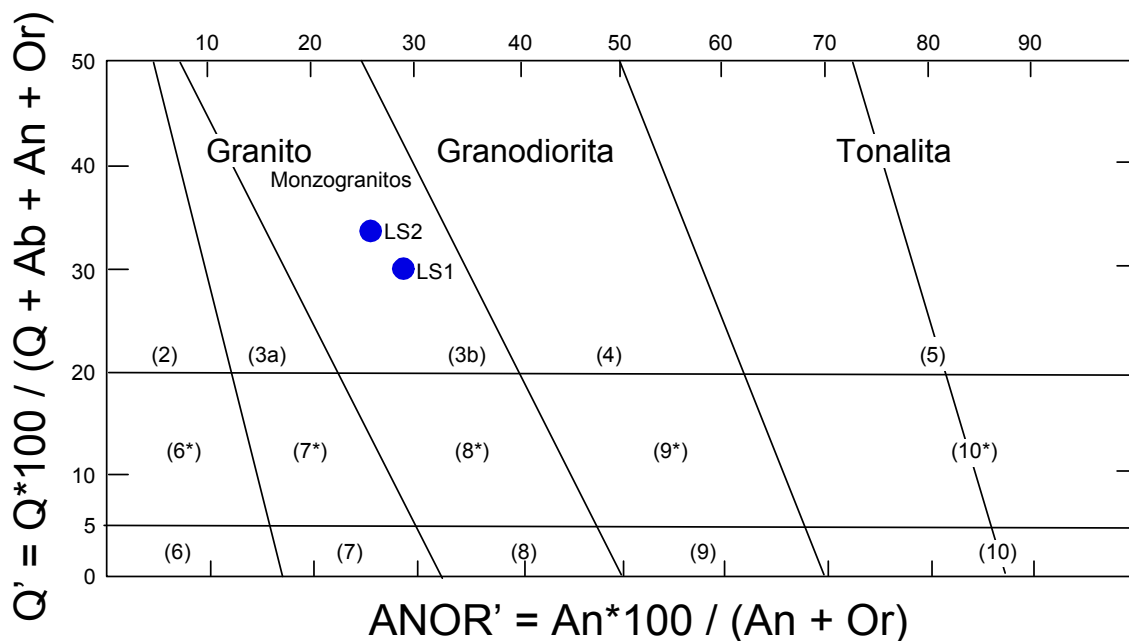


Figura 3.50. Clasificación de las muestras de las canteras de Los Santos en el diagrama Q'-ANOR' de Debon y Le Fort (1988).

El diagrama de clasificación Q'-ANOR' (Figura 3.50) indica que las muestras de los granitos de Los Santos se proyectan en el campo 3b de los monzogranitos.

Todas las muestras analizadas definen una asociación peraluminica, dato confirmado por los valores del índice A/CNK de Shand (1943) superior a 1 (Tabla 3.7).

Diagramas de normalización

Con respecto a los elementos traza, los modelos de normalización al condrito (Figura 3.51) indican una gran similitud de las dos muestras de cantera (LS 1 y LS 2).

Los diagramas de normalización al condrito para las tierras raras (Figura 3.52) indican patrones generales de enriquecimientos en los elementos más incompatibles, con rectas de pendiente negativa. Ambas muestras de cantera reflejan una anomalía negativa de Eu, de valor muy similar para las dos (Eu/Eu* LS1: 0,53 y LS2: 0,54). Todas las muestras del plutón indican enriquecimiento en tierras raras ligeras, mayor en las de facies más biotítica (LS1 Σ LREE: 144) que en las de facies más leucocrática (LS2 Σ LREE: 114). El grado de fraccionamiento es bajo y similar para las dos muestras (LREE/HREE: LS1: 8,21; LS2: 8,75).

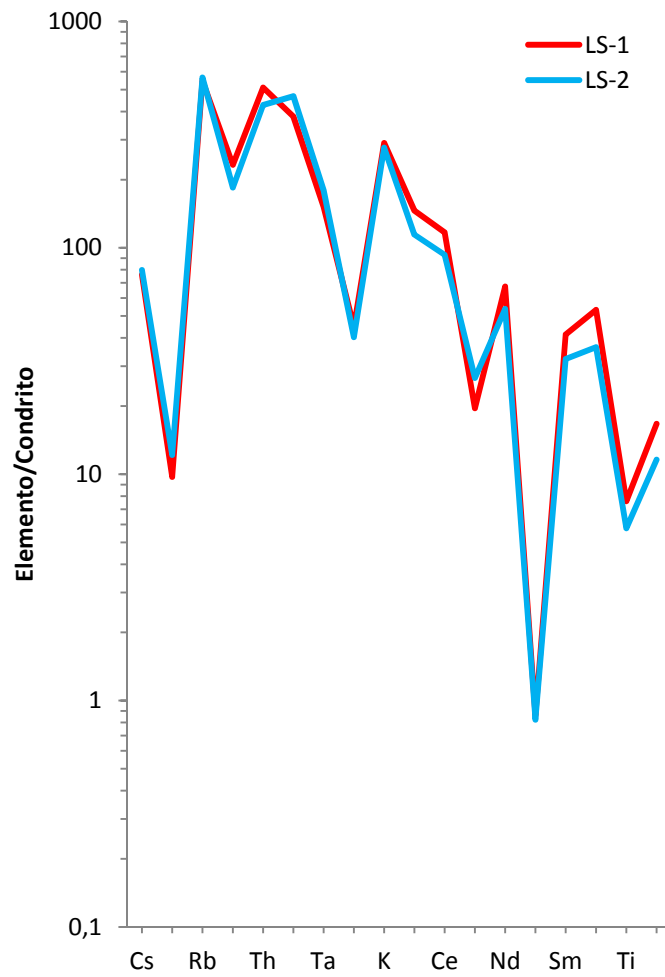


Figura 3.51. Diagrama de normalización al condrito. Sun y McDonough (1989). LS1: muestra de cantera de la facies más biotítica. LS2: muestra de cantera de la facies más leucocrática, de borde.

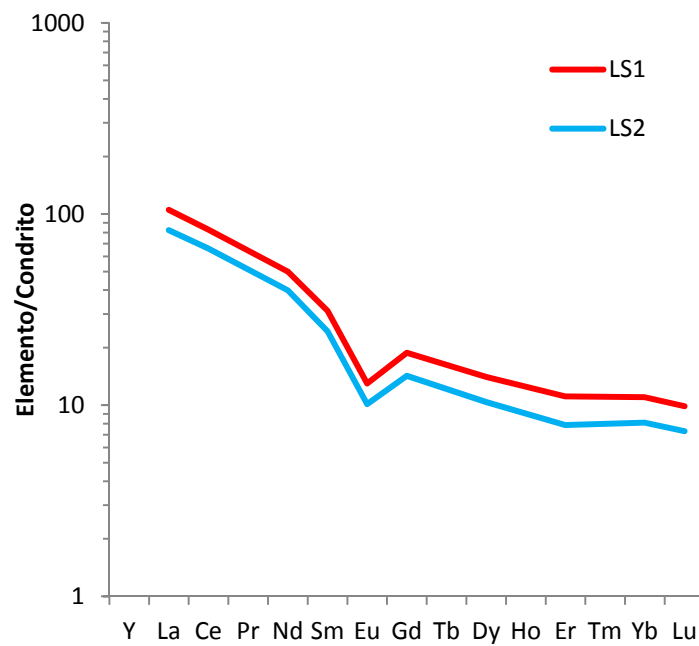


Figura 3.52. Diagrama de tierras raras de las rocas del plutón de Los Santos. Nakamura (1974)

3.4 CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA

En el estudio de caracterización de los tres materiales pétreos seleccionados y desde el punto de vista petrofísico, se han determinado las propiedades al agua indicadas en el apartado 2 de la presente memoria; estas son: porosidad total y libre, densidad real y aparente, coeficiente de absorción, coeficiente de absorción por capilaridad y coeficiente de Imbibición. Junto con estas, cabe destacar otras propiedades petrofísicas, como son el color y la velocidad de propagación de los ultrasonidos a través del material, que igualmente han sido determinadas. Todas ellas nos ofrecen una gran información sobre la naturaleza del material y están recogidas en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Propiedades petrofísicas de las tres rocas plutónicas (valores medios para distintos números de ensayos -n-)

| <i>Propiedades petrofísicas</i> | <i>Granito de Martinamor (n=3)</i> | <i>Vaugnerita del Calzadilla del Campo (n=3)</i> | <i>Granito de Los Santos (n=3)</i> |
|--|------------------------------------|--|------------------------------------|
| Porosidad total (%) | 0,78 | 1,51 | 1,65 |
| Porosidad libre (%) | 0,74 | 1,38 | 1,41 |
| Coeficiente de absorción (%) | 95,05 | 91,23 | 85,34 |
| Densidad real (g/cm ³) | 2,65 | 2,76 | 2,70 |
| Densidad aparente (g/cm ³) | 2,63 | 2,71 | 2,65 |
| Color (n=16) | L | 66,48 | 61,07 |
| | a | -0,18 | -0,51 |
| | b | 0,41 | 1,57 |
| Velocidad de Ultrasonidos (m/s) (n=16) | Vx | 3636,8 | 2844,7 |
| | Vy | 3653,6 | 2725,6 |
| | Vz | 3562,4 | 2582,1 |
| Coeficiente de absorción capilar (g/cm ² s ^{1/2}) | 0,0000731 | 0,0001987 | 0,0000161 |
| Coeficiente de imbibición (%) | 0,29 | 0,52 | 0,55 |

Las rocas de Martinamor presentan propiedades propias de rocas muy duras, con los índices de porosidad más bajos de las tres (tanto total, como libre) y muy bajos coeficientes de absorción capilar. De las tres variedades plutónicas estudiadas son las menos densas, lo cual concuerda con su mayor contenido en félsicos. También son las menos porosas (tanto porosidad libre, como total), las que mayor velocidad de propagación de ultrasonidos muestran, y las que menor coeficiente de absorción capilar y de imbibición tienen. Estos últimos parámetros nos indican la capacidad de absorber agua (el principal agente de alteración de las rocas), bien por capilaridad o

bien por inmersión. Los valores tan bajos confirman la idoneidad de esta roca como material constructivo, sobre todo para los zócalos, pues es donde más fácilmente se producen fenómenos de absorción capilar de agua y humedades, que conllevan la desintegración de la piedra.

Las rocas de Calzadilla de Campo son las más densas de las tres estudiadas (tanto en densidad real como en densidad aparente), lo cual es normal, debido a su alto contenido en minerales máficos. También son rocas con una tonalidad ligeramente verdosa, indicada por el valor bajo y negativo del parámetro de color a y oscuras, con los valores en el parámetro de color L más bajo de las estudiadas, lo cual concuerda y es consecuencia directa de la composición de la roca, que muestra un índice de color M' comprendido entre 21,6 (facies de borde) y 45,3 (facies leucocrática biotítico-anfibólica, Tabla 3.2). Presentan, igualmente, los valores más bajos en cuanto a velocidad de transmisión de ultrasonidos y bajos coeficientes de absorción capilar.

Las rocas de Los Santos presentan parámetros propios de rocas duras, con bajos índices de porosidad (tanto total, como libre) y también bajos coeficientes de absorción capilar e imbibición. Con respecto a los otros materiales plutónicos utilizados en Salamanca, se constata que los valores de porosidad total son superiores a los del leucogranito de Martinamor y a la vaugnerita de Calzadilla. Se constata también que el granito de Los Santos tiene valores relativamente altos de absorción por imbibición, y presenta los valores de absorción por capilaridad más bajos de los tres litotipos. Este último factor, unido al de su relativamente alto valor de porosidad, hace que la piedra utilizada en la parte baja de los edificios no esté exenta de los procesos de ascensión capilar del agua.

Del mismo modo, se han realizado estudios de la porosidad y distribución porosimétrica mediante ensayos de porosimetría de mercurio. Respecto al dominio de porosidad, todas las rocas se encuentran claramente en el dominio de la macroporosidad (mayor de $7,5 \mu\text{m}$ de diámetro de poro, apartado 2.4 de la presente memoria), como puede verse en los histogramas de distribución porosimétrica (Figura 3.53, Figura 3.54 y Figura 3.55).

En las muestras de leucogranito de Martinamor se obtienen valores de la porosidad total y la porosidad interparticular de 0,3629 % y 0,3545 %, respectivamente y un área superficial media de $1,006 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{g}$, siendo los valores más bajos de las tres rocas plutónicas testadas es este estudio. Los valores de porosidad total e interparticular más elevados corresponden a las muestras de vaugnerita (0,5434 % y 0,4537 %, respectivamente), así como el área superficial media más alta ($9,305 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{g}$), valor relativamente elevado para una roca plutónica y principalmente debido a la presencia de grandes placas de biotita. Las muestras de granito de Los Santos presentan valores intermedios de porosidad total y porosidad interparticular (0,397 %) y área superficial media ($2,66 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{g}$).

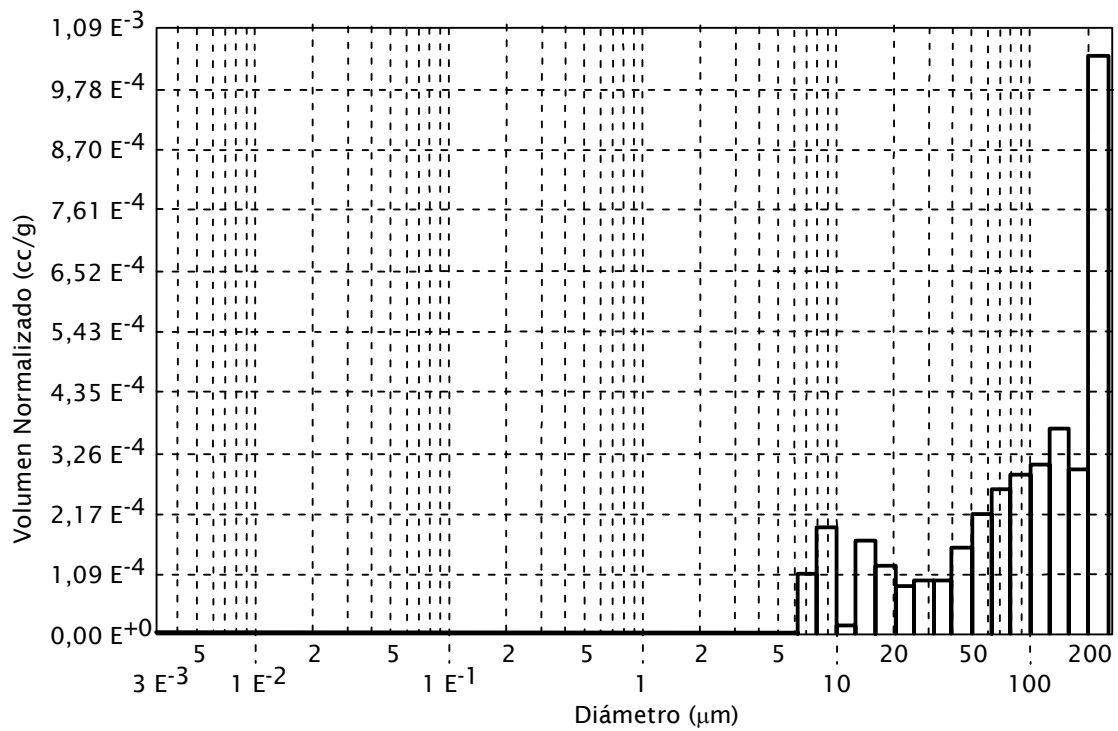


Figura 3.53. Histograma de distribución porosimétrica del leucogranito de Martinamor.

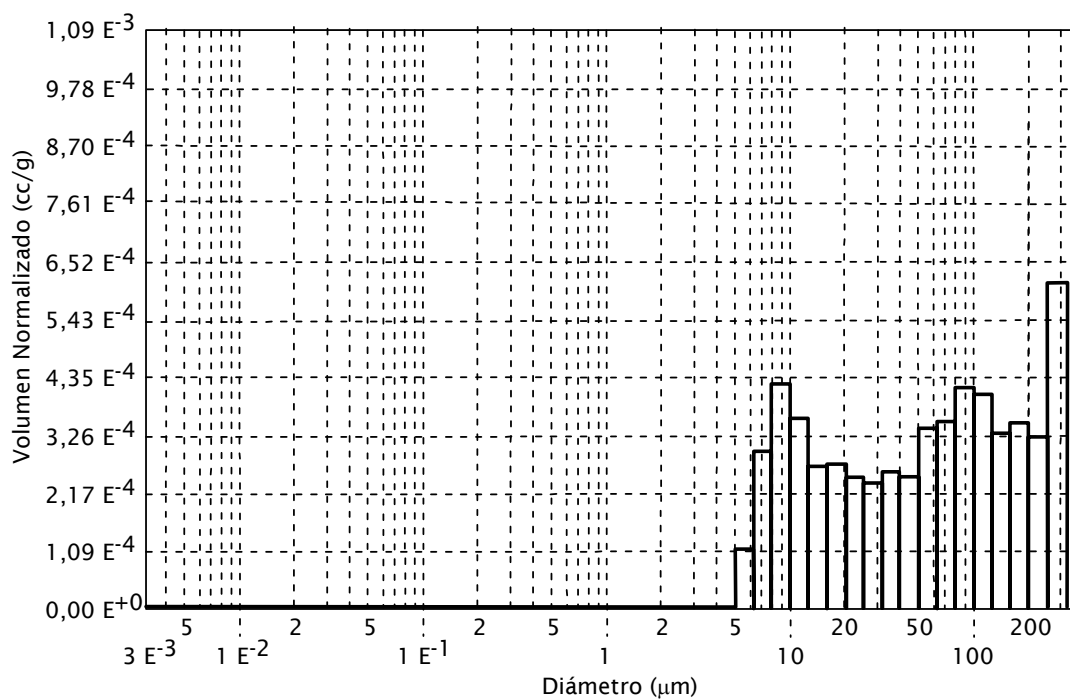


Figura 3.54. Histograma de distribución porosimétrica de la vaugnerita de Calzadilla.

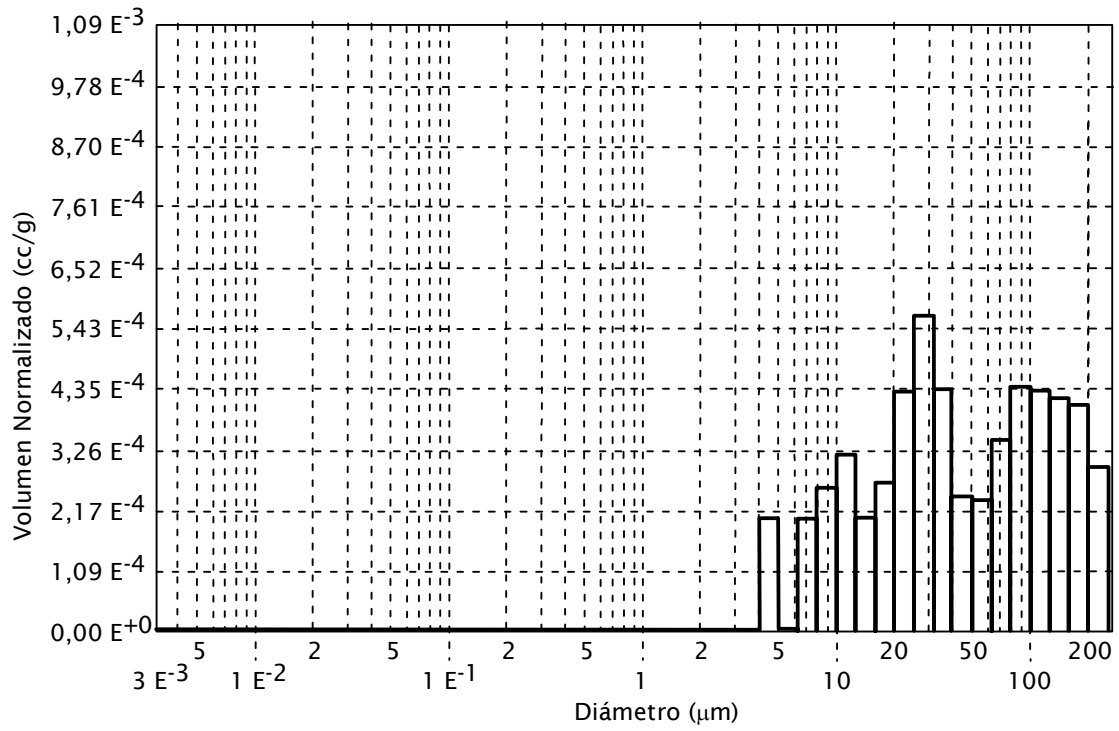


Figura 3.55. Histograma de distribución porosimétrica del granito de Los Santos.

4. IDENTIFICACIÓN DE LAS CANTERAS HISTÓRICAS

La identificación de las canteras originales constituye el segundo gran objetivo del presente trabajo y se lleva a cabo siguiendo varios métodos y técnicas, sin pretensión de aplicabilidad universal. La adecuación de las técnicas y su aplicabilidad depende de muchos factores; entre otros cabría citar: 1) la especificidad de la piedra; 2) las características geológicas de las canteras originales y de la formación geológica o cuerpo ígneo implicado, incluyendo su variabilidad composicional, estructural y textural; 3) la historia extractiva de la cantera; y 4) la información existente y el banco disponible de datos composicionales, tanto de las muestras en monumentos como en cantera.

La complejidad del tema y la implicación de tantos condicionantes obligan, pues, a establecer unas pautas que han de ser adaptadas estrictamente a las peculiaridades de cada caso. Con estas premisas, se presentan aquí una síntesis de métodos y técnicas de aplicación concreta a nuestro caso de estudio, cada uno de los cuales ha conducido a unos resultados y matizaciones parciales (sintetizados al final del capítulo) que han de ser vistos en un sentido de complementariedad, y no de exclusión.

4.1 MÉTODO HISTÓRICO: DOCUMENTACIÓN HISTÓRICA DE LAS CANTERAS

En los edificios de la ciudad de Salamanca se han utilizado principalmente y a lo largo del tiempo, cinco tipos de rocas. Dos de ellas son rocas sedimentarias:

- la Arenisca de Villamayor, conocida también como «Piedra Dorada», «Piedra de Villamayor» o «Piedra Franca», cuyos afloramientos se localizan en la margen derecha del río Tormes en los términos municipales de Salamanca y Villamayor de la Armuña
- la Arenisca (y conglomerado) de Salamanca, conocida también como «Piedra tosca», cuyas canteras se encontraban en el subsuelo de la ciudad de Salamanca y en los alrededores, también en localidades al sur de río Tormes (Arapiles, Calvarrasa, etc.) (Alonso Gavilán *et al.*, 2011)

Las otras tres rocas son las rocas plutónicas objeto de este estudio, Vaugnerita de Calzadilla, Leucogranito de Martinamor y Granito de Los Santos, que se extraían y se extraen (en el caso del granito de Los Santos) en canteras situadas a distancias de entre 20 y 50 km de la ciudad.

En la Figura 4.1 se resume la cartografía geológica y la localización de las canteras originales de las rocas plutónicas y algunas de las canteras de las rocas sedimentarias.

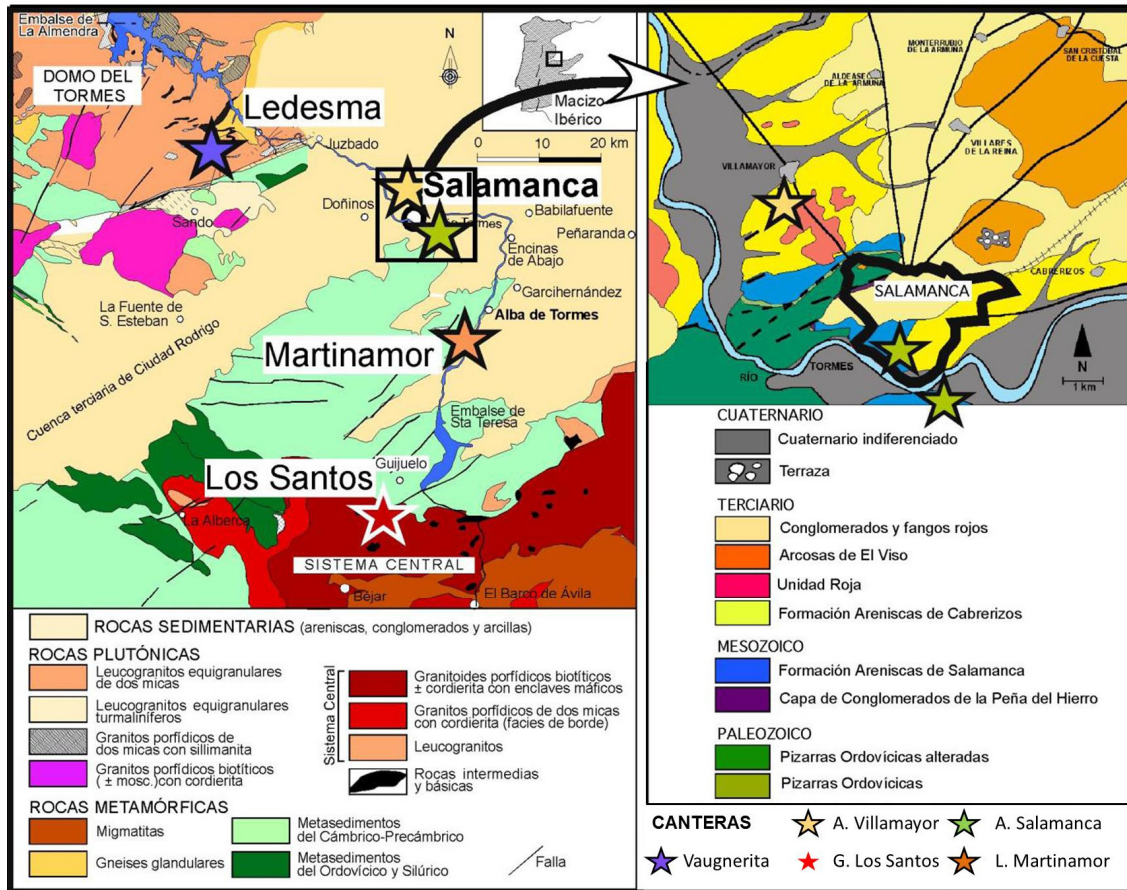


Figura 4.1. Mapa geológico del sur y oeste de la provincia de Salamanca (SIEMCALSA, 1997; López Moro y López Plaza, 2004), con la localización de las canteras de vaugnerita de Calzadilla, Leucogranito de Martinamor y Granito de Los Santos. Mapa geológico del entorno de la ciudad de Salamanca con la localización de las canteras de Arenisca de Villamayor (cerca de Villamayor de la Armuña) y Arenisca de Salamanca (en la propia ciudad y cerca de Calvarrasa de Arriba) (Suárez y Alonso Gavilán, 2001)

Muchos de los monumentos salmantinos de los siglos XVI a XIX contienen piedra diorítico-vaugnerítica, granitos porfídicos de Los Santos y leucogranitos con turmalina; sin embargo, las referencias sobre su procedencia geográfica son escasas y a veces imprecisas. A continuación resumiremos la información encontrada sobre las canteras de estas rocas plutónicas.

Las canteras de roca vaugnerítica más antiguas registradas corresponden a las de La Magdalena, localidad cercana a Béjar, en el Sistema Central, según la documentación del Archivo de la Universidad de Salamanca, en el año 1573, no

encontrando apenas otras referencias sobre estas, sugiriendo un uso puntual. La primera constancia inequívoca del uso de la piedra de Calzadilla del Campo aparece para la construcción del Colegio de San Pelayo en 1580 (López Plaza *et al.*, 2007a). A partir de aquí, se pueden encontrar referencias del uso de esta roca en distintas fechas (1618, 1726, 1750-1756) y en distintos edificios (Iglesia Clerecía, el desaparecido Colegio de Cuenca, la Plaza Mayor, el Colegio de Calatrava, el Convento de San Esteban, Puente Romano, Catedrales, etc.) (Rodríguez G. de Ceballos, 1985, 1991; Castro Santamaría y Rupérez Almajano, 1993; Rodríguez G. de Ceballos, 2003).

La utilización del leucogranito con turmalina de Martinamor en Salamanca, se prolonga hasta principios del siglo XX en los monumentos de Salamanca (López Plaza *et al.*, 2007b).

Una de las más antiguas referencias históricas sobre la utilización del granito de Martinamor es de 1532 (s. XVI) (Vaca Lorenzo *et al.*, 2005) sobre el enlosado del Puente Romano. Ya en el siglo XIX hay también documentación sobre el uso de esta piedra en la remodelación en el Palacio de la Salina (1881-1884) (Álvarez Villar, 1984). Almeida Cuesta (1999) encuentra documentos que evidencian su uso para el enlosado de la calle de la Rúa en 1880. El mismo autor recopila datos que proporcionan una idea aproximada sobre la producción anual (treinta y un metros cúbicos en 1901), y precisa que hacia los años treinta del pasado siglo dejaron de extraer esta piedra, quedando la explotación de las canteras restringida a construcciones rurales en el entorno.

Almeida Cuesta (1999) localiza las canteras históricas del leucogranito con turmalina de Martinamor en dos lugares diferentes: las «canteras del pueblo», localizadas al sur del núcleo urbano, y, las canteras del «tío Bernabé», localizadas hacia el oeste.

Tal como se ha indicado anteriormente, a comienzos del siglo XVI ya se estaba utilizando en Salamanca el granito porfídico de Los Santos (Castro Santamaría, 2002), en concreto, en las Escuelas Mayores (1512-1526) y Menores (1529-1530). Otros autores confirman su uso a lo largo del siglo XVI (Sendín Calabuig, 1977; Pinilla González, 1978; Casaseca Casaseca, 1988; Martínez Frías, 1990) y XVII (Rodríguez G. de Ceballos, 1985), en distintos colegios, claustros e incluso en la Catedral Nueva.

A diferencia de la vaugnerita, que dejó de utilizarse a finales del siglo XIX (López Plaza *et al.*, 2007a), y del granito turmalinífero de Martinamor, que terminó su utilización hacia los años treinta del siglo XX (Almeida Cuesta, 1999), las canteras del granito de Los Santos continúan activas en la actualidad (Jiménez de Francisco, 2000).

4.2 MÉTODO GEOLÓGICO-LITOLÓGICO

De forma general y tal como ya se ha señalado en el Capítulo 3 de la presente memoria, en todos los cuerpos plutónicos estudiados se reconocen una serie de facies o asociaciones de rocas. Si estas rocas han sido extraídas de forma conjunta es posible apreciar en los monumentos estudiados estos mismos materiales mezclados entre sí.

En el plutón de Calzadilla del Campo la facies de borde se presenta en forma de una estrecha banda a todo lo largo del borde en la mitad SE y terminaciones NE y SW, mientras que en la mitad N es discontinua, configurando las facies de grano grueso o muy grueso el resto del plutón, pudiendo constatarse una disposición en capas, desde las facies mesocráticas hacia el SE y las facies leucocráticas hacia el N y NW, con una disminución progresiva del anfíbol en el mismo sentido. Las canteras se localizan mayoritariamente en la parte S del plutón, aunque hay evidencias de procesos extractivos en toda la zona. De aquí se puede inferir que se ha extraído material de todas las facies concentradas al sur del plutón al mismo tiempo. Al estudiar detalladamente los monumentos piloto es posible observar bloques de las distintas facies empleados indistintamente, como es el caso de la Portada principal de la Catedral Vieja. La presencia en los monumentos de las mismas facies petrográficas descritas en el plutón de Calzadilla, y no en otros cuerpos como los de Sayago, apunta a la identificación positiva del plutón de Calzadilla como origen del material vaugnerítico.

El principal plutón de Martinamor es un sill alargado y discontinuo en dirección E-W, donde las tres facies graníticas diferenciadas se disponen en láminas sucesivas de muro a techo, definiéndose un cuerpo estratiforme en capas. El área de canteras lo constituye todo el afloramiento y en él hay signos de extracción en las dos facies turmaliníferas (leucogranito con turmalina de grano fino y de grano grueso). Esto nos puede indicar la extracción de las dos facies indistintamente o a la vez, lo cual se ve reflejado en los monumentos al poder encontrarlas juntas, como ocurre, por ejemplo en las losas del suelo de la Plaza Mayor.

El granito de Los Santos se extrae de las canteras situadas al sur de la localidad del mismo nombre, en la parte más septentrional del área batolítica de Los Santos-Valdelacasa. En el área plutónica se han diferenciado dos grupos litológicos a escala cartográfica: 1) un granito porfídico cordierítico, en la parte septentrional, y 2) un granito porfídico biotítico, en el sector meridional. Al estar localizadas las canteras más antiguas en la parte norte del batolito (justo en el borde sur del pueblo), la piedra extraída corresponde a la facies más cordierítica. Esto concuerda con el hecho que en monumentos como el Puente Romano se conserve en la fábrica original una facies granítica que es idéntica a la facies de borde del área plutónica estudiada.

4.3 MÉTODO GEOLÓGICO-GEOQUÍMICO: EMPLEO DE LOS ELEMENTOS MAYORES

A partir de los datos obtenidos en los análisis químicos de elementos mayores de las muestras procedentes tanto de las canteras (Calzadilla del Campo, Los Santos y Martinamor), como de los monumentos piloto seleccionados (Plaza Mayor, Puente Romano y Conjunto Catedralicio), se puede estudiar por comparación o mediante análisis estadísticos más complejos, la similitud entre muestras y así identificar la pertenencia a un grupo o identificación de unas muestras (de monumento) con otras (de cantera). Este estudio se ha realizado de dos formas: primero, mediante diagramas químico-mineralógicos de clasificación, como es el diagrama Q'-ANOR, y después, aplicando un estudio estadístico mediante un método de inercia basado en una representación HJ-Biplot.

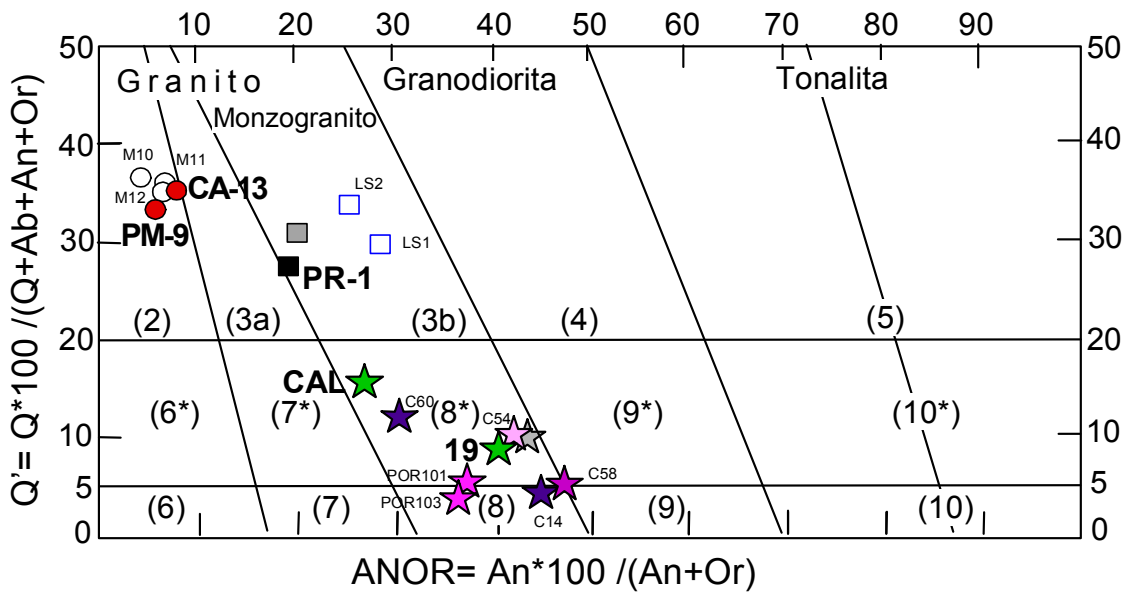
4.3.1 APLICACIÓN DEL DIAGRAMA DE CLASIFICACIÓN Q'-ANOR.

En la Tabla 4.1 se recogen los datos de los análisis químicos de elementos mayores de las muestras procedentes de los monumentos piloto. A partir de estos datos se han calculado los minerales normativos mediante la norma CIPW, así como los parámetros adecuados, que nos posibilitan el empleo del diagrama Q'-ANOR' de Debon y Le Fort (1988) (Figura 4.2) tanto para la clasificación misma de las muestras de los monumentos, como para su comparación con las muestras tomadas en las canteras.

Las muestras de vaugnerita de los monumentos estudiadas se proyectan en el diagrama Q'ANOR en el campo de las cuarzomonzonitas, igual que la media de las muestras del plutón de Calzadilla del Campo. La muestra CAL tomada en la Portada Principal de la Catedral Vieja corresponde a la facies de grano fino, y de hecho, se proyecta en el diagrama Q'-ANOR cerca de una de las muestras de cantera de la facies de borde, la muestra C-60. La muestra 19 corresponde a simple vista con una vaugnerita leucocrática y se tomó en uno de los arcos reconstruidos tras la riada de San Policarpo en el puente romano. Se proyecta muy cerca de las vaugneritas de facies leucocrática biotítica±anfíbol y de la media de las muestras del plutón.

Tabla 4.1. Contenido en elementos mayores y parámetros geoquímicos de las muestras representativas de las tres variedades pétreas muestreadas en los monumentos piloto. Se incluyen también la media de granitos afines del Batolito del Sistema central [*: Ugidos y Recio (1993)] y la media de muestras del plutón de Calzadilla del Campo (**: datos no publicados, que incluyen términos menos diferenciados y no considerados en este trabajo). Entre paréntesis, desviación estándar.

| <i>Origen</i> | <i>Martinamor</i> | | <i>Los Santos</i> | | <i>Calzadilla</i> | | <i>Los Santos</i> | <i>Calzadilla</i> |
|--------------------------------------|-------------------|-------------|-------------------|---------------|-------------------|--|-------------------|-------------------|
| <i>Muestra</i> | CA-13 | PM-9 | PR-1 | 19 | CAL | | Media | Media |
| <i>Edificio</i> | Catedral | Plaza Mayor | Puente Romano | Puente Romano | Catedral | | (n= 8) (*) | (n=16) (**) |
| <i>Elementos Mayores (% en peso)</i> | | | | | | | | |
| <i>SiO₂</i> | 74,09 | 71,65 | 67,03 | 57,50 | 62,21 | | 68,13 (1,17) | 58,47 (1,94) |
| <i>TiO₂</i> | 0,07 | 0,066 | 0,45 | 0,80 | 0,86 | | 0,49 (0,06) | 0,82 (0,17) |
| <i>Al₂O₃</i> | 14,87 | 15,11 | 15,38 | 16,35 | 16,77 | | 15,44 (0,27) | 17,31 (0,82) |
| <i>Fe₂O₃</i> | 0,76 | 0,74 | 2,96 | 5,70 | 4,53 | | 3,52 (0,45) | 5,43 (0,54) |
| <i>MnO</i> | 0,02 | 0,019 | 0,05 | 0,08 | 0,06 | | 0,05 (0,01) | 0,07 (0,01) |
| <i>MgO</i> | 0,19 | 0,21 | 0,95 | 5,17 | 1,79 | | 1,02 (0,09) | 3,97 (1,42) |
| <i>CaO</i> | 0,78 | 0,76 | 1,82 | 4,67 | 3,25 | | 1,79 (0,15) | 4,29 (0,79) |
| <i>Na₂O</i> | 3,78 | 3,8 | 3,15 | 3,25 | 3,63 | | 3,30 (0,08) | 3,50 (0,37) |
| <i>K₂O</i> | 4,54 | 4,69 | 5,13 | 3,96 | 5,15 | | 4,43 (0,19) | 4,09 (0,33) |
| <i>P₂O₅</i> | 0,24 | 0,22 | 0,27 | 0,43 | 0,74 | | 0,35 (0,04) | 0,35 (0,14) |
| <i>H₂O</i> | 1,22 | 1,37 | 1,42 | 1,34 | 1,72 | | 0,50 (0,30) | 1,46 (0,44) |
| <i>Total</i> | 100,6 | 98,63 | 98,6 | 99,3 | 100,7 | | | |
| <i>Parámetros</i> | | | | | | | | |
| <i>Q'</i> | 35,4 | 33,16 | 27,6 | 9,9 | 16,0 | | 31,3 | 10,3 |
| <i>ANOR</i> | 7,9 | 5,78 | 19,3 | 41,1 | 27,1 | | 20,1 | 44,0 |



Campos implicados:
 (2): granitos de feldespato alcalino
 (3b): monzogranitos
 (8*): cuarzomonzonitas
 (9*): cuarzomonzodioritas

Martinamor:
 ○ Muestras en canteras
 ● Muestras en monumentos

Los Santos:
 □ Muestras en canteras
 ■ Media de los granitos cordieríticos de borde, Ugidos y Recio (1993)
 ■ Muestra en monumento

Vaugnerita:
 Muestras en canteras
 ☆ Facies leucocrática biotítica ± anfíbol
 ☆ Facies leucocrática biotítico-anfibólica
 ☆ Facies mesocrática biotítica-anfibólica
 ☆ Facies de borde
 ☆ Media del plutón de Calzadilla (n=16)
 ☆ Muestras en monumento

Figura 4.2. Representación de las muestras de cantera y de monumento en el diagrama Q'-ANOR de Debon y Le Fort (1988).

De aquí, se puede concluir que no sólo la textura y la apariencia de la roca nos pueden indicar su procedencia, sino que los elementos mayores agrupan, a priori, muestras de facies similares de cantera y monumento.

En el caso del leucogranito turmalinífero de Martinamor, las muestras de monumento se proyectan en el diagrama Q'-ANOR dentro del campo de los granitos de feldespato alcalino, al igual que todas las muestras de cantera de Martinamor. En concreto la muestra de CA-13 tomada en la Catedral Nueva e identificada de *visu* como de grano grueso, se proyecta muy próxima a la muestra M10 que corresponde a la facies de grano grueso del leucogranito turmalinífero. Es cierto que la muestra CA-13 también se superpone con la muestra de cantera M12, que es el granito de dos micas, pero su diferencia petrográfica permite excluir la afinidad entre ellas. La muestra PM-9

de la Plaza Mayor, también de grano grueso, sin embargo, se proyecta algo más alejada, lo cual puede deberse al menor contenido en cuarzo.

En virtud del contenido en sílice en roca total las muestras de granito de Los Santos son de naturaleza ácida, con un rango muy constante entre el 67,03 % de la muestra del puente Romano (Tabla 4.1) y el 68,13 % de la media de las muestras de batolito del Sistema Central. El diagrama de clasificación Q'-ANOR' (Figura 4.2) indica que todas las muestras de los granitos de Los Santos, tanto en canteras como en monumentos, se proyectan en el campo 3b de los monzogranitos. La muestra del Puente Romano analizada en este trabajo (PR-1) aparece muy cercana al campo de los sienogranitos. Esto se debe a un contenido elevado en potasio y bajo en sílice, en consonancia con una mayor proporción de megacristales de feldespato potásico con respecto al cuarzo y plagioclasa, lo que se confirma, al consultar los datos de elementos traza (Tabla 4.4), por el elevado contenido en Ba, así como por el ligeramente mayor contenido en Sr para un menor contenido en Ca.

4.3.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE INERCIA BASADO EN UNA REPRESENTACIÓN HJ-BIPLLOT.

A partir de los resultados de análisis químicos de elementos mayores de las muestras procedentes de las canteras y de los tres monumentos piloto estudiados en Salamanca (Tabla 4.2 y Tabla 4.3), se ha construido una matriz de datos para tratarla estadísticamente aplicando el Método de Inercia (García-Talegón *et al.*, 1999; Iñigo *et al.*, 2005) basado en una representación HJ-Biplot (Vicente-Tavera, 1992), descrita anteriormente en el apartado 9.3 del capítulo 2, Materiales y métodos, de la presente memoria. Esta técnica se ha empleado con el fin de encontrar clústeres (agrupaciones de elementos, en este caso muestras) con características similares, que pudiesen aportar información adicional acerca del origen de las muestras de rocas plutónicas tomadas en los distintos monumentos.

Tabla 4.2. Elementos mayores (% peso) de las muestras de monumentos empleados para la realización del HJ-Biplot

| Cluster | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | M.v. | TOTAL |
|---------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|------|--------|
| PR1 | 65,68 | 16,72 | 3,27 | 0,07 | 1,23 | 2,14 | 3,24 | 5,14 | 0,42 | 0,29 | 1,75 | 99,95 |
| PR2 | 67,20 | 15,54 | 3,29 | 0,07 | 1,06 | 2,35 | 3,44 | 4,07 | 0,48 | 0,30 | 1,53 | 99,33 |
| PR3 | 67,74 | 14,84 | 3,01 | 0,07 | 1,13 | 2,75 | 3,65 | 3,94 | 0,45 | 0,17 | 2,34 | 100,09 |
| PR4 | 68,48 | 15,77 | 2,91 | 0,06 | 0,96 | 2,13 | 3,63 | 4,57 | 0,52 | 0,25 | 0,61 | 99,89 |
| PR5 | 66,65 | 16,46 | 3,10 | 0,06 | 1,00 | 2,37 | 3,90 | 4,35 | 0,54 | 0,21 | 1,21 | 99,85 |
| PR6 | 67,98 | 15,13 | 3,27 | 0,06 | 1,07 | 2,13 | 3,44 | 4,20 | 0,59 | 0,24 | 1,32 | 99,43 |
| PR7 | 66,81 | 16,39 | 3,33 | 0,07 | 1,16 | 2,32 | 3,86 | 4,22 | 0,59 | 0,18 | 1,51 | 100,44 |
| PR8 | 68,39 | 15,89 | 2,89 | 0,07 | 0,95 | 2,01 | 3,72 | 3,79 | 0,55 | 0,26 | 1,04 | 99,56 |
| PR9 | 67,21 | 16,33 | 3,09 | 0,06 | 1,06 | 2,05 | 3,39 | 5,29 | 0,56 | 0,20 | 0,38 | 99,62 |
| PR10 | 70,88 | 15,01 | 0,85 | 0,03 | 0,24 | 1,68 | 3,97 | 4,28 | 0,08 | 0,24 | 2,19 | 99,45 |
| PR11 | 58,38 | 16,77 | 5,55 | 0,08 | 4,43 | 4,13 | 3,64 | 3,67 | 0,81 | 0,43 | 2,02 | 99,91 |
| PR12 | 58,31 | 15,76 | 5,60 | 0,09 | 5,31 | 4,42 | 3,46 | 3,71 | 0,64 | 0,32 | 2,43 | 100,05 |
| PR13 | 63,10 | 16,98 | 4,16 | 0,06 | 1,91 | 2,75 | 3,91 | 5,21 | 0,67 | 0,63 | 0,89 | 100,27 |
| PR14 | 57,26 | 17,62 | 5,10 | 0,08 | 4,58 | 4,91 | 3,66 | 4,24 | 0,82 | 0,56 | 0,78 | 99,61 |
| PR15 | 57,5 | 16,35 | 5,7 | 0,079 | 5,17 | 4,67 | 3,25 | 3,96 | 0,802 | 0,43 | 1,34 | 99,25 |
| PR16 | 67,03 | 15,38 | 2,96 | 0,051 | 0,95 | 1,82 | 3,15 | 5,13 | 0,446 | 0,27 | 1,42 | 98,61 |
| PM1 | 73,08 | 13,58 | 1,68 | 0,04 | 0,41 | 0,99 | 3,26 | 4,49 | 0,22 | 0,23 | 1,82 | 99,80 |
| PM2 | 73,79 | 13,12 | 1,71 | 0,04 | 0,42 | 0,93 | 3,08 | 4,59 | 0,24 | 0,26 | 1,64 | 99,82 |
| PM3 | 74,69 | 12,94 | 2,05 | 0,04 | 0,49 | 0,97 | 2,85 | 4,48 | 0,28 | 0,26 | 1,08 | 100,13 |
| PM4 | 68,33 | 14,87 | 3,65 | 0,05 | 1,21 | 2,66 | 3,21 | 3,99 | 0,58 | 0,28 | 0,83 | 99,66 |
| PM5 | 74,08 | 13,46 | 0,59 | 0,02 | 0,27 | 1,09 | 3,55 | 4,29 | 0,05 | 0,30 | 2,44 | 100,14 |
| PM6 | 72,38 | 13,39 | 0,65 | 0,02 | 0,21 | 1,15 | 3,45 | 4,21 | 0,05 | 0,26 | 4,09 | 99,86 |
| PM7 | 74,48 | 13,70 | 0,70 | 0,02 | 0,17 | 0,80 | 3,67 | 4,11 | 0,06 | 0,21 | 2,11 | 100,03 |
| PM8 | 74,75 | 13,97 | 0,66 | 0,02 | 0,14 | 0,76 | 3,63 | 4,06 | 0,05 | 0,20 | 1,78 | 100,02 |
| PM9 | 55,42 | 15,63 | 5,82 | 0,17 | 3,77 | 4,15 | 3,27 | 4,28 | 0,86 | 2,02 | 4,22 | 99,61 |
| PM10 | 59,33 | 16,75 | 5,02 | 0,08 | 2,93 | 4,23 | 3,75 | 4,31 | 0,74 | 0,38 | 1,92 | 99,44 |
| PM11 | 60,61 | 16,96 | 4,76 | 0,06 | 3,29 | 3,62 | 3,89 | 3,68 | 0,78 | 0,44 | 1,54 | 99,63 |
| PM12 | 56,92 | 16,08 | 5,86 | 0,08 | 5,74 | 5,23 | 3,29 | 3,96 | 0,77 | 0,20 | 2,04 | 100,17 |
| PM13 | 59,57 | 17,08 | 5,19 | 0,07 | 2,29 | 3,78 | 3,90 | 4,42 | 0,86 | 0,53 | 2,13 | 99,82 |
| PM14 | 61,42 | 16,80 | 4,61 | 0,06 | 2,07 | 3,18 | 3,62 | 5,06 | 0,79 | 0,49 | 1,74 | 99,84 |
| PM15 | 61,49 | 16,87 | 4,04 | 0,06 | 2,00 | 3,11 | 3,35 | 5,93 | 0,77 | 0,40 | 1,93 | 99,95 |
| PM16 | 71,65 | 15,11 | 0,74 | 0,019 | 0,21 | 0,76 | 3,8 | 4,69 | 0,066 | 0,22 | 1,37 | 98,64 |
| CA1 | 68,47 | 15,79 | 1,53 | 0,04 | 0,41 | 1,75 | 3,70 | 4,98 | 0,21 | 0,36 | 2,06 | 99,30 |
| CA2 | 72,46 | 14,67 | 0,80 | 0,06 | 0,35 | 1,47 | 3,58 | 4,26 | 0,08 | 0,44 | 1,92 | 100,09 |
| CA3 | 73,72 | 14,50 | 0,67 | 0,03 | 0,24 | 0,81 | 3,82 | 4,30 | 0,06 | 0,23 | 1,53 | 99,91 |
| CA4 | 71,68 | 15,03 | 0,70 | 0,02 | 0,27 | 0,91 | 3,98 | 4,52 | 0,07 | 0,22 | 2,06 | 99,46 |
| CA5 | 73,10 | 14,30 | 0,74 | 0,03 | 0,31 | 1,10 | 3,92 | 3,90 | 0,07 | 0,29 | 2,00 | 99,76 |
| CA6 | 73,77 | 13,74 | 0,70 | 0,03 | 0,17 | 0,78 | 3,61 | 3,76 | 0,04 | 0,37 | 2,76 | 99,73 |
| CA7 | 73,53 | 14,03 | 0,65 | 0,02 | 0,20 | 0,58 | 3,56 | 3,88 | 0,05 | 0,18 | 2,74 | 99,42 |
| CA8 | 74,17 | 14,59 | 0,64 | 0,02 | 0,16 | 0,78 | 3,92 | 4,16 | 0,06 | 0,21 | 1,36 | 100,07 |
| CA9 | 57,22 | 16,28 | 5,83 | 0,08 | 5,03 | 4,30 | 3,42 | 4,19 | 0,74 | 0,63 | 1,81 | 99,53 |
| CA10 | 59,64 | 17,64 | 5,04 | 0,07 | 2,31 | 3,55 | 4,07 | 4,87 | 0,99 | 0,77 | 1,34 | 100,29 |
| CA11 | 60,50 | 16,45 | 4,06 | 0,07 | 2,41 | 4,55 | 3,77 | 4,48 | 0,68 | 0,55 | 2,23 | 99,75 |
| CA12 | 59,06 | 17,16 | 5,02 | 0,09 | 2,40 | 4,24 | 3,98 | 3,84 | 0,80 | 1,55 | 2,00 | 100,14 |
| CA13 | 61,24 | 15,46 | 4,39 | 0,07 | 2,37 | 4,18 | 3,48 | 3,66 | 0,70 | 1,66 | 2,02 | 99,23 |
| CA14 | 58,60 | 17,73 | 4,68 | 0,07 | 2,16 | 4,04 | 3,86 | 4,95 | 0,84 | 0,57 | 2,08 | 99,58 |
| CA15 | 74,09 | 14,87 | 0,76 | 0,022 | 0,19 | 0,78 | 3,78 | 4,54 | 0,068 | 0,24 | 1,22 | 100,56 |

Tabla 4.3. Elementos mayores (% peso) de las muestras de canteras empleados para la realización del HJ-Biplot

| Cluster | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | M.v. | TOTAL |
|---------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|-------|--------|
| SAN1 | 67,32 | 15,31 | 3,51 | 0,06 | 1,18 | 1,90 | 3,55 | 5,57 | 0,66 | 0,23 | 1,18 | 100,47 |
| SAN2 | 67,91 | 15,64 | 3,14 | 0,06 | 1,15 | 2,39 | 3,20 | 4,77 | 0,58 | 0,31 | 0,41 | 99,56 |
| SAN3 | 69,67 | 13,25 | 2,68 | 0,06 | 1,00 | 4,57 | 3,21 | 3,61 | 0,48 | 0,19 | 1,08 | 99,80 |
| SAN4 | 66,86 | 14,69 | 3,98 | 0,07 | 1,33 | 3,88 | 3,15 | 4,36 | 0,71 | 0,16 | 0,65 | 99,84 |
| MAR1 | 74,01 | 14,91 | 0,74 | 0,03 | 0,16 | 0,78 | 4,17 | 4,47 | 0,07 | 0,20 | 0,43 | 99,97 |
| MAR2 | 79,72 | 10,00 | 0,65 | 0,01 | 0,08 | 0,19 | 3,94 | 3,77 | 0,07 | 0,19 | 1,14 | 99,41 |
| MAR3 | 76,67 | 12,24 | 0,76 | 0,02 | 0,19 | 0,20 | 3,53 | 3,95 | 0,07 | 0,20 | 1,45 | 99,19 |
| MAR4 | 78,94 | 10,54 | 0,53 | 0,02 | 0,10 | 0,19 | 3,72 | 3,97 | 0,06 | 0,25 | 1,24 | 99,19 |
| CAL1 | 58,47 | 16,66 | 6,63 | 0,09 | 4,02 | 3,80 | 3,51 | 4,43 | 1,09 | 0,43 | 1,30 | 100,43 |
| CAL2 | 55,90 | 15,80 | 6,09 | 0,08 | 6,80 | 4,96 | 2,69 | 3,74 | 0,60 | 0,22 | 2,76 | 99,64 |
| CAL3 | 59,99 | 16,43 | 5,34 | 0,06 | 4,25 | 4,18 | 3,36 | 4,08 | 0,71 | 0,26 | 1,82 | 100,49 |
| CAL4 | 60,67 | 17,06 | 4,92 | 0,06 | 2,66 | 3,34 | 3,70 | 4,70 | 0,87 | 0,56 | 1,74 | 100,28 |
| CAL5 | 56,19 | 17,78 | 6,12 | 0,083 | 4,89 | 4,89 | 3,58 | 4,16 | 0,848 | 0,31 | 1,512 | 100,36 |
| CAL6 | 58,24 | 17,70 | 5,21 | 0,07 | 3,54 | 3,96 | 3,96 | 4,54 | 1,33 | 0,54 | 1,11 | 100,20 |
| CAL7 | 58,52 | 17,22 | 5,56 | 0,07 | 3,85 | 3,86 | 3,78 | 4,51 | 0,83 | 0,38 | 1,83 | 100,41 |
| CAL8 | 58,24 | 17,70 | 5,22 | 0,07 | 3,54 | 3,96 | 3,96 | 4,54 | 1,30 | 0,54 | 1,11 | 100,18 |
| CAL9 | 58,91 | 17,26 | 5,31 | 0,07 | 3,82 | 3,81 | 3,68 | 4,74 | 1,10 | 0,44 | 1,19 | 100,33 |
| SAY1 | 55,45 | 16,45 | 6,58 | 0,10 | 5,54 | 6,47 | 2,63 | 3,94 | 0,92 | 0,64 | 0,57 | 99,29 |
| SAY2 | 57,73 | 16,97 | 6,01 | 0,08 | 5,02 | 5,68 | 3,18 | 3,69 | 0,93 | 0,41 | 0,52 | 100,22 |
| SAY3 | 52,53 | 17,42 | 6,26 | 0,10 | 6,56 | 7,20 | 3,14 | 3,79 | 1,16 | 0,49 | 1,16 | 99,81 |

La matriz de datos analizada consta de 67 muestras y 11 variables. Las muestras corresponden a:

- Muestras de cantera:
 - o doce de vaugneritas, de las cuales y para contrastar distintos tipos regionales de vaugneritas por criterios de procedencia, se han incluido nueve muestras de Calzadilla del Campo (CAL 1-9) y tres del batolito de Sayago (SAY 1-3),
 - o cuatro del granito de Los Santos (SAN 1-4), y
 - o cuatro del granito de Martinamor (MAR 1-4)
- Muestras en los monumentos, supuestamente relacionables con los tipos de rocas previamente establecidos:
 - o dieciséis del Puente Romano (PR 1-16)
 - o dieciséis de la Plaza Mayor (PM 1-16)
 - o quince de las Catedrales (CA 1-15)

Las once variables de la matriz son los diez elementos mayores analizados en forma de porcentaje de óxidos (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂,

P₂O₅) y los contenidos en materia volátil (m.v.) obtenidos en los mismos análisis (Tabla 4.2 y Tabla 4.3)

La aplicación de este método retiene seis ejes que absorben el 92,29 % de Inercia Total. También se obtiene una clasificación ascendente jerárquica (dendrograma) y representaciones espaciales en los diferentes planos factoriales de la representación HJ-Biplot, los cuales nos permiten interpretar las distintas agrupaciones de muestras en función de las variables responsables de dichas agrupaciones, teniendo en cuenta las calidades de representación de las variables en cada uno de los planos.

En el dendrograma (Figura 4.3) las muestras aparecen relacionadas en base a una distancia o nivel de agregación proporcional, es decir, en base a una aproximación a características geoquímicas similares. Cuanto menor es la distancia entre muestras, mayor similitud existe entre ellas y viceversa. Para ver mejor los datos, se han hecho ampliaciones del dendrograma, cuando se ha considerado necesario. En él se detectan cuatro agrupaciones o clústeres, cuyas características específicas se detallan a continuación.

Clúster 1.

Agrupar veinte muestras, de las cuales dos son de las canteras de Martinamor (MAR 1 y MAR 3), y dieciocho son de los distintos monumentos piloto. De estas dieciocho, catorce son muestras de granito de Martinamor y cuatro son de granito de Los Santos (PM 1-3 y CA1). Está subdividido en dos subclusters. El nivel de agregación más alto es de 5,9 (Figura 4.4).

La mejor representación de las muestras de este clúster, en los planos factoriales, está en la proyección de los ejes 1-2 (Figura 4.5). Para apreciarlo más claramente, se ha ampliado la zona de proyección del clúster 1 en la Figura 4.6.

Este clúster está definido por un alto contenido en la variable sílice (SiO₂), como indica la proximidad del grupo con la proyección de esta variable (Figura 4.6), unido a los bajos contenidos en óxido de magnesio (MgO), manganeso (MnO), calcio (CaO), hierro (Fe₂O₃) y titanio (TiO₂), así como relativamente bajo en óxido de aluminio (Al₂O₃). Agrupa todas las muestras de Martinamor presentes en los monumentos piloto y las identifica positivamente con dos de las muestras tomadas en la cantera de Martinamor.

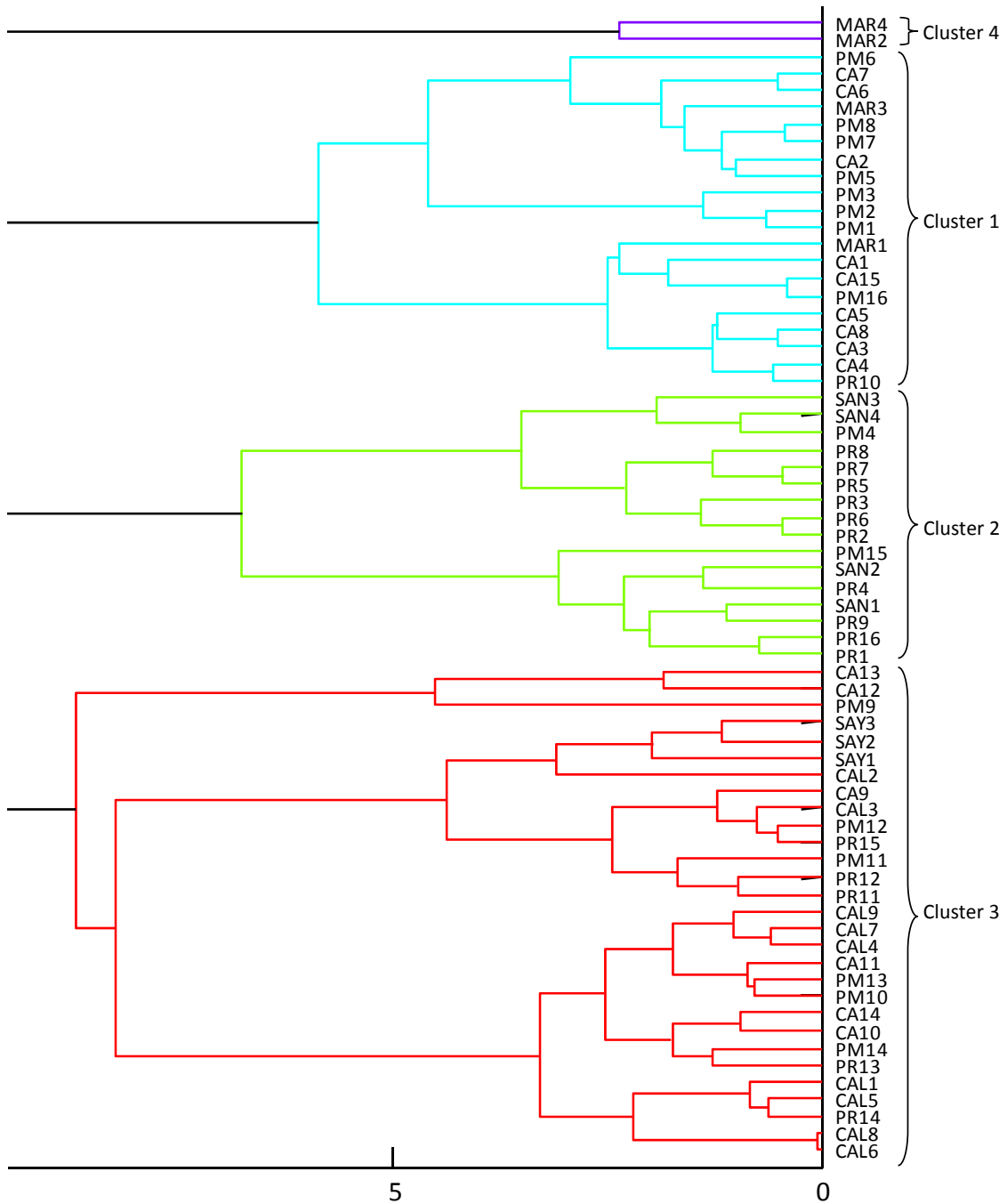


Figura 4.3. Dendrograma: Clasificación ascendente jerárquica y niveles de agregación de los distintos elementos

Según el dendrograma, el clúster 1 se puede separar en dos subclústers (Figura 4.4), al tener el subclúster 2 un contenido ligeramente superior en aluminio, aunque composicionalmente son muy similares y carece de significado litológico como se explica más adelante.

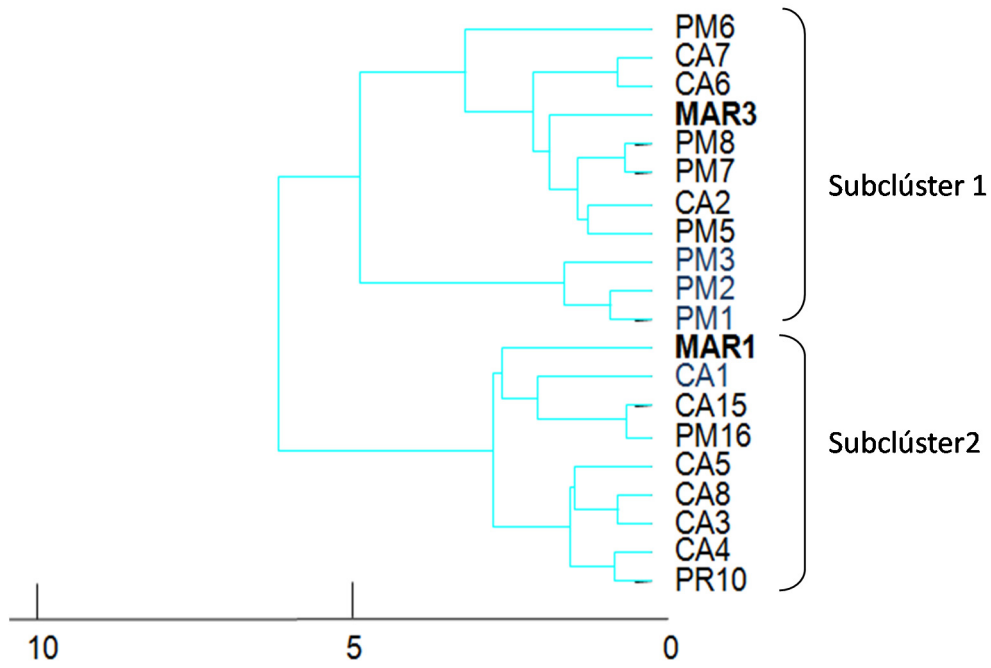


Figura 4.4. Dendrograma de la Figura 4.3 ampliado. Clúster 1, integrado por muestras de Martinamor y de Los Santos.

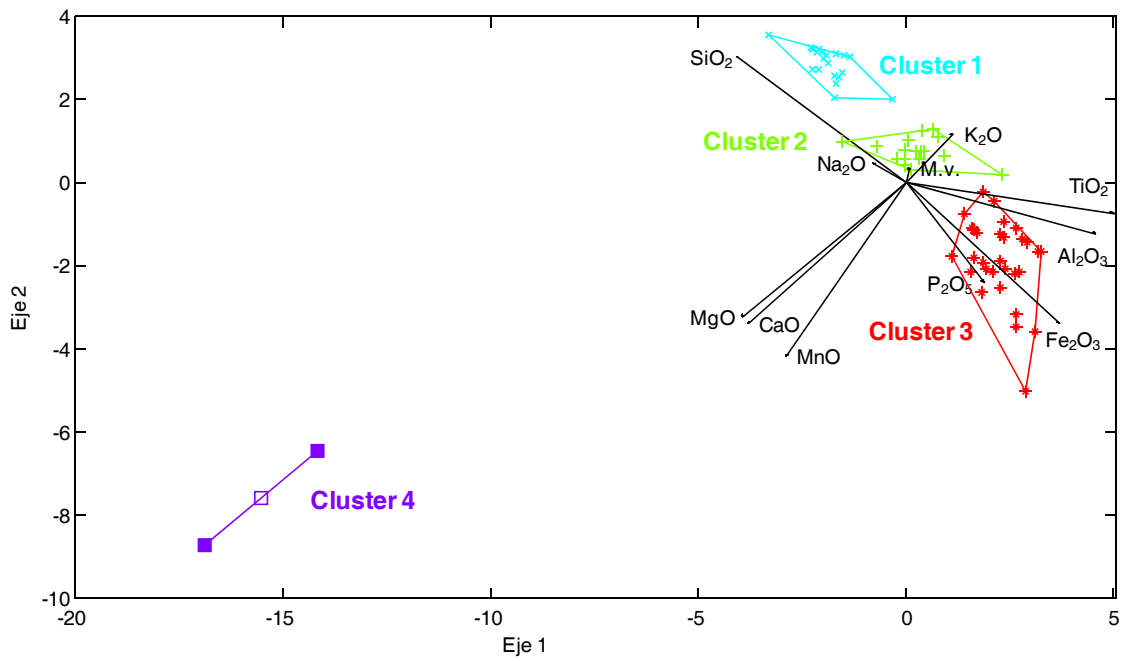


Figura 4.5. Plano 1-2 del HJ-Biplot con la representación de los cuatro clústeres.

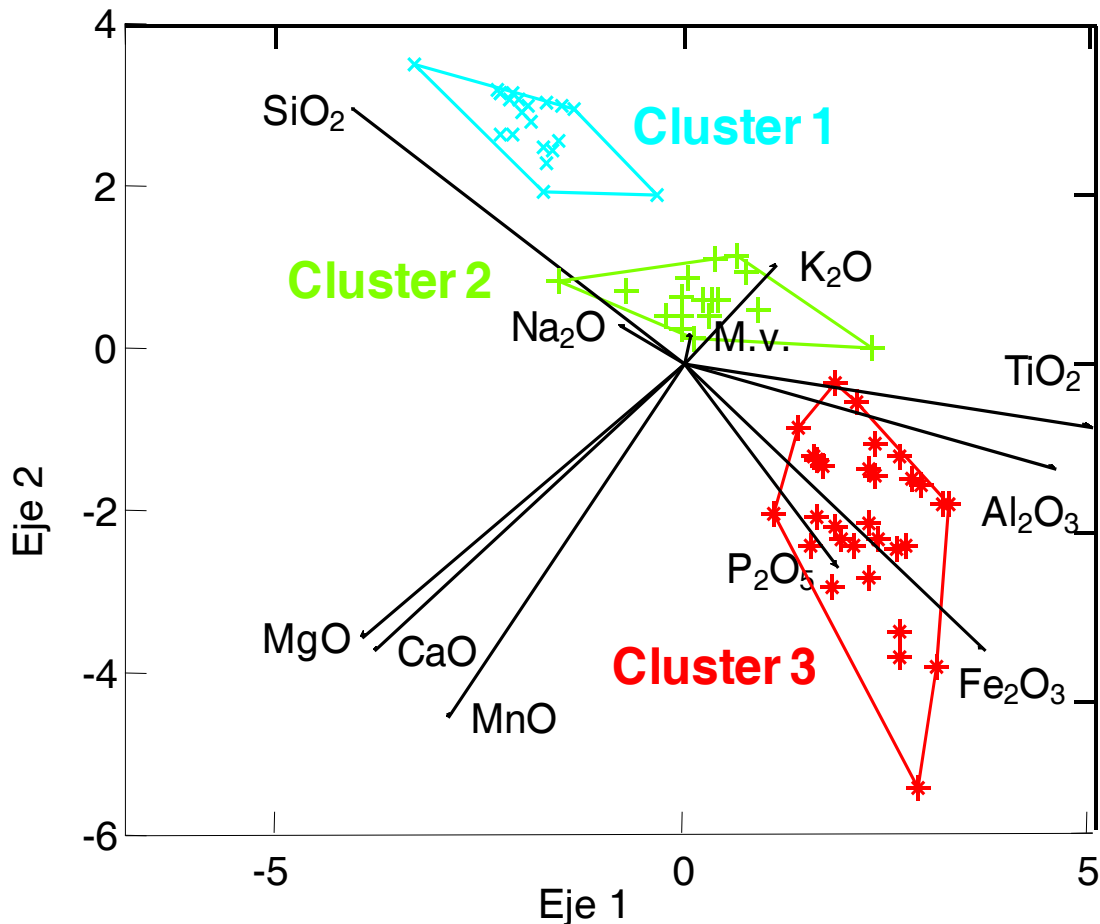


Figura 4.6. Detalle del plano 1-2 con la proyección de los clústeres 1, 2 y 3 ampliada.

El subclúster 1 integra siete muestras de Martinamor y tres de Los Santos, de la Plaza Mayor (PM) y el conjunto Catedralicio (CA), asociadas a una muestra de cantera de Martinamor (**MAR 3**). Se observa claramente que las tres muestras de Los Santos (PM1-3) forman un subclúster, en este caso, debido a su mayor contenido en hierro y magnesio.

El subclúster 2 está definido por siete muestras de Martinamor y una de Los Santos, de los tres monumentos piloto, asociadas a una muestra de cantera de Martinamor (**MAR 1**). La muestra de Los Santos (CA1) se asocia con las muestras CA15 y PM16.

La presencia de muestras del granito de Los Santos en este clúster, mayoritariamente formado por muestras de Martinamor, se explica por el alto contenido en sílice (muestras PM1, PM2 y PM3) y bajo contenido en hierro (muestras PM1, PM2, PM3 y CA1) de las mismas. Tal como exponen López Plaza *et al.* (2009) y recopilando los datos de Ugidos y Recio (1993), el contenido medio en sílice en el batolito de Los Santos es de 68,13 % ($\pm 1,17$), y el de hierro total, de 3,51 ($\pm 0,45$), sin

embargo, los valores de sílice encontrados en estas muestras de granito de Los Santos de La Plaza Mayor son más altos aún (73-74%), y los de hierro, tanto en las muestras de la Plaza Mayor como en la de la Catedral, más bajos (1,6-2%). La única explicación para esto es que los fragmentos de roca muestreados en dichos monumentos no sean del todo representativos de este tipo de roca por ser una fracción más pobre en biotita. Este es un riesgo a correr cuando se muestrea en monumentos, pues la cantidad de roca que se retira, a veces no es suficiente como para asegurar una representatividad, más aún en rocas heterogéneas de grano grueso.

Clúster 2.

Agrupa dieciséis muestras, de las cuales, cuatro son de las canteras de Los Santos (**SAN 1-4**), once de granito de Los Santos de la Plaza Mayor y el Puente Romano y una de vaugnerita de la Plaza Mayor (PM15). El nivel de agregación más alto es de 6,7 (Figura 4.7).

La mejor representación la tenemos en el plano formado por los ejes 2 y 3 (Figura 4.8), que podemos ver ampliado en la Figura 4.9.

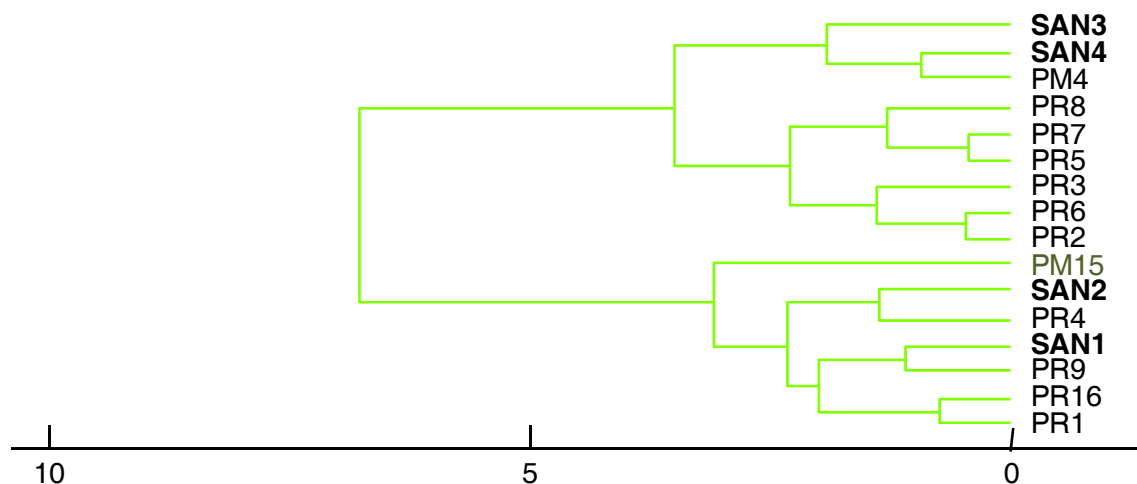


Figura 4.7. Dendrograma ampliado. Clúster 2.

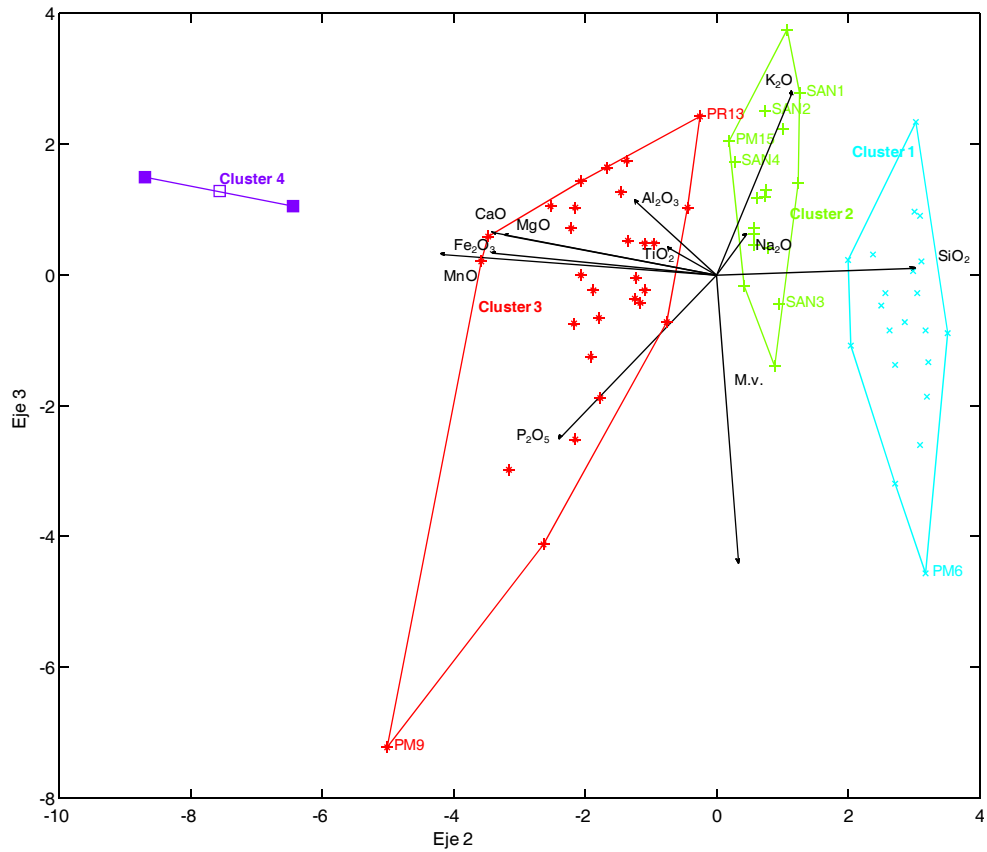


Figura 4.8. Plano 2-3 del HJ-Biplot con la representación de los cuatro clústeres.

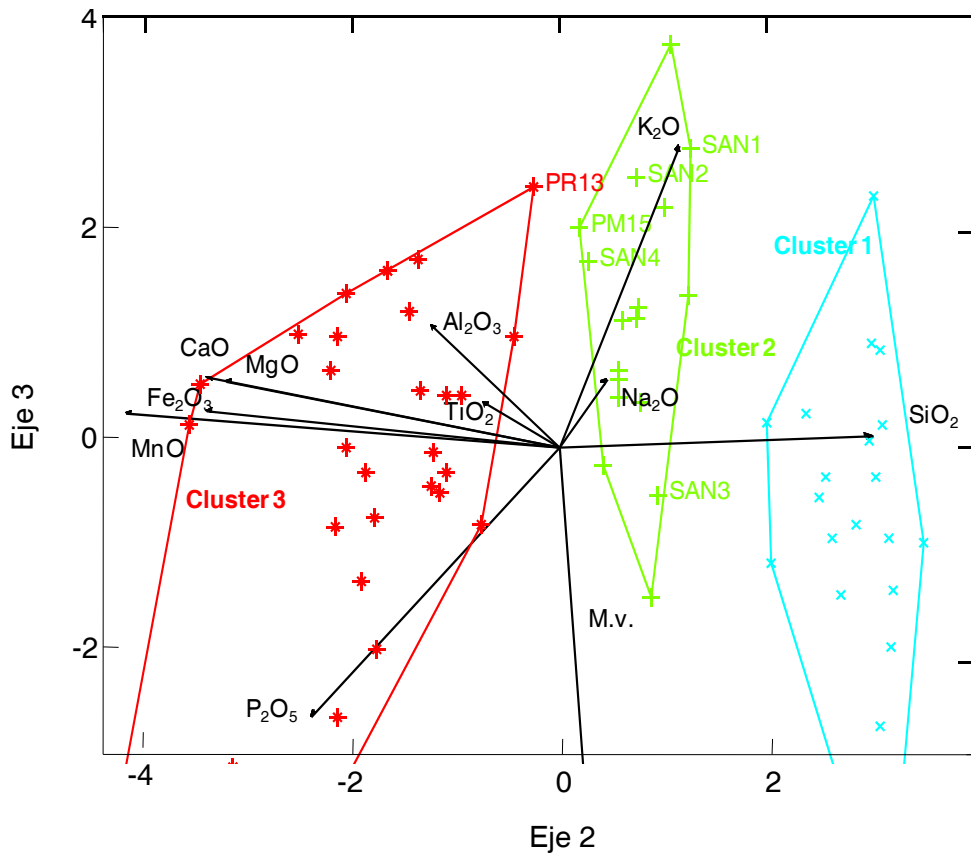


Figura 4.9. Detalle del plano 2-3 y el clúster 2 (verde)

Este clúster está definido por los valores intermedios en sílice (SiO_2), óxido de magnesio (MgO), manganeso (MnO), calcio (CaO), hierro (Fe_2O_3) y titanio (TiO_2) y el contenido en potasio, como indica la proximidad del grupo con esta variable. Agrupa casi todas las muestras de granito de Los Santos presentes en los monumentos piloto y las identifica positivamente con las cuatro muestras tomadas en el batolito de Los Santos.

Representada con estas muestras de Los Santos, hay una muestra de roca vaugnerítica de la Plaza Mayor (PM15). Con relación a las muestras de vaugneritas de las canteras, esta muestra tiene el contenido en sílice y potasio ligeramente más elevado, así como un poco más bajo el hierro. Estas diferencias son muy sutiles. De hecho, si observamos la proyección de los ejes 1-4, esta muestra podría incluirse en el clúster 3, formado en su totalidad por vaugneritas (Figura 4.10). Posiblemente, la presencia de esta muestra en este clúster se puede explicar de manera similar a la de Los Santos agrupadas en el clúster 1.

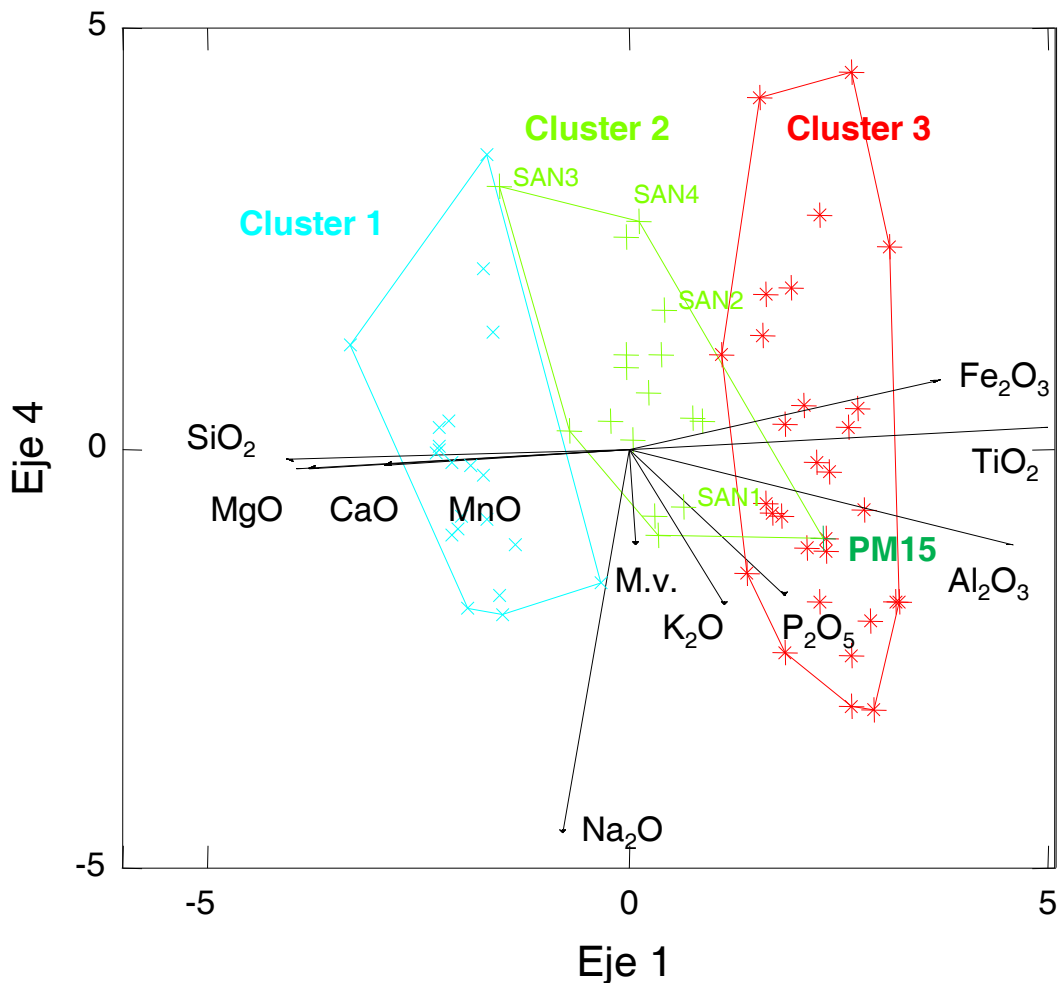


Figura 4.10. Detalle del plano 1-4 ampliado. Clúster 2 en verde. La muestra PM15 del clúster 2 queda englobada con las del clúster 3, en rojo.

Clúster 3.

Agrupar veintinueve muestras de vaugnerita, de las cuales, nueve son de las canteras de Calzadilla (**CAL 1-9**), tres del batolito de Sayago (**SAY 1-3**) y las restantes de los tres monumentos piloto. El nivel de agregación más alto es de 8,6 (Figura 4.11). La mejor representación la tenemos en el plano formado por los ejes 1 y 2 (Figura 4.12).

Este clúster se define por las variables aluminio y hierro (Al_2O_3 y Fe_2O_3), cuyos altos contenidos permiten la agrupación de las muestras de las canteras de Calzadilla y Sayago en correspondencia con las de los monumentos. Este clúster también presenta los valores más altos en óxido de magnesio (MgO), manganeso (MnO), calcio (CaO) y titanio (TiO_2).

En el dendrograma las tres muestras de Sayago aparecen agrupadas, próximas entre sí, y distanciadas de las de vaugneritas de las canteras de Calzadilla y los monumentos, formando un subclúster propio (Figura 4.11). Su presencia en este clúster es lógica, pues todos son vaugneritas, pero el hecho de que no estén mezcladas con las demás muestras, indica que esta variedad no está representada en los monumentos piloto muestreados.

Clúster 4

Está compuesto únicamente por dos muestras de roca de las canteras de Martinamor (**MAR 2** y **MAR 4**). Se definen por tener los valores más elevados en sílice, y más bajos contenidos en óxido de magnesio (MgO), manganeso (MnO), calcio (CaO), hierro (Fe_2O_3), aluminio (Al_2O_3) y titanio (TiO_2), como se ve en el plano 1-2 (Figura 4.5).

El hecho de que no haya correspondencia de estas muestras con ninguna de las muestras tomadas en los monumentos, indica que estas rocas corresponden con una subfacies presente en el cuerpo laminar de Martinamor, que, o bien, no se ha muestreado en los monumentos en este estudio, o bien, no se ha empleado en los monumentos piloto.

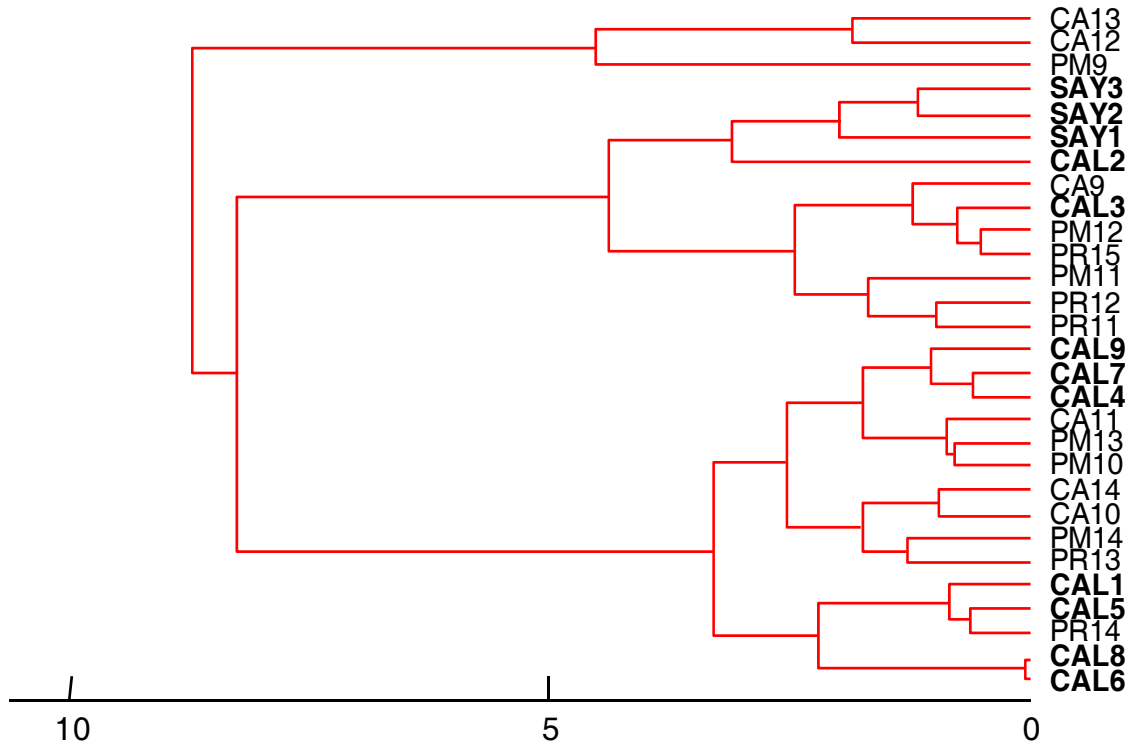


Figura 4.11. Detalle del dendrograma. Clúster 3

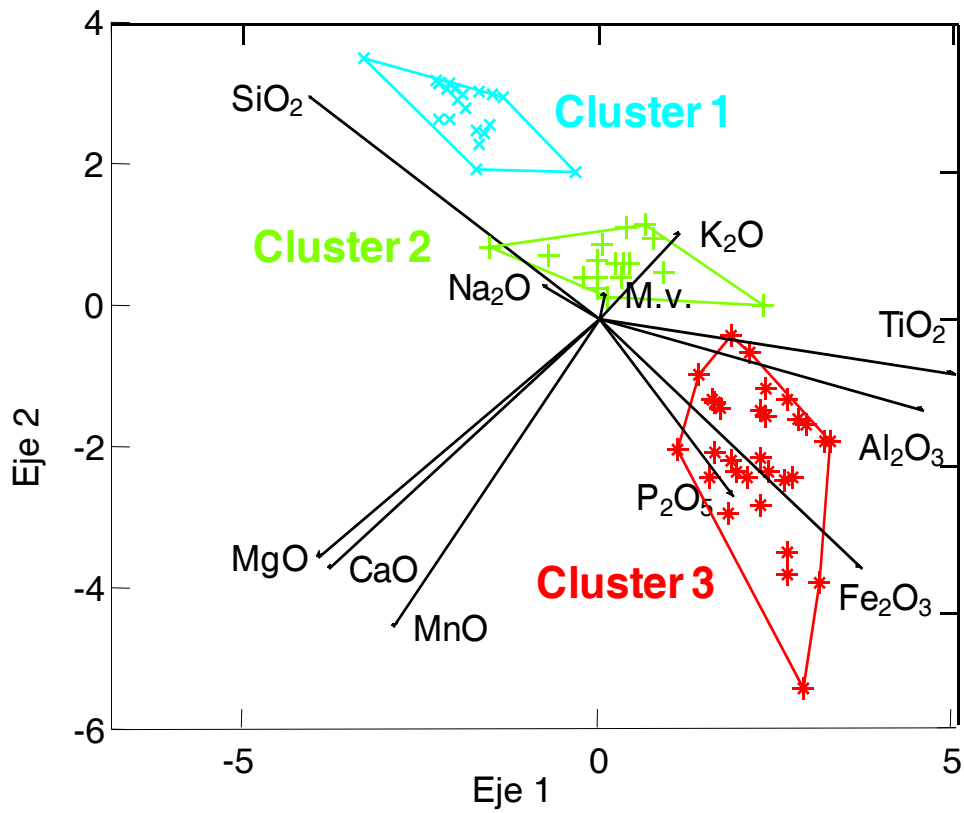


Figura 4.12. Detalle del plano 1-2, Clúster 3

4.4 MÉTODO GEOLÓGICO-GEOQUÍMICO: EMPLEO DE LOS ELEMENTOS TRAZA

En la Tabla 4.4 están recogidos los valores de los elementos traza de las muestras de monumento analizadas.

Tabla 4.4. Contenido en elementos traza de las muestras de monumento (ppm)

| | <i>Vaugneritas de Calzadilla</i> | | <i>Leucogranitos con turmalina de Martinamor</i> | | <i>Granito de Los Santos</i> |
|----|----------------------------------|-------|--|-------|------------------------------|
| | 19 | CAL | CA-13 | PM-9 | PR-1 |
| Hf | 7,6 | 10,9 | 1,2 | 1,2 | 4,1 |
| Ta | 1,05 | 1,87 | 3,87 | 3,11 | 2,45 |
| Ba | 1193 | 1353 | 229 | 226 | 799 |
| Cr | 150 | < 20 | < 20 | < 20 | < 20 |
| Nb | 10,2 | 17,9 | 10,2 | 9,7 | 9,7 |
| Ni | 100 | < 20 | < 20 | < 20 | < 20 |
| Rb | 168 | 219 | 212 | 225 | 250 |
| Sr | 477 | 475 | 91 | 91 | 212 |
| Th | 26 | 46,9 | 1,94 | 1,73 | 11,4 |
| U | 4,61 | 4,15 | 2,96 | 4,51 | 1,98 |
| Y | 17,2 | 19 | 14 | 13,6 | 17,5 |
| Zr | 281 | 418 | 33 | 29 | 127 |
| Be | 5 | 5 | 10 | 12 | 3 |
| Co | 45 | 80 | 149 | 100 | 112 |
| Cu | 30 | 20 | < 10 | 40 | < 10 |
| Ga | 22 | 26 | 21 | 21 | 21 |
| Sc | 13 | 6 | 4 | 3 | 6 |
| V | 89 | 53 | < 5 | < 5 | 32 |
| Zn | 90 | 150 | 70 | 90 | 80 |
| As | < 5 | < 5 | 15 | 12 | < 5 |
| Cs | 8,5 | 7,1 | 31,8 | 27,1 | 21 |
| Pb | 42 | 70 | 55 | 53 | 34 |
| La | 68,5 | 144 | 6,49 | 5,7 | 28 |
| Ce | 124 | 252 | 12,8 | 11,4 | 56,9 |
| Nd | 49,5 | 89,8 | 5,94 | 5,61 | 25,1 |
| Sm | 7,58 | 12,3 | 1,5 | 1,52 | 4,83 |
| Eu | 1,61 | 2,1 | 0,538 | 0,543 | 1,02 |
| Gd | 5,12 | 7,59 | 1,88 | 1,88 | 3,84 |
| Dy | 3,49 | 4,08 | 2,41 | 2,3 | 3,27 |
| Er | 1,67 | 1,76 | 1,18 | 1,11 | 1,62 |
| Yb | 1,42 | 1,41 | 1,1 | 1,07 | 1,42 |
| Lu | 0,2 | 0,201 | 0,153 | 0,147 | 0,206 |
| Tb | 0,71 | 0,9 | 0,39 | 0,38 | 0,64 |
| Tm | 0,227 | 0,232 | 0,175 | 0,174 | 0,23 |

Vaugnerita de Calzadilla

Considerando las muestras de Calzadilla 19 y CAL en monumento, las de Calzadilla en cantera y la muestra media de las canteras de Sayago se observa un mismo patrón general de enriquecimiento en las tierras raras ligeras con rectas de pendiente negativa en los diagramas de normalización al condrito (Figura 4.13).

Como puede verse también, la media de las muestras de área plutónica de Sayago muestra un patrón distinto al de las de Calzadilla, tanto de las canteras como de los monumentos, con claras diferencias en el grado de fraccionamiento de tierras raras ligeras con respecto a las pesadas. La diferencia en ambos tipos de patrones se constata también por los diferentes valores de la anomalía de Eu, que en la media de las muestras de Sayago es de 0,92, mientras que en las muestras de Calzadilla oscila entre 0,66 (CAL) y 0,82 (C-14), siendo normalmente 0,7. Esto se debe, en términos petrológicos, a una mayor fraccionación de la plagioclasa en Calzadilla, con una anomalía negativa en Eu más marcada, resultando términos, en su conjunto, más diferenciados que las rocas de Sayago.

Muy diferentes también son los dos tipos de patrones que presenta la media de las muestras de Sayago con respecto a todas las muestras de Calzadilla en el diagrama multielemental (Figura 4.14). Atendiendo a la intensidad de los picos del diagrama y a sus consecuentes relaciones elementales, tales como Ba/Rb y Sm/Zr podemos constatar diferencias notables entre las muestras de las distintas canteras, presentando las rocas de Sayago mayores contenidos en Ba y Sm que las de Calzadilla, tanto las de cantera como las de monumento (Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Algunas relaciones elementales de interés de las muestras de vaugneritas

| | SAYAGO | POR 103 | POR-101 | C-58A | C-54 | C-60 | C-14 | 19 | CAL |
|-------|--------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ba/Rb | 11,562 | 6,177 | 6,469 | 7,904 | 7,679 | 7,660 | 7,105 | 7,101 | 6,178 |
| Sm/Zr | 0,050 | 0,023 | 0,025 | 0,026 | 0,022 | 0,023 | 0,025 | 0,027 | 0,029 |

Estas diferencias nos llevan a descartar las canteras de Sayago como posible origen de las rocas vaugneritas presentes en los monumentos muestreados.

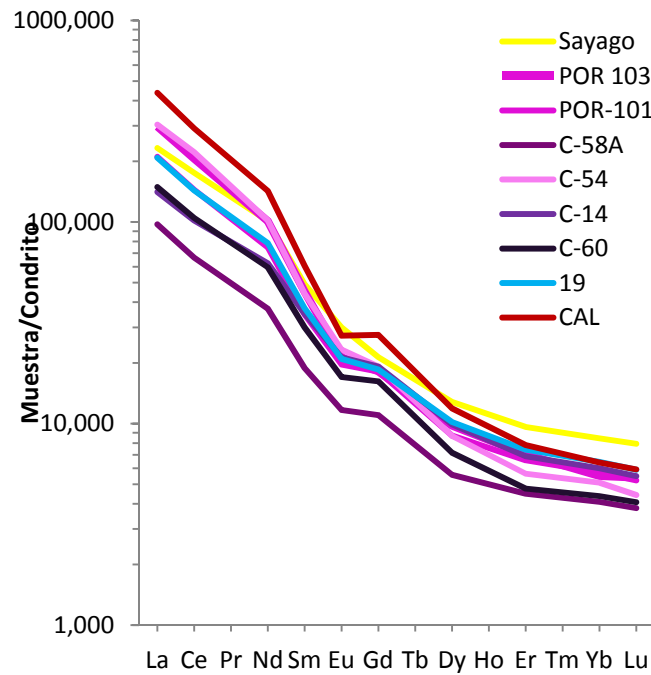


Figura 4.13. Diagrama de tierras raras de las rocas del plutón de Calzadilla, con las rocas vaugneríticas muestreadas en los monumentos, 19 y CAL y la media de las muestras (n=3) del área plutónica de Sayago. Valores de normalización, según Nakamura (1974)

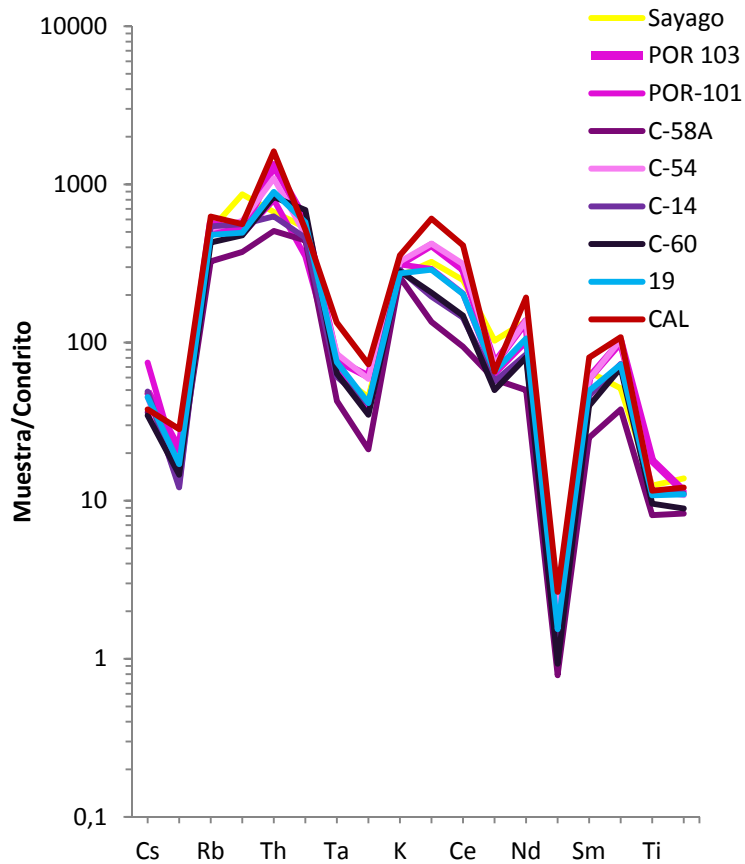


Figura 4.14. Diagrama multielemental de las rocas del plutón de Calzadilla y rocas asociadas. Valores de normalización, según Sun y McDonough (1989)

Por otro lado, comparando las muestras de monumento con las rocas de las canteras de Calzadilla, se puede apreciar en el diagrama multielemental la gran similitud entre ambas. En concreto, la muestra CAL presenta gran semejanza con la facies de las vaugneritas leucocráticas de grano grueso con o sin anfíbol (POR103, POR-101, C-54), pese a que petrográficamente es de grano medio-fino, motivo por el cual podría encajar con la facies de borde del plutón. La muestra 19, con la misma afinidad, no supone tal problema, pues petrográficamente es una leucovaugnerita de grano grueso.

Por tanto, el estudio comparativo de los elementos traza no siempre es de utilidad para la identificación de facies, si no existe una diferencia composicional significativa en cantera, como ocurre en el Plutón de Calzadilla cuyas facies de grano fino tienen patrones solapados con los de las gruesas. Para este caso, simplemente la discriminación petrográfica es más determinante, especialmente si se combina con los elementos mayores cuya discriminación y coherencia ya se evidenció en el apartado 4.3 mediante el diagrama de clasificación Q'-ANOR. Desde un punto de vista petrológico, esta discrepancia en la aplicabilidad de las técnicas hay que relacionarla con un desfase o falta de correspondencia entre los minerales esenciales, tanto félsicos como máficos, que controlan los elementos mayores, con respecto a los minerales accesorios, controladores de los elementos traza. En otras palabras, habría que invocar diferentes procesos de diferenciación magmática que operaron en todo el plutón. A este respecto, conviene recordar aquí, las diferencias encontradas en las clasificaciones modales entre las facies gruesas y las finas (véase la Figura 3.14, diagrama QAP, del apartado 3.1.2).

Granito de Martinamor

Respecto al granito de Martinamor, las muestras de monumento CA-13 y PM-9 presentan en los diagramas de normalización al condrito, tanto para las tierras raras (Figura 4.15) como para los diagramas multi-elementales (Figura 4.16), patrones generales de enriquecimiento en los elementos más incompatibles, con rectas de pendiente negativa, al igual que las muestras de cantera.

Como puede verse claramente en el diagrama de tierras raras (Figura 4.15), sus contenidos y los picos de las dos muestras de cantera son bastante similares a los de la facies de grano grueso, lo que indica que con toda probabilidad se trata de las mismas facies. Sin embargo, en las dos muestras de monumento se suaviza la anomalía de Eu (pasa de 1,08 para la muestra M10 a 0,98 para ambas las de monumento).

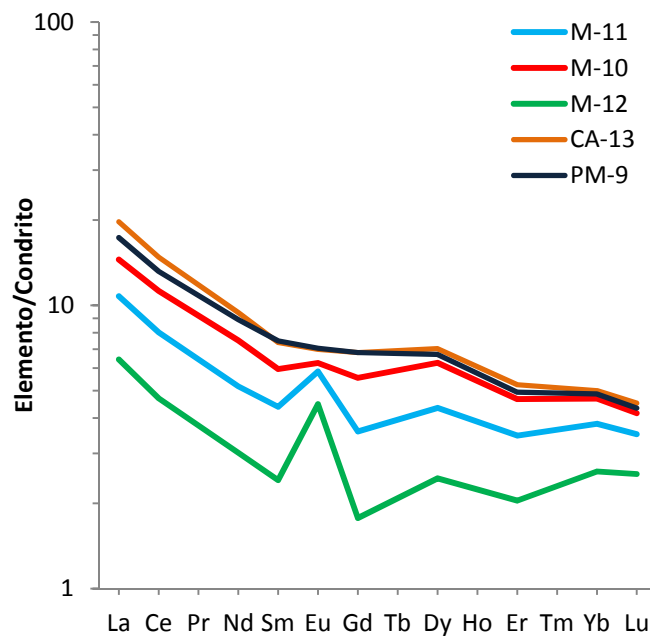


Figura 4.15. Diagrama de tierras raras de las rocas del plutón de Martinamor. Valores de normalización, según Nakamura (1974). M-10: leucogranito con turmalina de grano grueso. M-11: leucogranito con turmalina de grano fino. M-12: granito de dos micas.

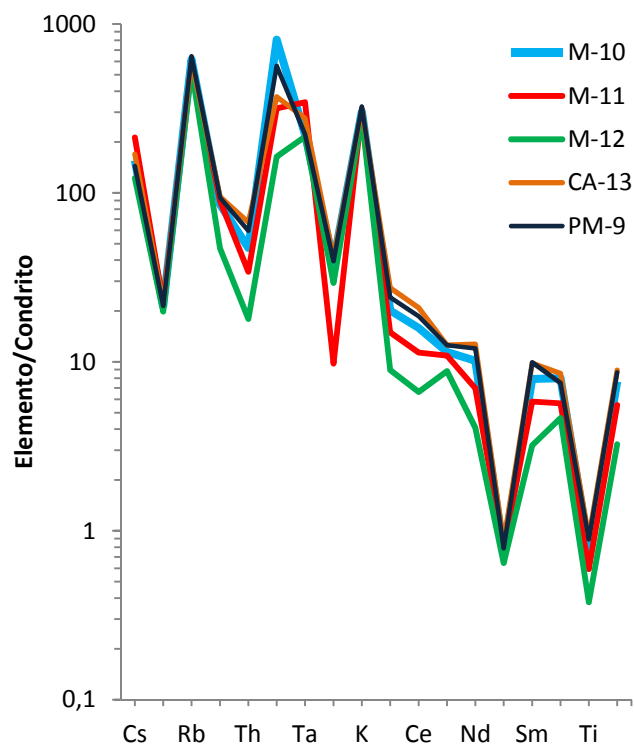


Figura 4.16. Diagrama multielemental de las rocas del plutón de Martinamor. Valores de normalización, según Sun y McDonough (1989). M-10: leucogranito con turmalina de grano grueso. M-11: leucogranito con turmalina de grano fino. M-12: granito de dos micas

Los diagramas multielementales (Figura 4.16) son aún más concluyentes y esclarecedores para confirmar la afinidad con la facies turmalinífera gruesa, como se demuestra cualitativamente con los picos similares de ambos patrones; si bien, existen ciertas diferencias en su intensidad, sobre todo con la PM-9. Estas discrepancias, probablemente, pueden ser atribuidas a deficiencias en el muestreo del monumento, en relación, tal vez, con una mayor proporción relativa de feldespatos con respecto a turmalina, que se encuentra siempre en agregados muy dispersos, circunstancia de más incidencia en el monumento. Al haber más feldespatos se intensifica el pico positivo de K y Rb, y se suaviza el negativo de Ba, a la vez que el pico negativo de Eu llega incluso a desaparecer; mientras que un menor contenido en turmalina justifica el mayor pico negativo en Nb y Ta para las dos muestras de los monumentos.

Granito de Los Santos

Respecto del granito de Los Santos, las muestras PR-1 de monumento y las de cantera LS1 y LS2, junto con la media del batolito de Sistema Central presentan en los diagramas de normalización al condrito, tanto para las tierras raras como para los diagramas multi-elementales (Figura 4.17 y Figura 4.18) similares patrones generales de enriquecimiento en los elementos más incompatibles, con rectas de pendiente negativa.

El diagrama multielemental de normalización al condrito (Figura 4.17) indica que la muestra del Puente Romano tiene una gran similitud con la facies de borde más leucocrática de las canteras (LS 2). En efecto, si exceptuamos algunas discrepancias en los elementos traza de gran coeficiente de distribución en los minerales esenciales, como Ba y Rb, atribuible a deficiencias en el muestreo del monumento, igual que en el caso anterior, el resto de ellos define un espectro con anomalías negativas de P, Nb, Sr y Ti, que es muy similar al de la facies más leucocrática, a la vez que los contenidos en tierras raras para ambos tipos de muestras son sensiblemente inferiores a los de la facies más biotítica (LS 1).

Igualmente mediante el diagrama interelemental, aparecen los valores medios de los granitos cordieríticos del borde del Sistema Central con carácter intermedio entre las dos facies de las canteras especialmente a tenor de los elementos traza inmóviles, cobrando verosimilitud que las dos muestras de las canteras analizadas en este trabajo representan facies extremas de los granitoides del área.

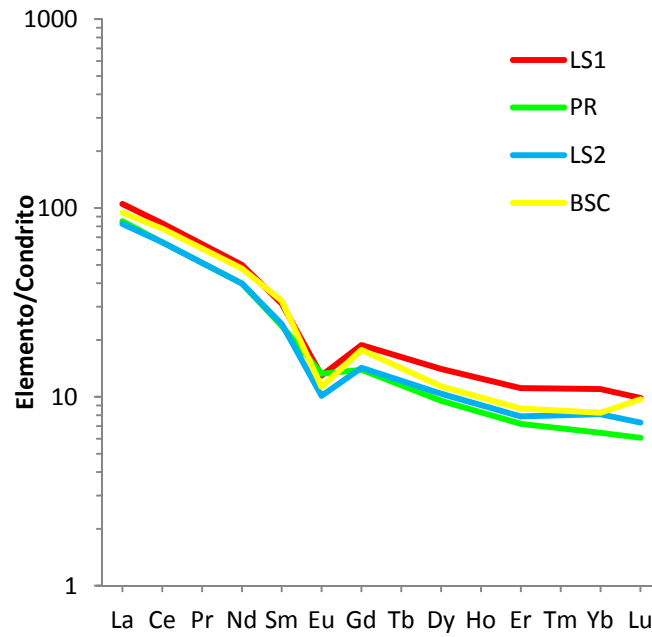


Figura 4.17. Diagrama de tierras raras de las rocas asociadas al plutón de Los Santos. Valores, según Nakamura (1974). PR1: muestra del Puente Romano. LS1: muestra de cantera de la facies más biotítica. LS2: muestra de cantera de la facies más leucocrática. BSC: media de 8 muestras del Batolito del Sistema Central (Ugidos y Recio, 1993)

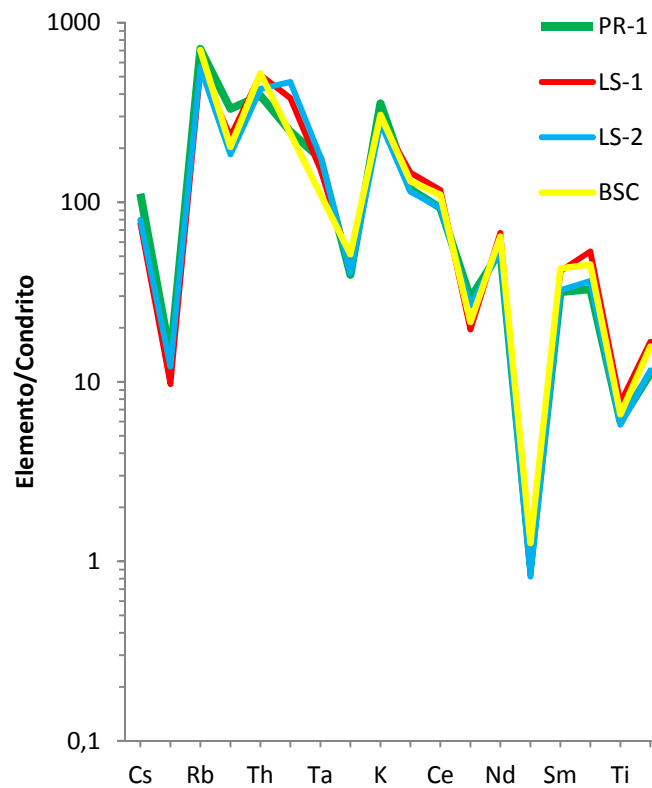


Figura 4.18. Diagrama de normalización al condrito. Valores, según Sun y McDonough (1989). PR1: muestra del Puente Romano. LS1: muestra de cantera de la facies más biotítica. LS2: muestra de cantera de la facies más leucocrática. BSC: media de 8 muestras del Batolito del Sistema Central (Ugidos y Recio, 1993), granitos cordieríticos de borde.

En los diagramas de normalización para las tierras raras (Figura 4.17) puede apreciarse la gran similitud de la muestra del Puente Romano con la facies de borde más leucocrática de las canteras (LS 2). De hecho, analizando algunas relaciones entre elementos se constata que la muestra del monumento, PR-1, es más afín a la facies de borde, LS-2, que a la facies más interior, LS-1, lo cual se corrobora por los contenidos totales en tierras raras (Σ LREE y Σ HREE) (Tabla 4.6). Se llega, pues, a establecer el tipo de facies implicada en la construcción del Puente Romano mediante los elementos traza, combinando los elementos químicos que controlan los minerales accesorios, como tierras raras, Th y Zr, con los elementos químicos que controlan los minerales esenciales, como Rb, Sr y Ti. Así, para la facies de borde y la muestra PR1 la discriminación se basa, por un lado, en un menor contenido en minerales accesorios, y por otro lado, en mayor contenido en feldespato alcalino respecto a plagioclasa, en coherencia con la clasificación en el diagrama Q'-ANOR de la figura 4.2.

Tabla 4.6. Contenidos en tierras raras y algunas relaciones elementales de las muestras de Los Santos

| | <i>PR-1</i> | <i>LS1</i> | <i>LS2</i> | <i>BSC</i> |
|--------------------------------|-------------|------------|------------|------------|
| <i>ΣLREE</i> | 114,83 | 144,03 | 114,14 | 135,05 |
| <i>ΣHREE</i> | 12,246 | 17,541 | 13,033 | -- |
| <i>LREE/HREE</i> | 9,377 | 8,211 | 8,757 | -- |
| <i>Rb/Th</i> | 21,923 | 12,972 | 15,967 | 16,259 |
| <i>Sr/Ce</i> | 3,725 | 1,983 | 3,385 | 2,318 |
| <i>Ti/Zr</i> | 0,183 | 0,142 | 0,158 | 0,146 |

Como conclusión, los elementos traza permiten llegar a identificar la facies implicada en las canteras para las tres piedras estudiadas. Las limitaciones o discrepancias que pueden darse en esta técnica responden a dos causas diferentes: a) por las escasas diferencias composicionales en las facies, como puede ocurrir en algunos casos para las vaugneritas de Calzadilla, y b) por las deficiencias en el muestreo del monumento que puede hacer perder cierta representatividad de la muestra al cambiar las proporciones de los minerales esenciales. Estas posibles deficiencias se subsanan al tener en cuenta los criterios litológicos y la geoquímica de elementos mayores.

CONCLUSIONES GENERALES SOBRE LA IDENTIFICACIÓN DE CANTERAS

A modo de síntesis se presenta aquí una tabla sobre la identificación de las canteras especificando distintas metodologías y técnicas, así como su aplicabilidad a las tres piedras de la Ciudad de Salamanca (Tabla 4.7).

Obviamente, se pueden utilizar, además, otras técnicas, como la caracterización y discriminación químico-mineralógica, u otras metodologías cada vez más potenciadas basadas en el tratamiento de imagen. En todo caso, la identificación segura de las canteras originales se ha de basar en la conjunción, integración y combinación de una pléyade de métodos y técnicas cuyos resultados han de ser siempre perfectamente coherentes. Esto es lo que se ha pretendido en este estudio.

Tabla 4.7. Métodos y técnicas utilizadas para el reconocimiento de las rocas plutónicas utilizadas en la ciudad de Salamanca e identificación de las canteras.

| METODO | TÉCNICAS | PRINCIPALES RESULTADOS PARA LAS TRES PIEDRAS DE SALAMANCA |
|-------------------------|---|---|
| HISTÓRICO | <p>Documentación histórica: Consulta de archivos y publicaciones que hacen alusión a los contratos de obra.</p> | <p>Referencias de las canteras y uso histórico: -LOS SANTOS: uso en épocas romanas y a partir de principios del siglo XVI. Profusión de la piedra en el siglo XX, principalmente en la post-guerra y en combinación con la arenisca de Villamayor en los monumentos del centro histórico -MARTINAMOR: uso a partir de principios del siglo XVI finalización en los años 30 del siglo XX -CALZADILLA DEL CAMPO: uso a partir de mediados del siglo XVI y terminación hacia el siglo XIX.</p> |
| GEOLÓGICO LITOLÓGICO | <p><i>Técnica general:</i> Reconocimiento de las asociaciones de rocas o de facies en cantera y monumento y relación con la estructura y geometría del plutón <i>Técnicas específicas:</i> cartografía detallada del plutón, y petrografía de las facies, incluyendo cómputos modales y clasificaciones QAP</p> | <p>Facies que se repiten en canteras y monumentos: -LOS SANTOS: dos facies de uso histórico separado, como consecuencia del carácter masivo de los afloramientos -MARTINAMOR: dos facies turmaliníferas (de grano grueso nodulosa y de grano fino), que coexisten a menudo en los monumentos por el carácter estratoide del plutón en capas de poco espesor. Utilización selectiva: la de grano grueso en las partes nobles, la fina en elementos secundarios, como escalinatas. -CALZADILLA DEL CAMPO: facies vaugneríticas (rica y pobre en anfíbol) y facies de grano fino, que coexisten a menudo en los monumentos por el carácter estratoide del plutón. Utilización indiscriminada de las dos facies, a veces con pretensiones artístico-cromáticas.</p> |

Tabla 4.8. Continuación

| METODO | TÉCNICAS | PRINCIPALES RESULTADOS PARA LAS TRES PIEDRAS DE SALAMANCA |
|--|---|---|
| <p>GEOLÓGICO GEOQUÍMICO MEDIANTE ELEMENTOS MAYORES</p> | <p>Diagramas químico-mineralógicos de caracterización y clasificación, como Q'-ANOR, tanto en muestras de canteras como en monumentos.</p> | <p>-LOS SANTOS: determinación de la coherencia en la clasificación mediante el Q'-ANOR, con afinidad entre las muestras de cantera y monumento -MARTINAMOR: coherencia y afinidad en los diagramas de clasificación de las dos facies -CALZADILLA DEL CAMPO: coherencia y afinidad en los diagramas de clasificación de las distintas facies</p> |
| | <p>Estadística: Aplicación del Método de Inercia basado en una representación HJ-Biplot</p> | <p>-CALZADILLA DEL CAMPO: Confirmación de las canteras al evidenciarse su discriminación respecto de otras vaugneritas. -MARTINAMOR: Agrupación de muestras de monumento con muestras de cantera -LOS SANTOS: agrupación de muestras de monumento con muestras de cantera.</p> |
| <p>GEOLÓGICO GEOQUÍMICO MEDIANTE ELEMENTOS TRAZA</p> | <p>Diagramas de normalización al condrito y comparación de cantera y monumento. Determinación de las relaciones inter-elementales significativas (picos en los espectros)</p> | <p>Identificación de las canteras, al establecer la afinidad geoquímica -LOS SANTOS: determinación de la afinidad de la piedra usada en las épocas romanas con la facies de borde del plutón -MARTINAMOR: coherencia en los diagramas de normalización de las dos facies tanto en cantera como en monumento; en concreto, se evidencia la afinidad de la facies turmalinífera gruesa utilizada en la Plaza Mayor respecto a la misma facies en cantera. -CALZADILLA DEL CAMPO: afinidad en los diagramas de normalización de las distintas facies tanto en cantera como en monumento, estableciéndose la semejanza, en algún caso, con la vaugnerita gruesa leucocrática.</p> |

**5. DURABILIDAD DE LOS MATERIALES Y ENSAYOS
DE CONSERVACIÓN**

Ya caracterizadas las tres variedades líticas en las canteras y en los monumentos se determinaron una serie de propiedades hídricas (porosidad libre y total, densidad real y aparente, coeficientes de absorción capilar, imbibición y absorción y permeabilidad al vapor de agua) y otras propiedades físicas (color y velocidad de propagación de ultrasonidos) en las muestras de cantera y envejecidas artificialmente y/o sometidas a los distintos tratamientos de conservación, para conocer la incidencia de los envejecimientos y de los tratamientos en las características de los materiales.

Una vez realizados los distintos análisis y ensayos, se procedió al estudio comparativo de los resultados obtenidos en los mismos al fin de obtener respuesta al tercer objetivo planteado, para lo cual, éste se divide en tres:

1. Para «Analizar la respuesta de los materiales seleccionados frente a agentes externos» se estudiará la durabilidad de las rocas de cantera frente a los distintos tipos de envejecimiento artificial acelerado propuestos.
2. Para «Analizar la respuesta de los materiales seleccionados frente ... a los productos de conservación más comúnmente empleados (hidrofugantes, consolidantes, etc.)...» y estudiar «métodos de limpieza no agresivos (aplicación de cataplasmas de arcillas) para la eliminación de sales y otros contaminantes» se estudiará la eficacia de los tratamientos de conservación.
3. Para conocer «los cambios operados en su textura y estructura... para evaluar la utilidad de los propios productos de conservación» se estudiará la durabilidad de los tratamientos de conservación aplicados.

5.1 DETERMINACIÓN DE LA DURABILIDAD DE LA ROCA DE CANTERA

Para la determinación de la durabilidad de las rocas de cantera se han empleado ensayos de envejecimiento artificial acelerado, que reproducen, por un lado, los procesos propios de la zona climática en la que nos encontramos, mediterráneo con tendencia continental [con fuertes oscilaciones térmicas, que llevan al deterioro de la roca por fatiga térmica y heladas, Iñigo *et al.* (2000a)], y por otro, los procesos de cristalización de sales (haloclastia).

Así, se han sometido varias probetas de cada litología a tres tipos de envejecimientos artificiales acelerados, bajo condiciones controladas, tal como se describe en el apartado 2.8 de la de la presente memoria (figura 2.16):

- Envejecimiento por hielo/deshielo junto con frío/calor (HD)
- Envejecimiento por cristalización de sulfatos (CS)
- Envejecimiento combinado por hielo/deshielo junto con frío/calor y cristalización de sulfatos (HD+CS)

El efecto de los envejecimientos sobre las rocas de cantera se ha estudiado de formas distintas, según sea la naturaleza del envejecimiento (figura 2.16), aunque en todos los casos se han realizado exámenes de visu, como primer control del deterioro ocasionado.

5.1.1 ENVEJECIMIENTO POR HIELO/DESHIELO JUNTO CON FRÍO/CALOR (HD)

En las muestras sometidas a envejecimiento artificial acelerado por hielo/deshielo junto con frío/calor, su durabilidad se establece, principalmente, mediante el estudio de las variaciones ponderales, las variaciones en las propiedades hídricas (Biplot Canónico, análisis 1) y las variaciones en la velocidad de propagación de ultrasonidos y del color (Biplot Canónico, análisis 2).

Descripción de visu

Todas las rocas sometidas a este tipo de envejecimiento apenas muestran un deterioro apreciable durante el proceso, por lo que nos centramos en su estado al finalizar el ensayo, no mostrando apenas deterioro al finalizar el mismo (Figura 5.1), excepto en las muestras de Calzadilla, en las que tras los 25 ciclos de envejecimiento presentan un aumento en la rugosidad de la superficie al tacto.

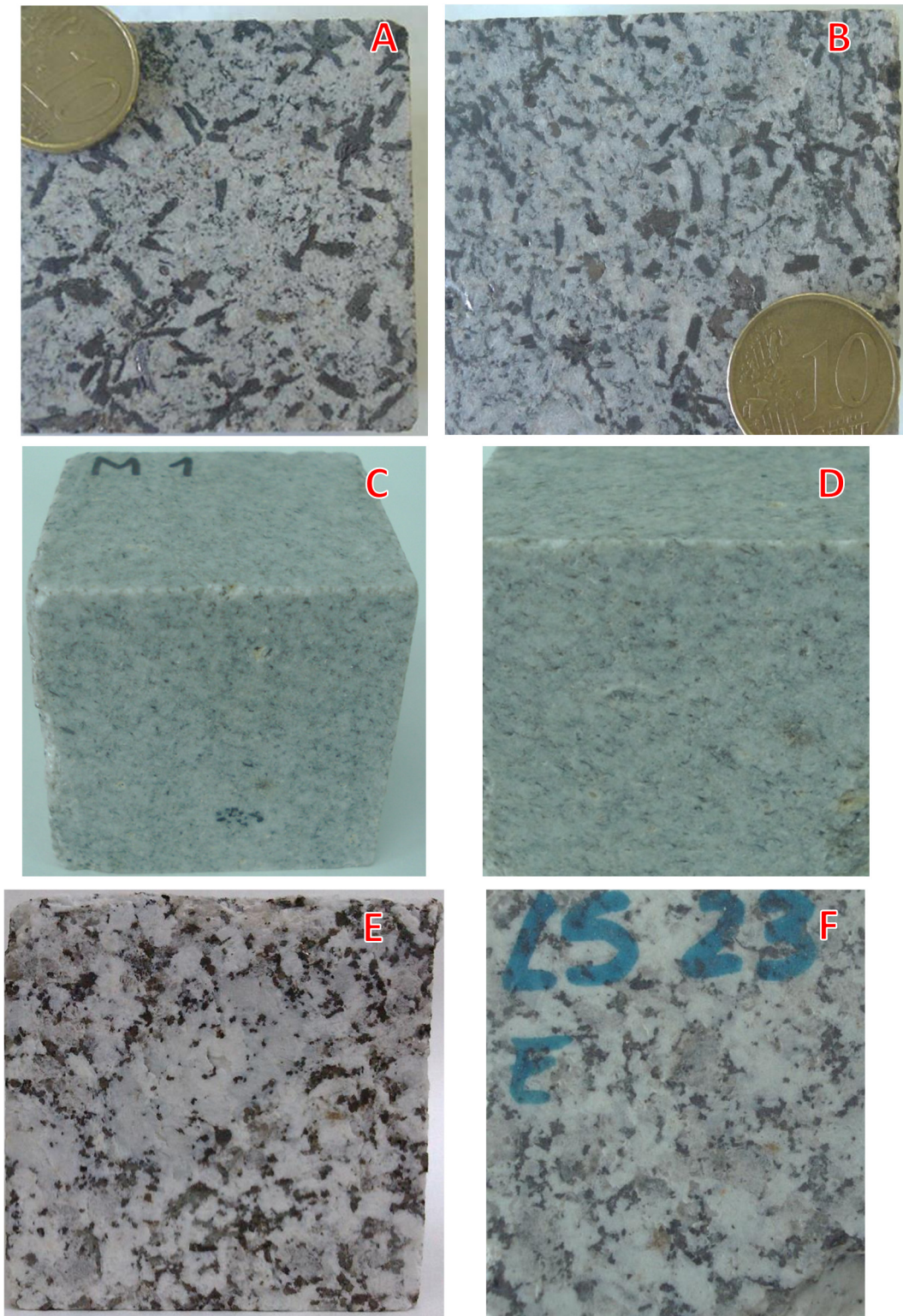


Figura 5.1. Probetas de cantera (A, C y E) y envejecidas por HD (B, D y F) de Calzadilla, Martinamor y Los Santos, respectivamente.

Variaciones ponderales

El estudio de las variaciones de peso se lleva a cabo determinando la diferencia de peso, en gramos, entre el peso de la probeta antes y después de cada envejecimiento artificial acelerado. Estos resultados nos dan información sobre la intensidad del deterioro producido por el envejecimiento artificial al que se han sometido las distintas muestras.

En la Figura 5.2 está representada la variación ponderal de las muestras de las tres variedades con los distintos procesos de envejecimiento artificial testados [hielo/deshielo junto con frío/calor (HD), cristalización de sulfatos (CS) y combinado por hielo/deshielo junto con frío/calor y cristalización de sulfatos (HD+CS)]. Los datos para todas las tablas de diferencia de peso están recogidos en la tabla I del ANEXO.

En el caso del envejecimiento acelerado por hielo/deshielo junto con frío/calor no se aprecian grandes diferencias de peso antes y después del envejecimiento, manteniéndose estables las probetas de las tres variedades. Esto nos indica que los 25 ciclos de envejecimiento no son suficientes para obtener degradación apreciable de estas rocas plutónicas.

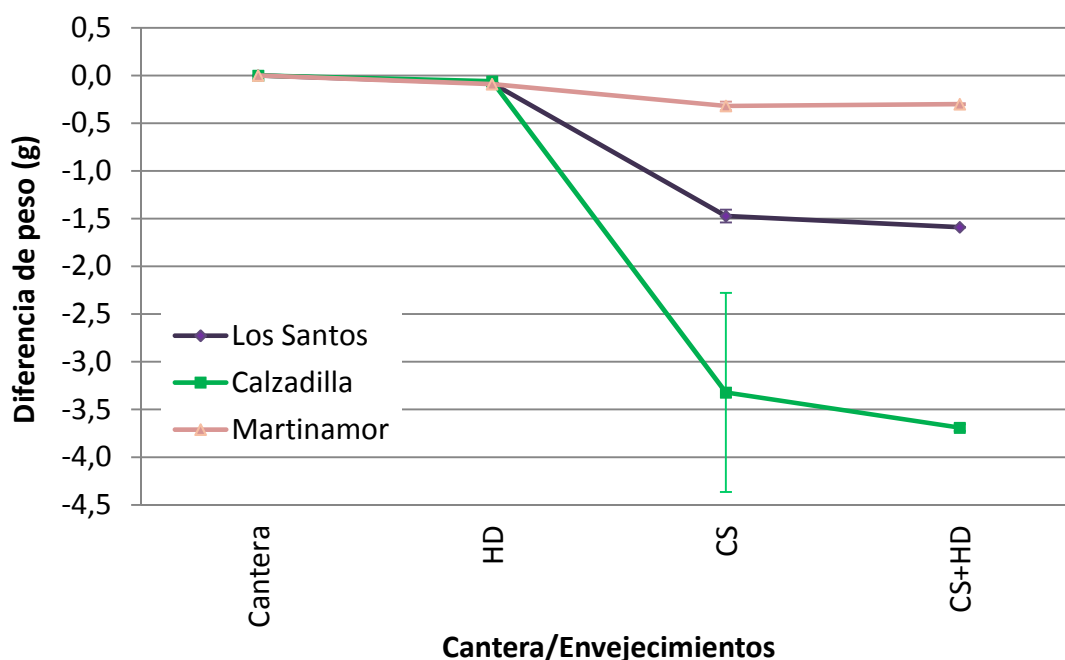


Figura 5.2. Diferencia de peso de las muestras de Los Santos, Calzadilla y Martinamor de cantera, envejecidas por HD, por CS y por HD+CS. En cada punto está representado el error típico de la media por las barras verticales.

Microscopía electrónica de barrido

Se han realizado observaciones de las muestras tras el envejecimiento por HD. La variedad que presenta mayores alteraciones en sus minerales respecto a la roca de cantera es la vaugnerita. En estas probetas envejecidas, los cristales de biotita aparecen rotos (Figura 5.3), al igual que la plagioclasa, cuyos cristales pueden verse tapizados por pequeños fragmentos sueltos de plagioclasa (Figura 5.4).

Las muestras de Los Santos y Martinamor apenas presentan indicios de alteración remarkable. A modo de ejemplo, en la Figura 5.5 se pueden observar las imágenes obtenidas en muestras de granito de Los Santos, donde se ve el estado de la biotita tras el envejecimiento, con escasa rotura de sus láminas, si se compara con las de la vaugnerita envejecida por HD (Figura 5.3 C).

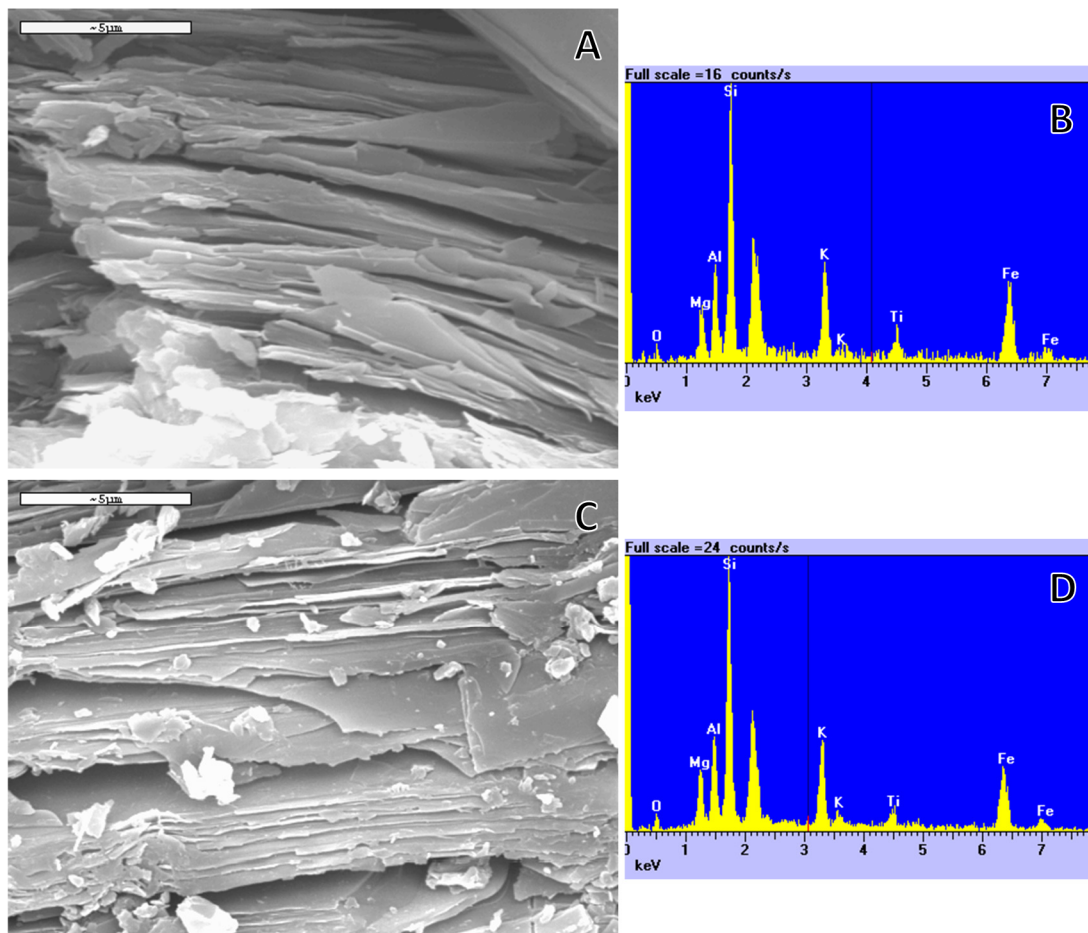


Figura 5.3. Imagen de MEB: A) biotita de vaugnerita de cantera, B) espectro de la imagen A, C) biotita de vaugnerita envejecida por HD y, D) espectro de la imagen C.

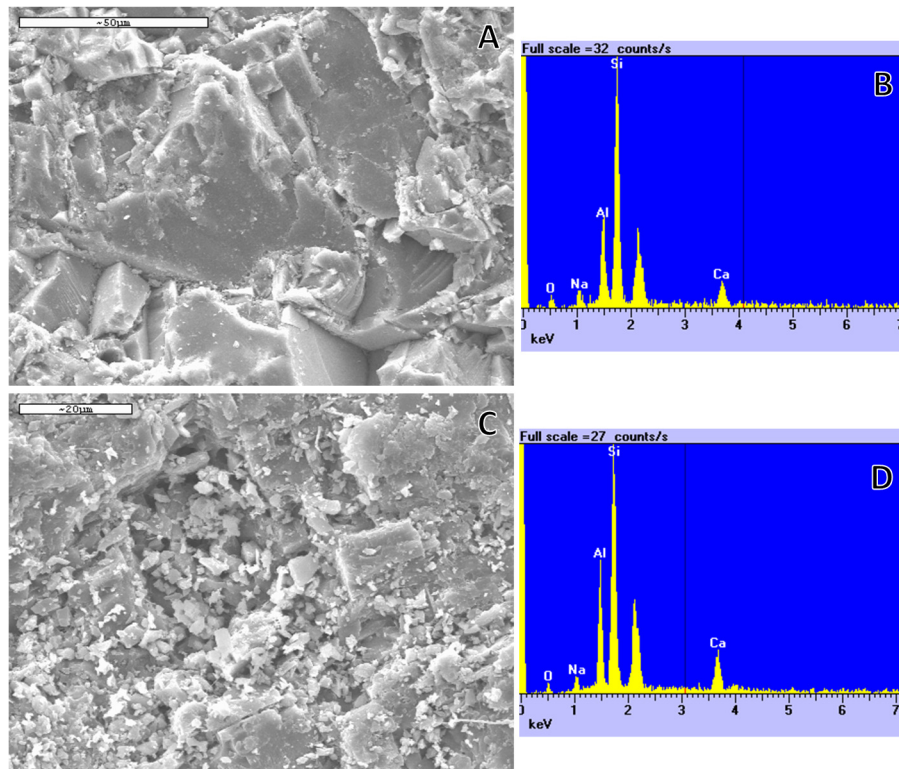


Figura 5.4. Imagen de MEB: A) plagioclasa de vaugnerita de cantera, B) espectro de la imagen A, C) plagioclasa de vaugnerita envejecida por HD y, D) espectro de la imagen C.

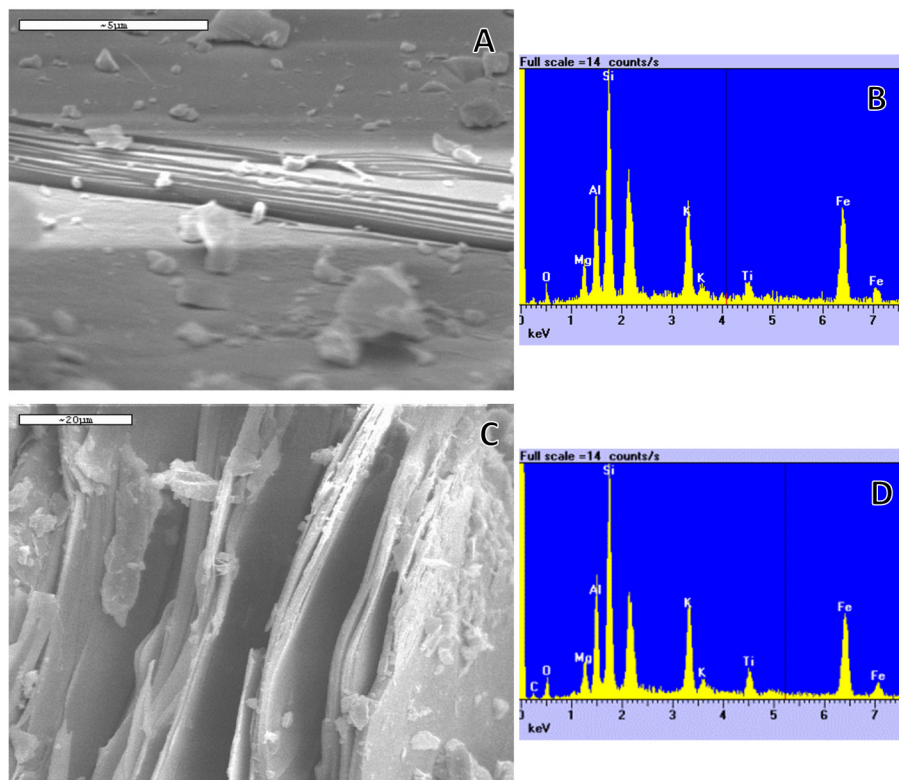


Figura 5.5. Imagen de MEB: A) biotita de granito de Los Santos de cantera, B) espectro de la imagen A, C) biotita de granito de Los Santos envejecida por HD y, D) espectro de la imagen en C.

Porosimetría de mercurio

Se ha realizado porosimetría de mercurio en muestras de cantera y muestras envejecidas por HD. Los resultados están recogidos en la Tabla 5.1.

En las muestras de vaugnerita el envejecimiento produce una disminución del valor de la porosidad total y la porosidad interparticular con respecto a los valores de cantera. Esto indica que parte de los poros se han cerrado o han quedado incomunicados, debido probablemente a una reorganización de los pequeños fragmentos de micas que se han roto con el envejecimiento. Asimismo, se mantiene constante el intervalo de diámetro del tamaño de poro, como puede verse en el histograma de distribución porosimétrica de la Figura 5.6.

Tabla 5.1. Valores del estudio de porosimetría de mercurio para las muestras de Calzadilla, Los Santos y Martinamor de cantera y envejecidas por HD.

| <i>Muestra</i> | <i>Características</i> | <i>AS (m²/g)</i> | <i>PT (%)</i> | <i>P Inter. (%)</i> |
|----------------|------------------------|-----------------------------|---------------|---------------------|
| Calzadilla | Cantera | 9,305E-04 | 0,5434 | 0,4537 |
| Calzadilla | HD | 1,027E-04 | 0,1843 | 0,1843 |
| Los Santos | Cantera | 2,660E-04 | 0,3970 | 0,3970 |
| Los Santos | HD | 3,287E-04 | 0,4112 | 0,4112 |
| Martinamor | Cantera | 1,006E-04 | 0,3629 | 0,3545 |
| Martinamor | HD | 1,049E-04 | 0,3261 | 0,3261 |

AS: Área superficial media. PT: Porosidad total. P Inter.: Porosidad Interpartícula.

En las muestras de granito de Los Santos y de leucogranito de Martinamor, el envejecimiento de HD produce un leve aumento del área superficial media, que en el caso del granito de Los Santos está acompañado por un aumento, también leve, de la porosidad total e interparticular. El efecto de este envejecimiento en esta variedad conlleva la ligera apertura de la porosidad interconectada con la superficie de las probetas. Sin embargo, en el leucogranito de Martinamor la porosidad total e interparticular descienden un poco (Figura 5.6).

Respecto al dominio de la micro o macroporosidad, todas las variedades tienden a acentuar aquel dominio al que pertenecían antes del envejecimiento, que en todos los casos es, claramente, el de la macroporosidad (mayor de 7,5 µm de diámetro de poro, apartado 2.4 de la presente memoria). En la Figura 5.6 se muestran los histogramas previos (en negro) y posteriores al envejecimiento por HD (rojo), observándose que en ninguna de las variedades cambia de dominio de porosidad tras el envejecimiento.

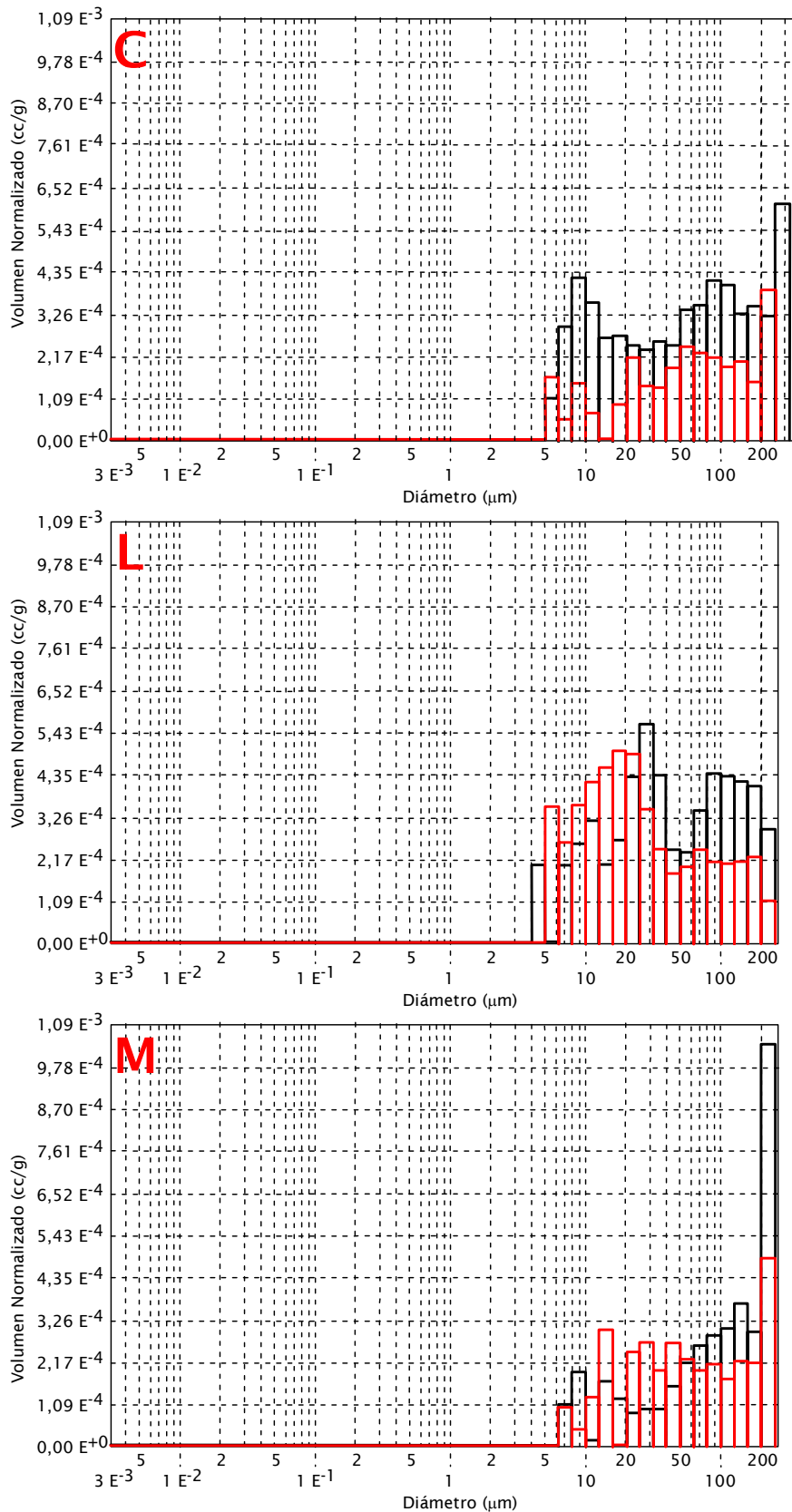


Figura 5.6. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos por porosimetría de mercurio de muestras de cantera (negro) y envejecidas por hielo-deshielo junto a frío/calor (rojo): C) vaugnerita de Calzadilla, L) granito de Los Santos y, M) leucogranito de Martinamor.

Dentro del mismo dominio y en el caso de las muestras de Los Santos, el envejecimiento hace que el máximo de la porosidad se desplace hacia la izquierda, hacia menores diámetros de poro, de modo que el envejecimiento por HD crea huecos más pequeños a costa de otros de mayor diámetro, al igual que ha descrito Iñigo (1995) para otras rocas plutónicas. Esto no se aprecia en las muestras de Calzadilla, donde se cierra la porosidad y en el caso de las muestras de Martinamor, se aprecia la misma tendencia, pero de modo muy sutil.

Propiedades petrofísicas determinadas al agua

Para conocer la forma en que este envejecimiento afecta a las rocas de cantera, se ha aplicado un Biplot Canónico (análisis 1), en el cual, las variables estudiadas son las siguientes propiedades determinadas al agua: porosidad total accesible al agua (PT) y libre (PL), Coeficiente de Absorción (CA), densidad real (DR) y aparente (DA), Coeficiente de Absorción Capilar (CAC) e imbibición (CI), y permeabilidad al vapor de agua (PER). Se han estudiado en las tres variedades de roca [vaugnerita de calzadilla (C), granito de Los Santos (L) y leucogranito de Martinamor (M)], determinándose datos en estado fresco (roca de cantera) y tras 25 ciclos de envejecimiento HD. Todos los valores de estas propiedades están recogidos en la Tabla II del ANEXO.

La aplicación de la técnica estadística multivariante Biplot Canónico a estos datos arroja un valor de la λ de Wilks de 2,8824 y un $p\text{-value} < 0,05$, claramente significativo. En la Figura 5.7 puede verse el gráfico resultante del primer plano factorial (ejes 1 y 2), que es el que mejor representa los resultados del análisis.

En el caso de las muestras de Los Santos y de Martinamor este envejecimiento no produce ningún cambio considerable en ninguna de las propiedades hídricas estudiadas, como puede deducirse de la Figura 5.7, donde se ve cómo las representaciones de las muestras de cantera (M y L) se solapan con las de roca envejecida (MHD y LHD, respectivamente). En las muestras de Calzadilla la densidad real y aparente no varían. El coeficiente de absorción aumenta, mientras que las variables porosidad total y libre, coeficiente de absorción capilar e imbibición, disminuyen. El descenso de los valores en estas variables se puede deber a la presencia de pequeñas placas de micas fracturadas que se desplazan, cerrando la porosidad interconectada con el exterior.

El hecho de que la variable permeabilidad no se vea representada por ningún vector en la Figura 5.7, nos indica que no influye en el análisis. Su variabilidad es cero, es decir, la permeabilidad de las rocas es la misma tanto en las muestras de cantera, como en aquellas envejecidas artificialmente por HD.

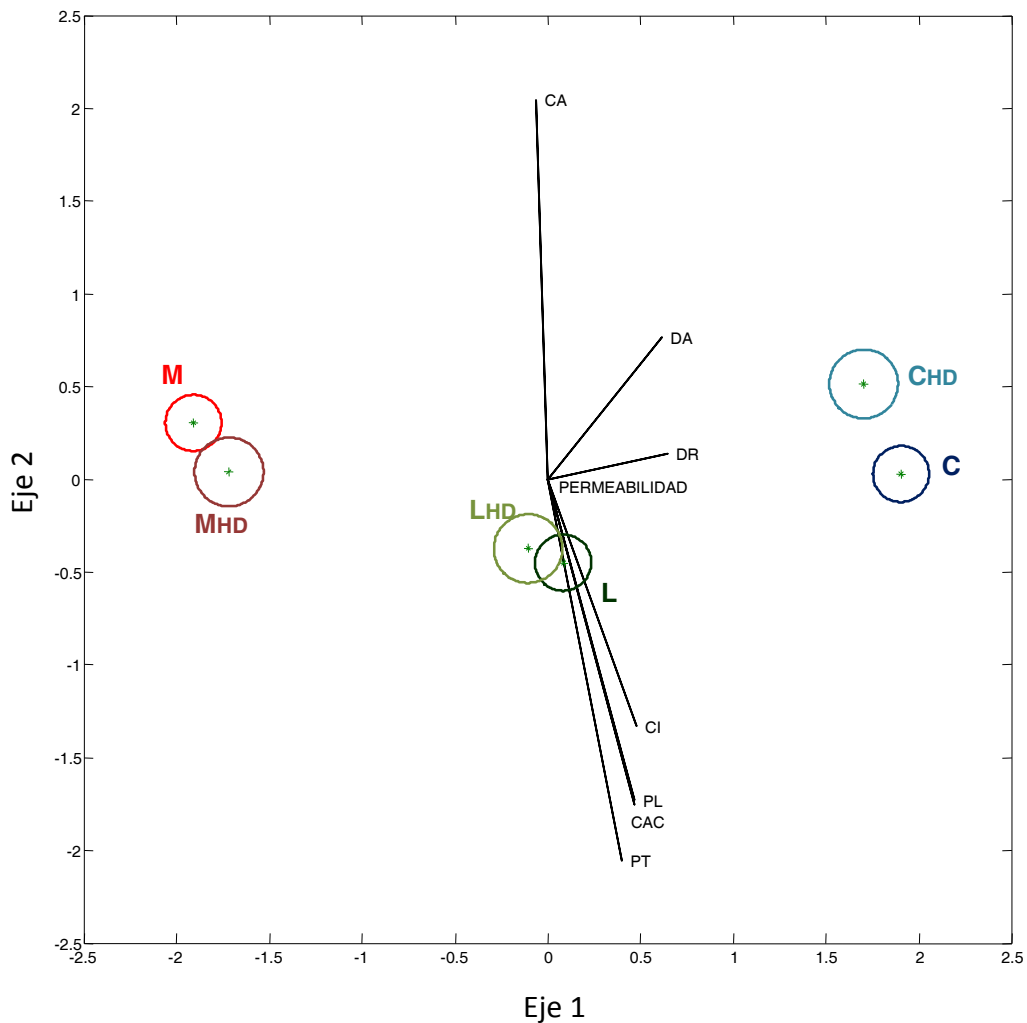


Figura 5.7. Plano 1-2 del Biplot Canónico (análisis 1) para la determinación de la durabilidad de la roca de cantera de las tres variedades estudiadas frente al envejecimiento por hielo/deshielo junto con frío/calor, mediante el estudio de las propiedades petrofísicas determinadas al agua.

Velocidad de propagación de ultrasonidos y color

Una herramienta más para determinar la forma en que éste y los otros envejecimientos afectan a las rocas de cantera es el estudio de la velocidad de propagación de los ultrasonidos a través de las tres direcciones del espacio (V_x , V_y y V_z), y de las coordenadas cromáticas del sistema de color recomendado por la CIE (1976) (L^* , a^* , b^*). Para ello, se toman medidas de estas variables antes y después de someter las probetas a los envejecimientos y con estos datos, se realiza un Biplot Canónico (análisis 2), obteniendo un valor de la λ de Wilks de 134,9404 y p -value < 0,001. En la Figura 5.8 puede verse el gráfico resultante de la proyección de los ejes 1 y 2. Los datos empleados están en la Tabla III del ANEXO.

Estudiaremos cada uno de los envejecimientos por separado, aunque el análisis 2 se haya realizado con los datos de todos los envejecimientos juntos.

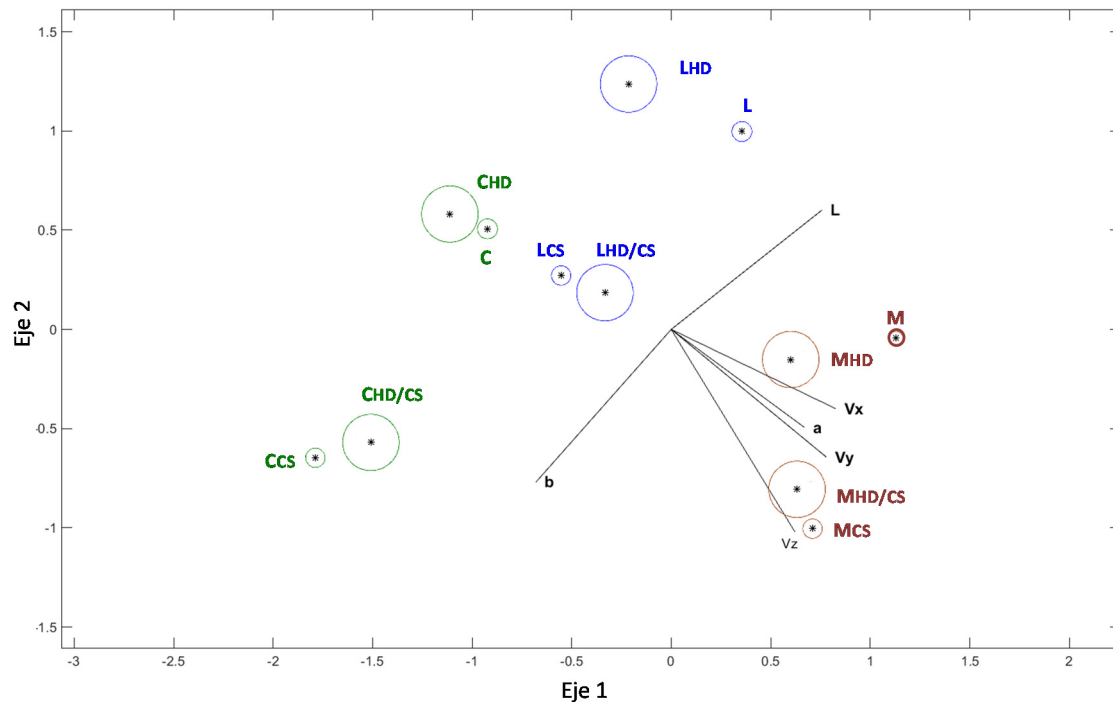


Figura 5.8. Plano 1-2 del Biplot Canónico (análisis 2) para la determinación de la durabilidad de la roca de cantera de las tres variedades estudiadas, frente a los distintos envejecimientos artificiales acelerados, mediante el estudio del color y la velocidad de propagación de ultrasonidos

El efecto del envejecimiento por HD produce en las muestras de Martinamor y Los Santos un descenso en la velocidad de propagación de los ultrasonidos (Figura 5.8 paso de M y L a MHD y LHD, respectivamente) que nos puede indicar que las muestras adquieren una mayor porosidad; es decir, se produce la apertura de los poros de menor tamaño para dar lugar a otros de mayor diámetro, lo que hace que aumente la porosidad directamente interconectada con la superficie (porosidad libre o abierta), haciendo que la velocidad de ultrasonidos de estas muestras sea menor, tal como describe Iñigo *et al.* (2000b).

En el caso de las muestras de Calzadilla, la velocidad de propagación desciende levemente en dos de las tres direcciones (Vx y Vy) y no hay variaciones en una dirección (Vz). Este fenómeno se puede deber, a que el envejecimiento de lugar a la formación de partículas muy pequeñas que pueden bloquear o cerrar parcialmente los poros que existían en las muestras de cantera, como ya han identificado Iñigo *et al.* (2000b), dando lugar a una estructura del material más conectada y con menos huecos.

A nivel cromático, las probetas de Martinamor y Los Santos se oscurecen, tienden al verde (L^* y a^* disminuyen) y amarillean (b^* aumenta). En el caso de las muestras de Calzadilla, no hay variaciones cromáticas importantes con el envejecimiento por HD de las probetas, salvo una ligera tendencia al verde (a^* disminuye) (paso de CC a CHD, Figura 5.8).

5.1.2 ENVEJECIMIENTOS CON CRISTALIZACIÓN DE SALES

En el caso de los envejecimientos con cristalización sales, bien sean sulfatos o una combinación de estos con envejecimiento de hielo/deshielo junto con frío/calor, la durabilidad de las rocas de cantera no se ha estimado mediante el estudio de las propiedades petrofísicas determinadas al agua, tal como se explica en el apartado 2.8 de la presente memoria. No obstante, se ha podido determinar mediante la observación de visu de las probetas, el estudio de las variaciones ponderales, de la velocidad de propagación de los ultrasonidos y del color (Biplot Canónico, análisis 2).

5.1.2.1 ENVEJECIMIENTO POR CRISTALIZACIÓN DE SULFATOS (CS)

Descripción de visu

Todas las rocas sometidas a este tipo de envejecimiento no muestran un deterioro apreciable durante el proceso, por lo que nos centramos en su estado al finalizar el ensayo, cuando muestran mayor deterioro (Figura 5.9). Este es más evidente en las muestras de Calzadilla, donde se puede observar pérdida de láminas de biotitas. También, en algunos casos, se generan pequeñas grietas, relacionadas con agregados de biotitas que continúan durante unos milímetros fuera del agregado de mica.

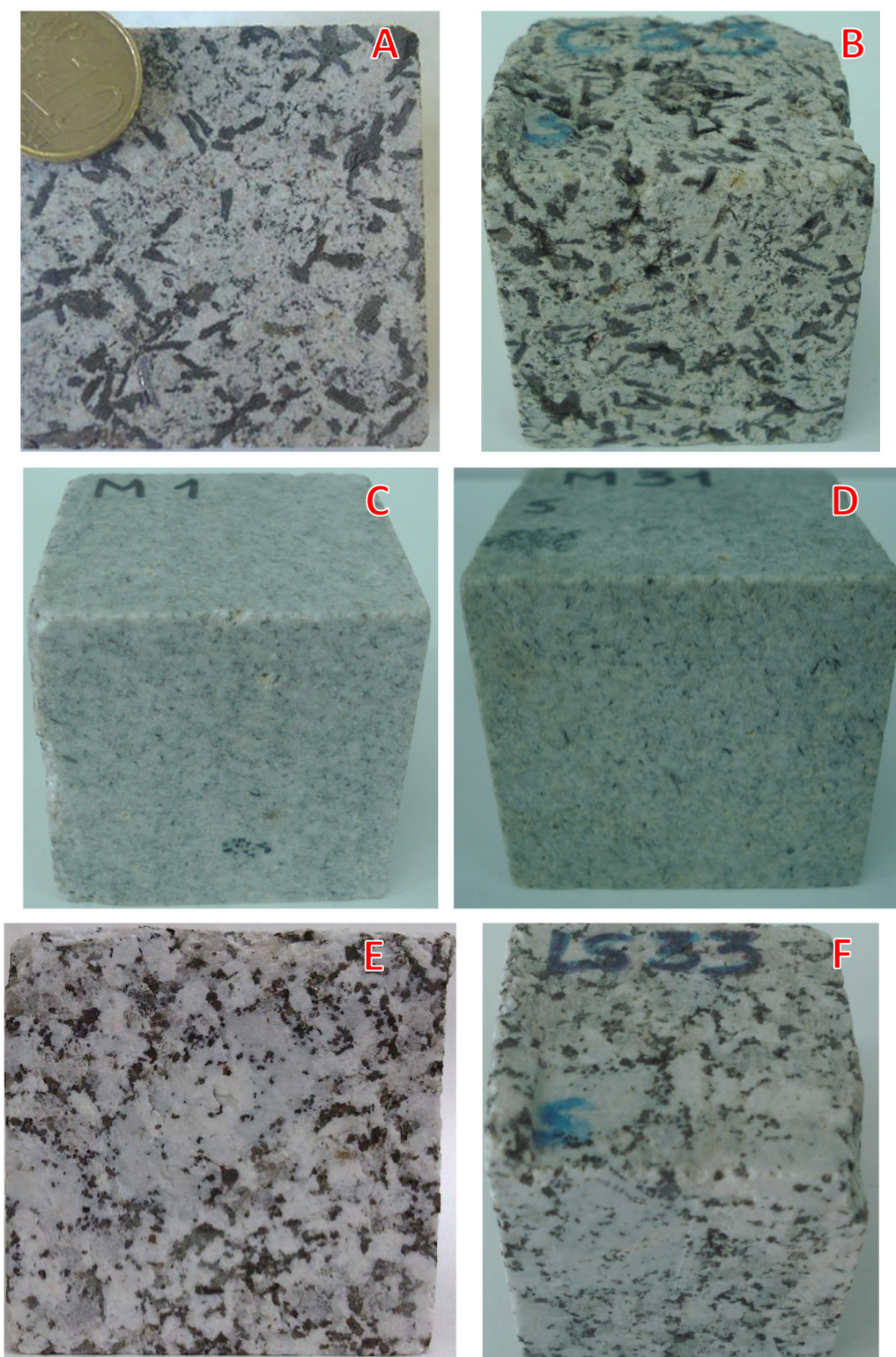


Figura 5.9. Probetas de cantera (A, C y E) y envejecidas por CS (B, D y F) de Calzadilla, Martinamor y Los Santos, respectivamente.

Aparte de esto, la superficie de las probetas envejecidas con sales, de todas las variedades, adquiere una cierta rugosidad al tacto, que no se apreciaba en las

muestras de cantera. De igual modo, en el granito de Los Santos se aprecia también la pérdida de algunas micas, pero en mucha menor medida que en las muestras de Calzadilla. Sin embargo, en las muestras de Martinamor, no se aprecia ningún signo de envejecimiento.

Variaciones ponderales

El envejecimiento acelerado por cristalización de sulfatos tras 50 ciclos, genera una pérdida de peso en las rocas de las tres variedades, como puede verse en la Figura 5.2.

Durante este envejecimiento las probetas tienen una etapa en la que aumentan de peso por la cristalización de sales en el interior de la red poral, por la evaporación del agua de las soluciones (Benavente, 2002). Esta fase dura hasta que la presión de cristalización de la fase mineral salina dentro del sistema poroso, uno de los mecanismos de degradación más importante de una roca, produce una variación en el sistema poroso de la roca que conlleva el movimiento y desprendimiento de granos (Benavente, 2002). Así se empieza a perder materia en forma de granos sueltos, haciendo que las probetas pierdan masa. Esto empieza, de forma acusada, en el caso de las muestras de Calzadilla y de Los Santos, después del ciclo 25; sin embargo, en las probetas de Martinamor, la pérdida de peso no es acusada. Para que el envejecimiento por cristalización de sulfatos llegue a afectar a estas rocas, serían necesarios más de los 50 ciclos de envejecimiento testados.

Microscopía electrónica de barrido

Se han observado mediante MEB las muestras tras el envejecimiento por CS. Las variedades de Calzadilla y Los Santos presentan biotitas abiertas, fracturadas y tapizadas o acompañadas por pequeños cristales de sulfato de sodio. Las plagioclasas están fracturadas y en esas fracturas están presentes, igualmente las sales de sodio (Figura 5.10 C y Figura 5.11 D). El cuarzo, en las muestras de Los Santos presenta superficies fracturadas y picoteadas (Figura 5.10 E).

Las muestras de Martinamor presentan sus minerales más íntegros. Como ejemplo, en la Figura 5.12 se muestra una imagen típica de pequeños cristales de sal tapizando sus plagioclasas.

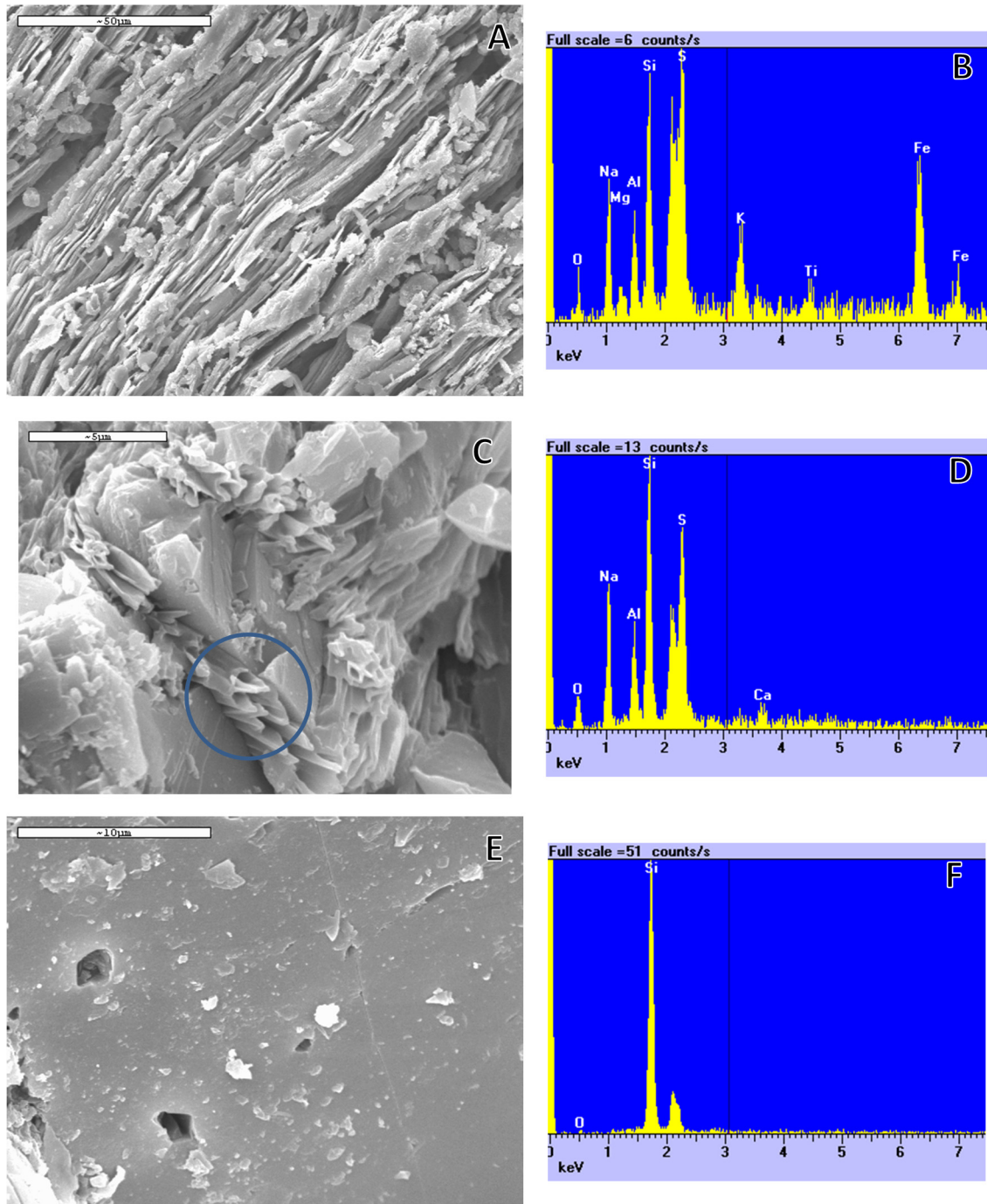


Figura 5.10. Imagen de MEB de minerales de una probeta de granito de Los Santos envejecida por CS. A: biotita deformada con sales de sulfato, B: espectro de la biotita de A, C: plagioclasa rodeada por cristales de sulfato de sodio (en el círculo), D: espectro de la imagen C, E: cristal de cuarzo picoteado y, F: espectro de la imagen E.

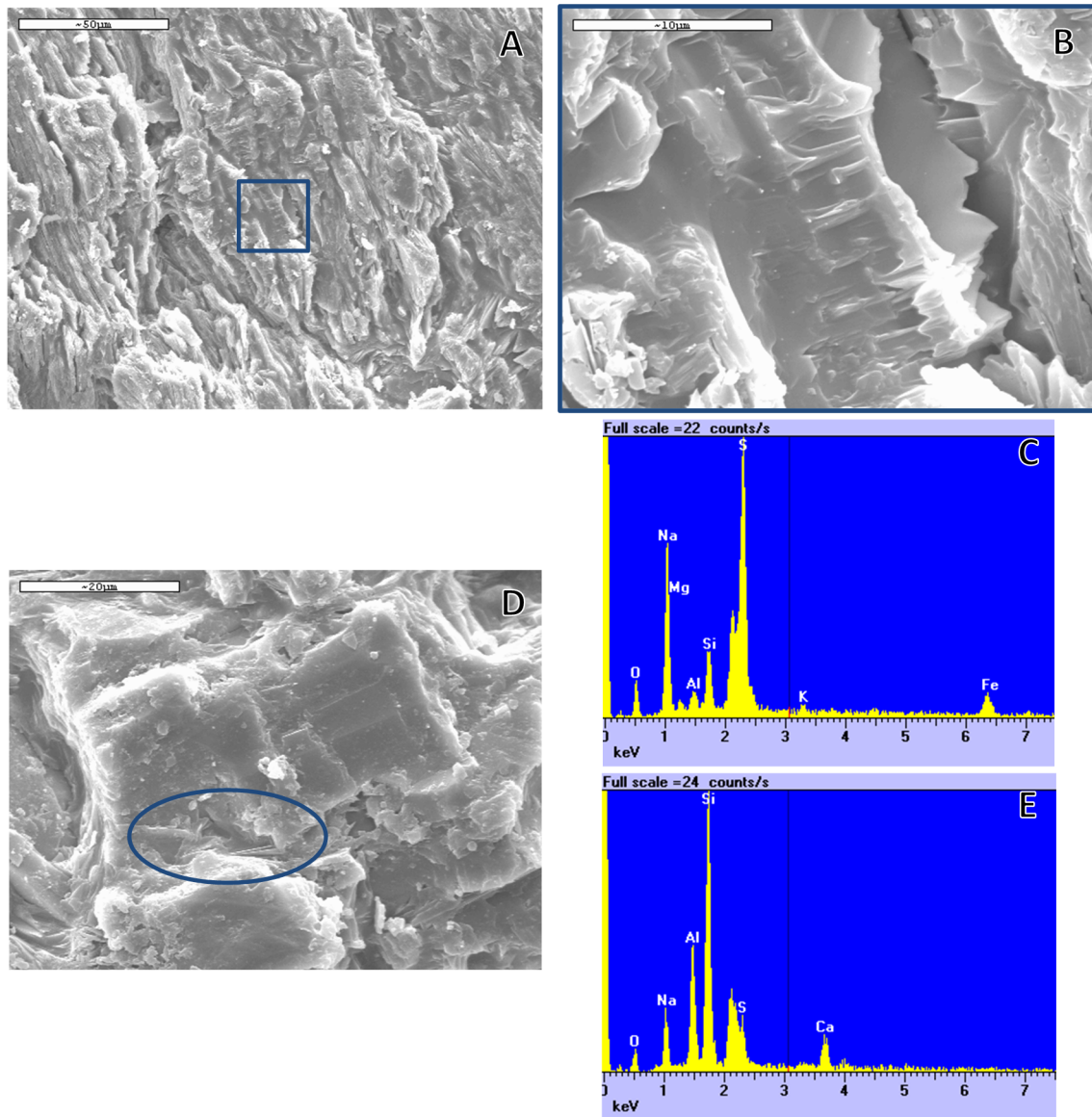


Figura 5.11. Imagen de MEB de minerales de una probeta de vaugnerita envejecida por CS. A: biotita con sales de sulfato, B: detalle de la biotita de A, C: espectro de la imagen en B, D: plagioclasa con cristales de sales de sulfato en el ovalo y, E: espectro de D.

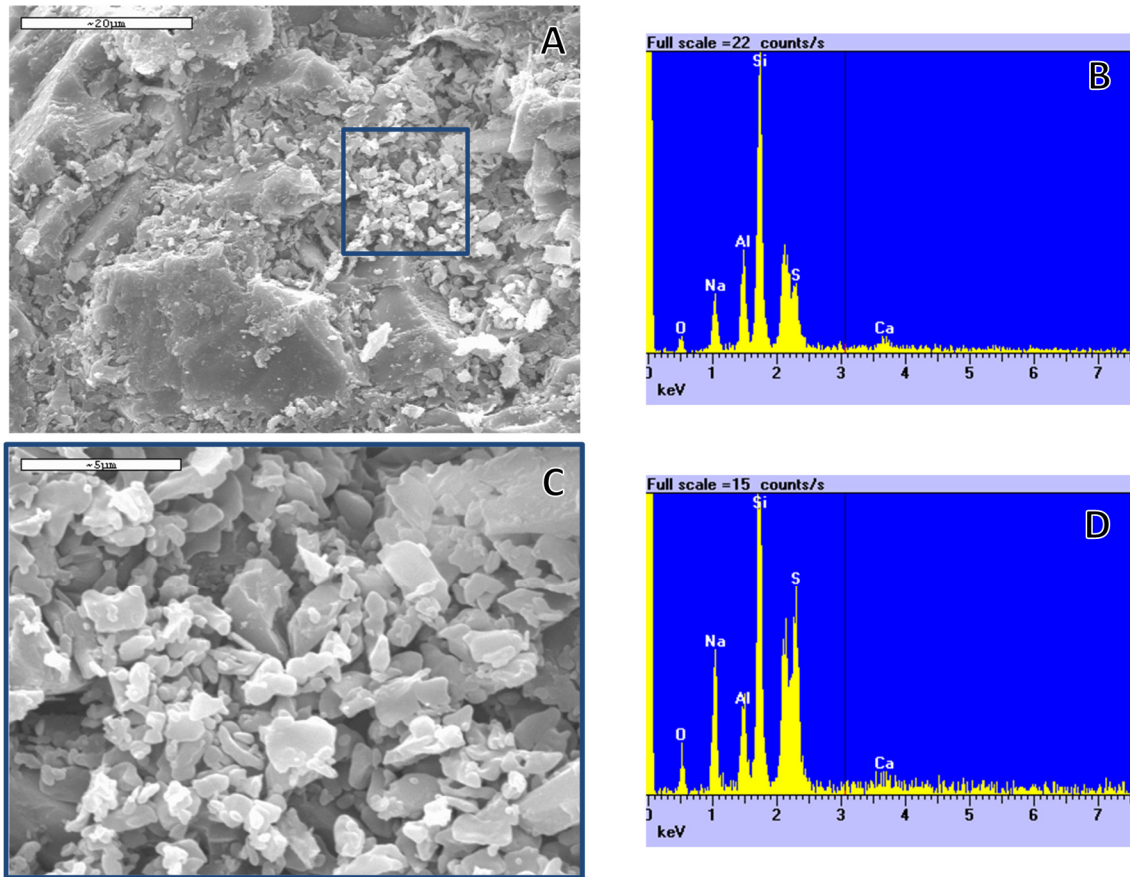


Figura 5.12. Imagen de MEB de minerales de una probeta de leucogranito de Martinamor envejecida por CS. A: plagioclasa tapizada con sales de sulfato, B: espectro de la imagen A, C: detalle de A con microcristales de sulfato de sodio y, D: espectro de la imagen en C.

Porosimetría de mercurio

Se ha realizado porosimetría de mercurio en muestras de cantera y muestras envejecidas por CS. Los resultados están recogidos en la Tabla 5.2 y en la Figura 5.13.

Tabla 5.2. Valores del estudio de porosimetría de mercurio para las muestras de Calzadilla, Los Santos y Martinamor de cantera y envejecidas por CS.

| <i>Muestra</i> | <i>Características</i> | <i>AS (m²/g)</i> | <i>PT (%)</i> | <i>PInter. (%)</i> |
|----------------|------------------------|-----------------------------|---------------|--------------------|
| Calzadilla | Cantera | 9,305E-04 | 0,5434 | 0,4537 |
| Calzadilla | CS | 2,123E-03 | 1,1584 | 1,1343 |
| Los Santos | Cantera | 2,660E-04 | 0,3970 | 0,3970 |
| Los Santos | CS | 2,355E-04 | 0,5955 | 0,5955 |
| Martinamor | Cantera | 1,006E-04 | 0,3629 | 0,3545 |
| Martinamor | CS | 1,339E-04 | 0,2694 | 0,2694 |

AS: Área superficial media. PT: Porosidad total. PInter.: Porosidad Interpartícula.

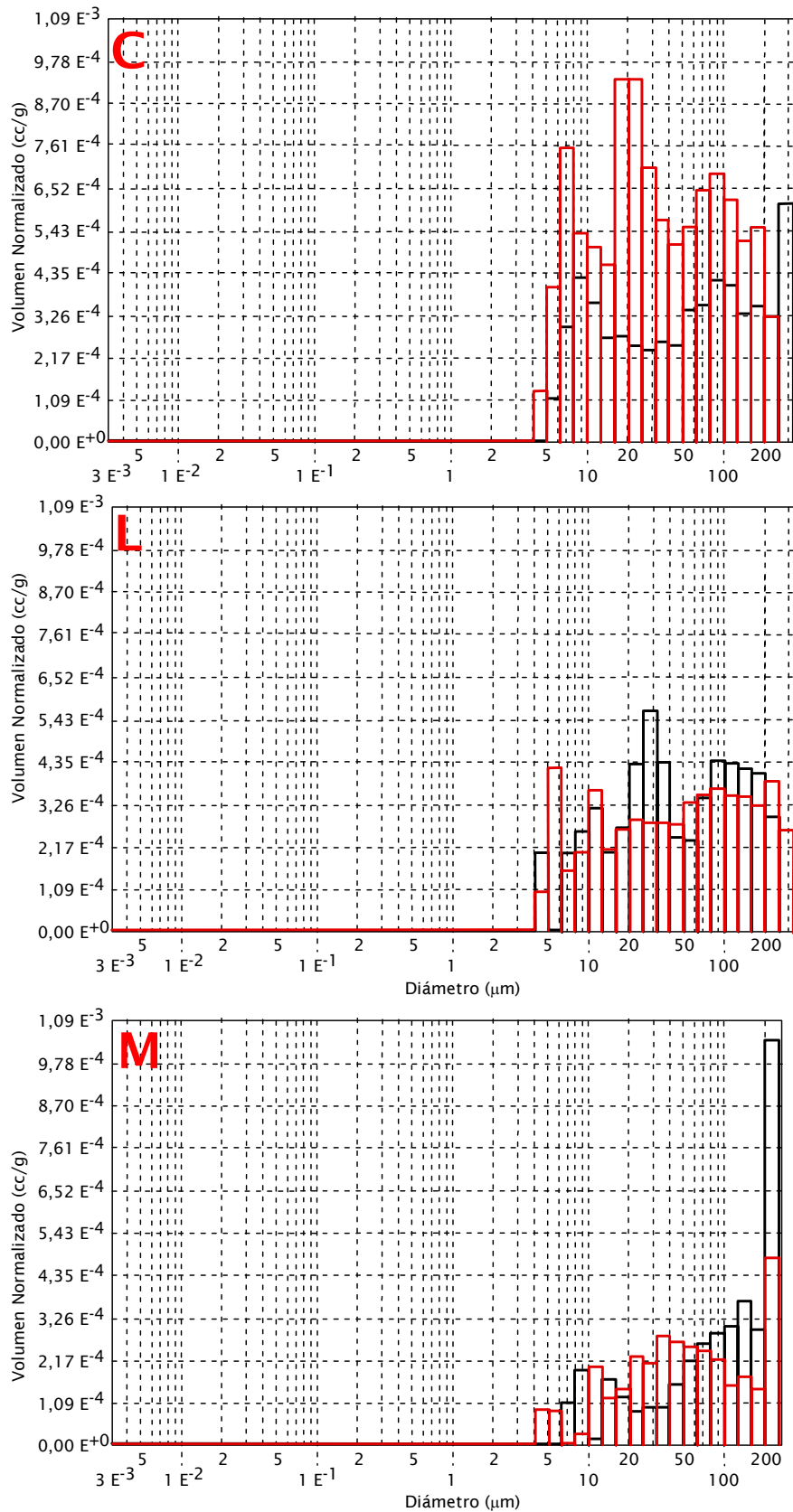


Figura 5.13. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos de muestras de cantera (negro) y envejecidas por cristalización de sulfatos (rojo). C: vaugnerita de Calzadilla. L: granito de Los Santos y, M: leucogranito de Martinamor.

En las muestras de vaugnerita el envejecimiento produce un aumento del valor de la porosidad total, la porosidad interparticular y del área superficial media con respecto a los valores de cantera. Sin embargo, en las muestras de leucogranito de Martinamor y de Granito de Los Santos el área superficial media varía muy poco, aumentando en las primeras y disminuyendo en las últimas. También oscilan poco los valores de porosidad total e interparticular, aumentando en las muestras de granito de Los Santos y disminuyendo en las de leucogranito de Martinamor. Estas diferencias entre las muestras de vaugnerita y los otros granitos pueden deberse a la presencia, en las primeras, de grandes agregados de micas, susceptibles de sufrir cambios de volumen importantes en presencia de soluciones acuosas, y por tanto de alterarse y romperse con más facilidad. En los granitos de Los Santos y Martinamor, la presencia de micas es menor, y por tanto, se alteran menos. Además, los sulfatos presentes en la solución acuosa cristalizan, formando sales que obstruyen la porosidad interconectada, haciendo que los valores de porosidad total e interconectada apenas varíen con respecto a los valores de cantera.

En los tres casos, el intervalo de diámetro de tamaño de poro se mantiene prácticamente igual, como puede verse en el histograma de distribución porosimétrica de la Figura 5.13. En general, se pierde porosidad de los diámetros mayores y se va creando mayor porosidad en la fracción de menor diámetro de poro.

Velocidad de propagación de ultrasonidos y color

El envejecimiento sobre las rocas de cantera produce un efecto dispar como puede verse en la Figura 5.8 (análisis 2). En las probetas de Martinamor, en la variable V_x no hay variación, mientras que en V_y y V_z aumenta la velocidad de propagación de ultrasonidos. Esto nos indica que puede haber cristales de sulfato presentes en los huecos obstruyendo y cerrando la porosidad. En las muestras de Calzadilla, la velocidad de propagación de ultrasonidos disminuye en V_x , permanece igual en V_y y aumenta en V_z , siendo muy difícil extraer conclusiones con respecto al estado de la porosidad tras el envejecimiento por CS. En el caso de las muestras de Los Santos, y debido a la pobre representación que el grupo de muestras LCS tiene en el plano 1-2 del Biplot Canónico, se ha analizado su comportamiento en el plano 1-3 (Figura 5.14), observando el descenso en la velocidad de propagación de ultrasonidos en todas las direcciones. Este descenso es compatible con la apertura de nueva porosidad o con la interconexión de la ya existente con el exterior de la superficie por efecto del envejecimiento.

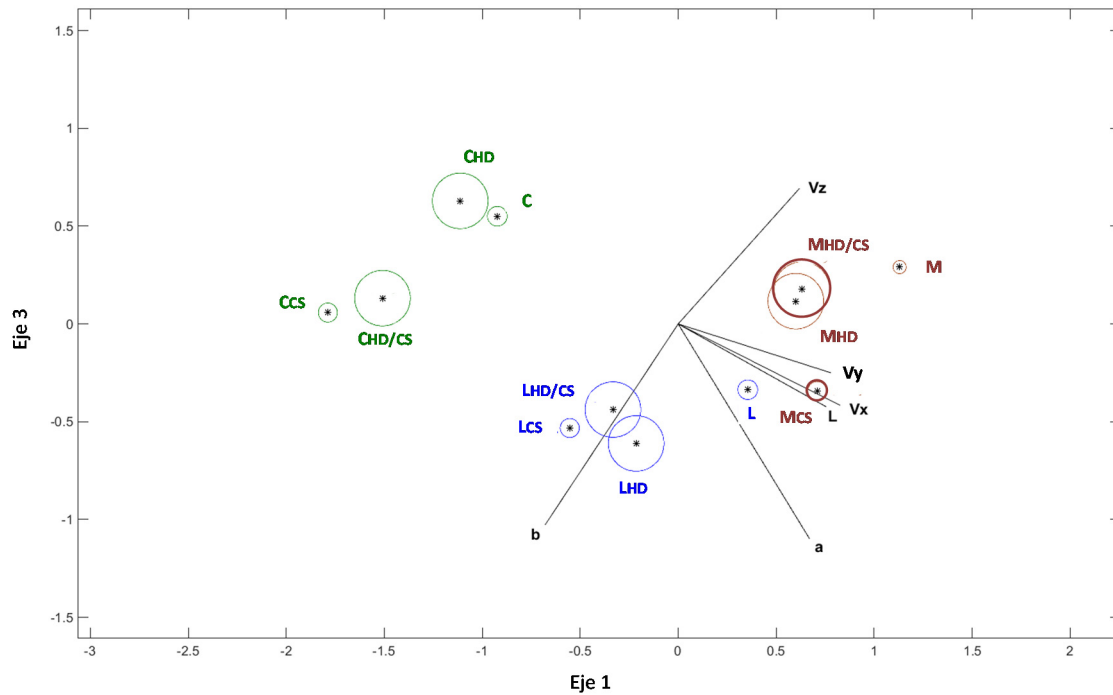


Figura 5.14. Plano 1-3 del Biplot Canónico (análisis 2) para la determinación de la durabilidad de la roca de cantera de las tres variedades estudiadas, frente a los distintos envejecimientos artificiales acelerados, mediante el estudio del color y la velocidad de propagación de ultrasonidos.

A nivel cromático, todas las variedades amarillean (b^* aumenta) y oscurecen (L^* disminuye), lo cual ya se puede ver en las comparaciones de visu (Figura 5.9). En cuanto a la variable a^* , en las probetas de Martinamor aumenta (enrojecen), en las de Los Santos disminuye (tienden al verde) y permanece estable en las de Calzadilla.

5.1.2.2 ENVEJECIMIENTO COMBINADO POR HIELO/DESHIELO JUNTO CON FRÍO/CALOR Y CRISTALIZACIÓN DE SULFATOS (HD+CS)

Descripción de visu

Tras los 25 ciclos de envejecimiento por HD+CS, las probetas más deterioradas son las de Calzadilla. En ellas principalmente se observan grietas y pérdida de masa pétreo, sobre todo en forma de pequeños trozos de láminas de biotitas (Figura 5.15), aparte de una cierta rugosidad al tacto que adquiere la superficie de las probetas, que no se apreciaba en las muestras de cantera. Las muestras de Los Santos y Martinamor adquieren la misma rugosidad al tacto y además, en el granito de Los Santos se aprecia también la pérdida de algunas micas, pero en mucha menor medida que en las

muestras de Calzadilla. En algunos casos, se aprecian manchas de alteración de minerales ricos en hierro, manchas de óxidos, como las que se aprecian en la Figura 5.15. D.

Variaciones ponderales

El envejecimiento combinado HD+CS tras 25 ciclos genera una pérdida de peso en todas las variedades, siendo en las muestras de Calzadilla la más acusada (Figura 5.2), indicando una intensa alteración de los materiales.

Microscopía electrónica de barrido

Las micas de las tres variedades (biotitas o moscovitas) se presentan abiertas y fracturadas, acompañadas de pequeños cristales de sulfato de sodio, pero en mucha menor cantidad que en los envejecimientos por CS (Figura 5.16, Figura 5.17 y Figura 5.18). Las plagioclasas y feldespatos están picoteados y no tan fracturados como en el envejecimientos por CS, encontrándose también menos cristales de sulfato de sodio tapizando su superficie.

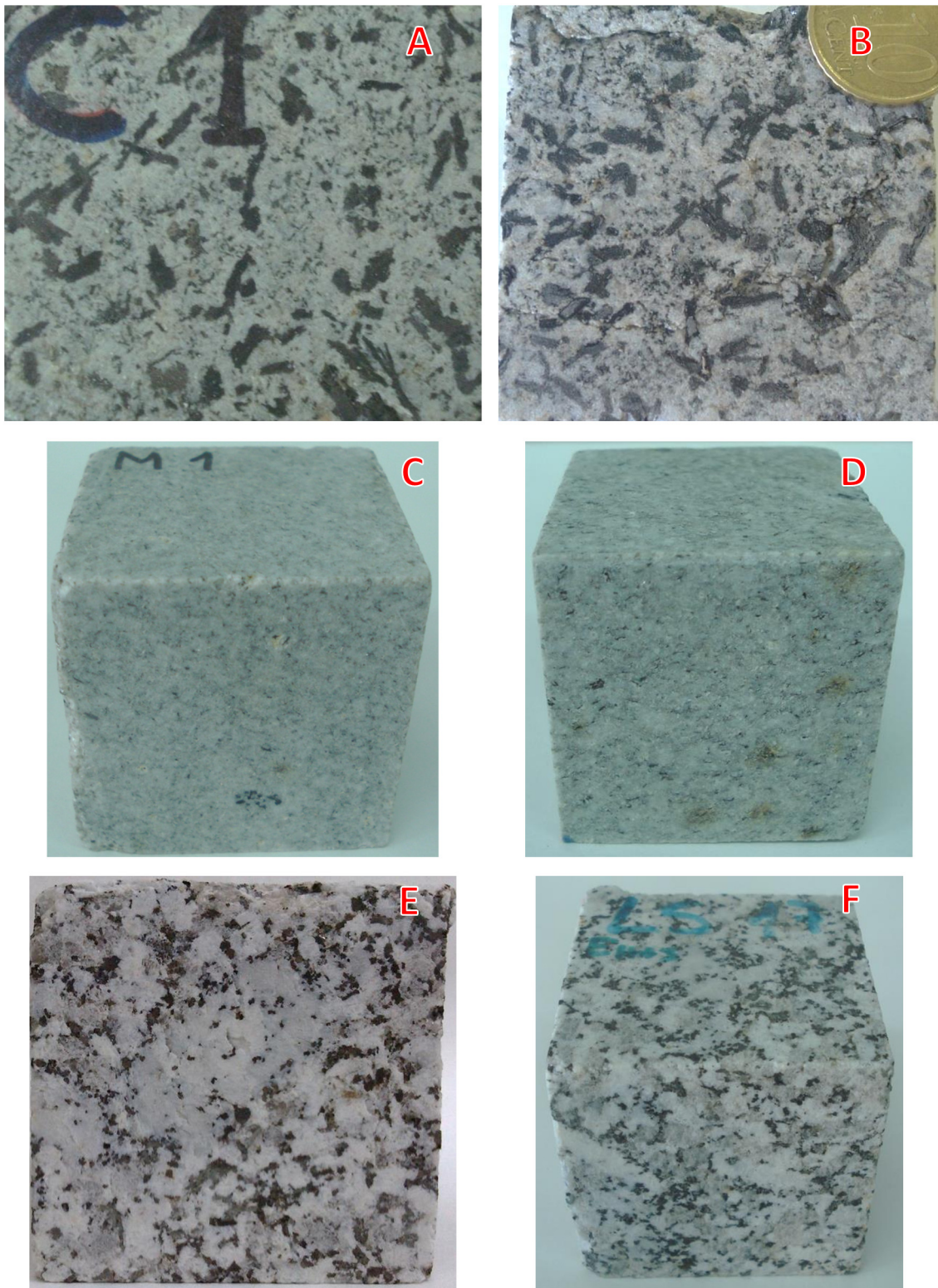


Figura 5.15. Probetas de cantera (A, C y E) y envejecidas por HD+CS (B, D y F) de Calzadilla, Martinamor y Los Santos, respectivamente.

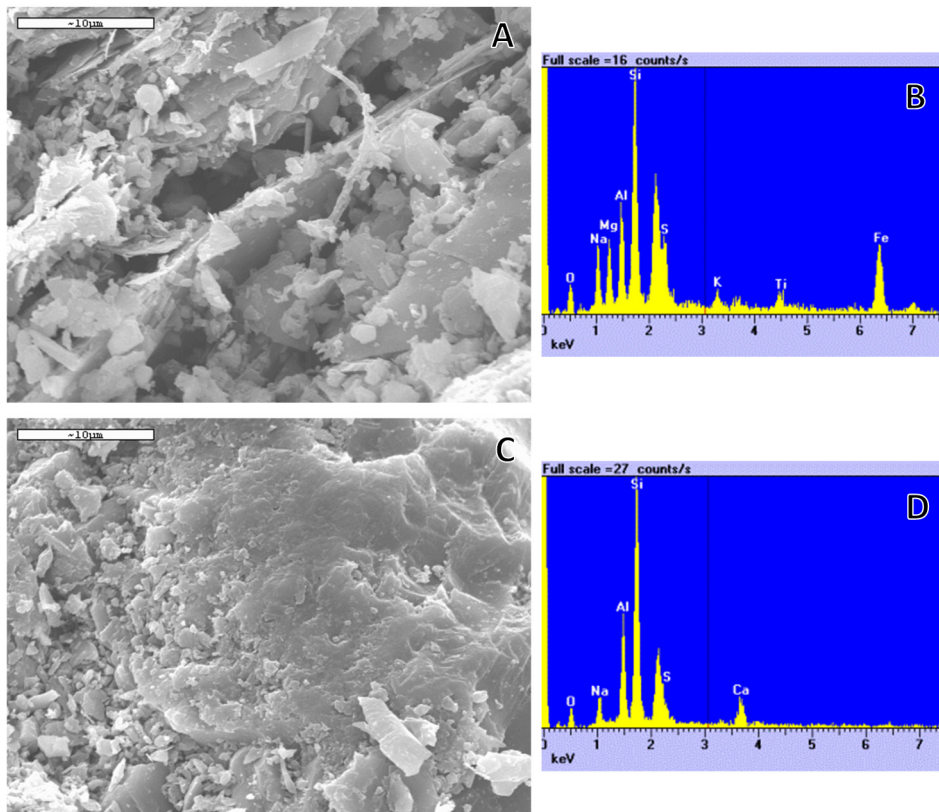


Figura 5.16. Imagen de MEB de minerales de vaugnerita envejecida por HD+CS. A: biotita, B: espectro de la imagen A, C: plagioclasa y D: espectro de la imagen C.

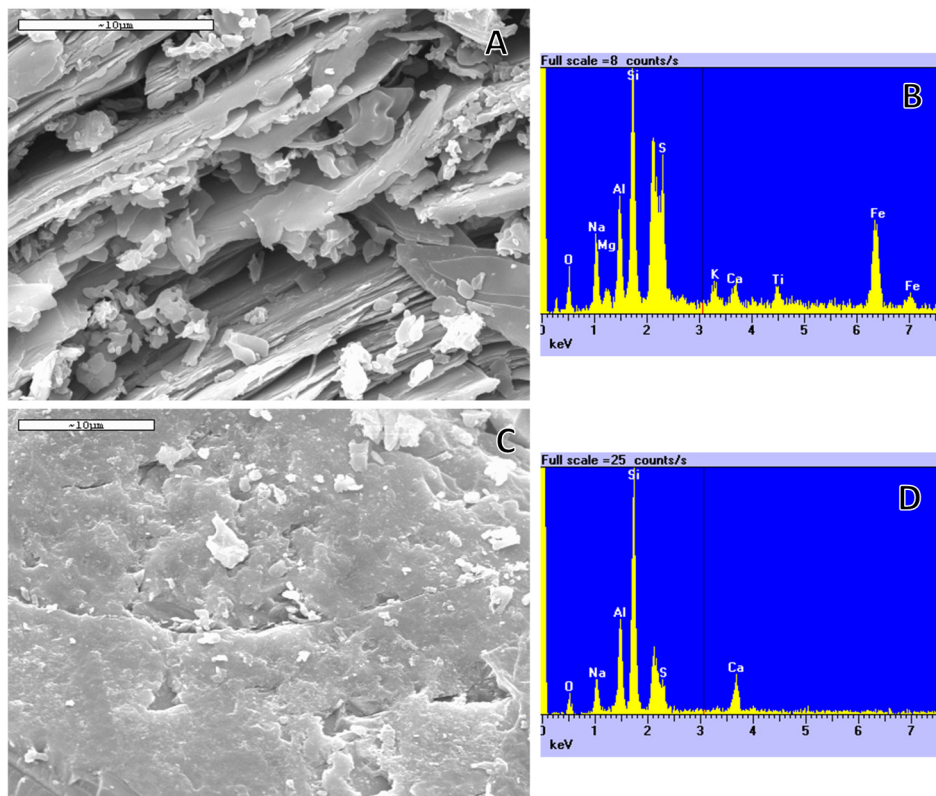


Figura 5.17. Imagen de MEB de minerales de granito de Los Santos envejecido por HD+CS. A: biotita, B: espectro de la imagen A, C: plagioclasa picoteada y D: espectro de la imagen C.

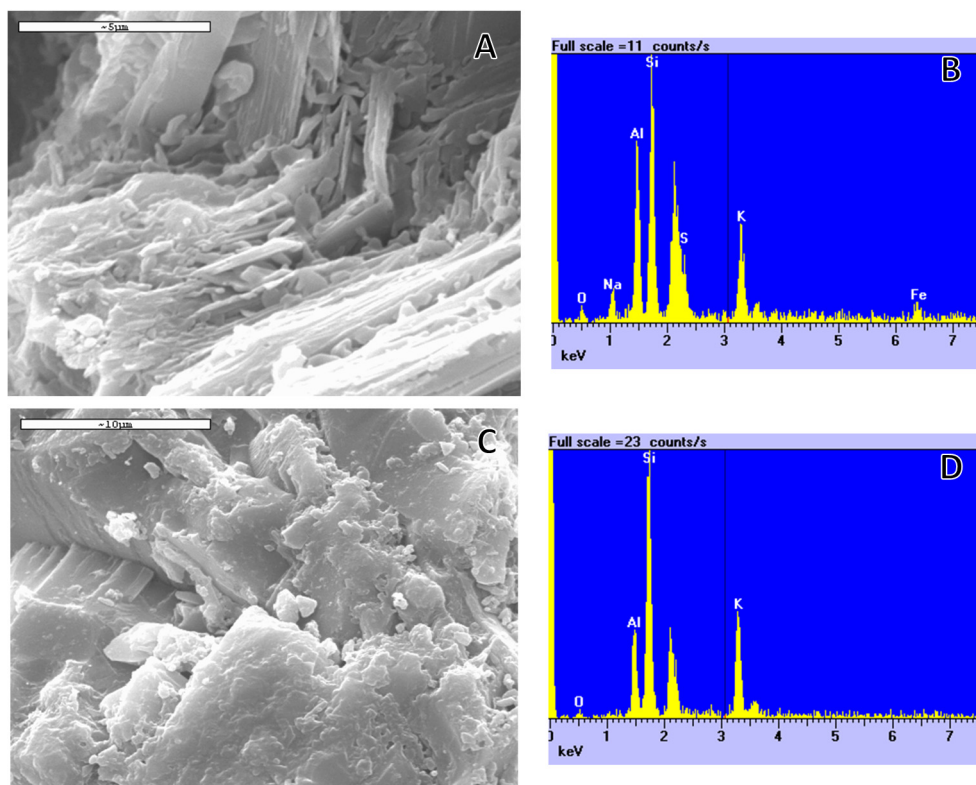


Figura 5.18. Imagen de MEB de minerales de leucogranito de Martinamor envejecido por HD+CS. A: moscovita, B: espectro de la imagen A, C: feldespato potásico y D: espectro de la imagen C.

Porosimetría de mercurio

Se ha realizado porosimetría de mercurio en muestras de cantera y muestras envejecidas por HD-CS. Los resultados están recogidos en la Tabla 5.3

Tabla 5.3. Valores del estudio de porosimetría de mercurio para las muestras de Calzadilla, Los Santos y Martinamor de cantera y envejecidas por HD+CS.

| Muestra | Características | AS (m ² /g) | PT (%) | PI _{inter.} (%) |
|------------|-----------------|------------------------|--------|--------------------------|
| Calzadilla | Cantera | 9,305E-04 | 0,5434 | 0,4537 |
| Calzadilla | HD+CS | 1,041E-04 | 0,2410 | 0,2410 |
| Los Santos | Cantera | 2,660E-04 | 0,3970 | 0,3970 |
| Los Santos | HD+CS | 2,707E-04 | 0,5246 | 0,5246 |
| Martinamor | Cantera | 1,006E-04 | 0,3629 | 0,3545 |
| Martinamor | HD+CS | 3,072E-04 | 0,4039 | 0,3970 |

AS: Área superficial media. PT: Porosidad total. PI_{inter.}: Porosidad Interpartícula.

En las muestras de Calzadilla, y al igual que sucede en el envejecimiento por HD, se produce una disminución del valor del área superficial media, de la porosidad total y la porosidad interparticular con respecto a los valores de cantera, indicando el cierre parcial de los poros, por partículas de minerales, o la incomunicación de los mismos. Así mismo, se mantiene constante el intervalo de diámetro del tamaño de poro, como puede verse en el histograma de distribución porosimétrica de la Figura 5.19.

En las muestras de granito de Los Santos y leucogranito de Martinamor, el envejecimiento de HD+CS produce un leve aumento del área superficial media, de la porosidad total y de la porosidad interparticular, indicando la apertura de la porosidad interconectada con la superficie de las probetas.

En la Figura 5.19 se muestran los histogramas previos (en negro) y posteriores (rojo) al envejecimiento por HD+CS. Respecto al dominio de la porosidad, todas las variedades tienden a permanecer en el mismo dominio al que pertenecían antes del envejecimiento, el de la macroporosidad (mayor de $7,5 \mu\text{m}$ de diámetro de poro). Las variedades de Calzadilla y Los Santos permanecen estrictamente en el mismo dominio tras el envejecimiento, mientras que la variedad de Martinamor, acorta el dominio a un intervalo de diámetro de poro superior a $10 \mu\text{m}$.

Velocidad de propagación de ultrasonidos y color

El comportamiento de las rocas de cantera sometidas a este envejecimiento es similar al de aquellas envejecidas por cristalización de sulfatos; de hecho, en el caso de las muestras de Los Santos el comportamiento, estudiado de nuevo en el plano 1-3 (Figura 5.14) es idéntico, descendiendo la velocidad de propagación de ultrasonidos en todas las direcciones. En las otras variedades, se sigue la misma tendencia, siendo en este caso más acusada la tendencia a la invariabilidad de la velocidad de propagación de ultrasonidos (Figura 5.8). Aun así, hay casos en los que dichas velocidades aumentan (V_z en el paso de C y M a CHD/CS y MHD/CS, respectivamente, y V_y en C a CHD/CS). De igual forma, produce un oscurecimiento (L^* disminuye) y amarilleamiento (b^* aumenta) de las probetas. En la variable a^* , sólo se producen cambios en el caso de las muestras de Los Santos, que tienden al verde (disminuye).

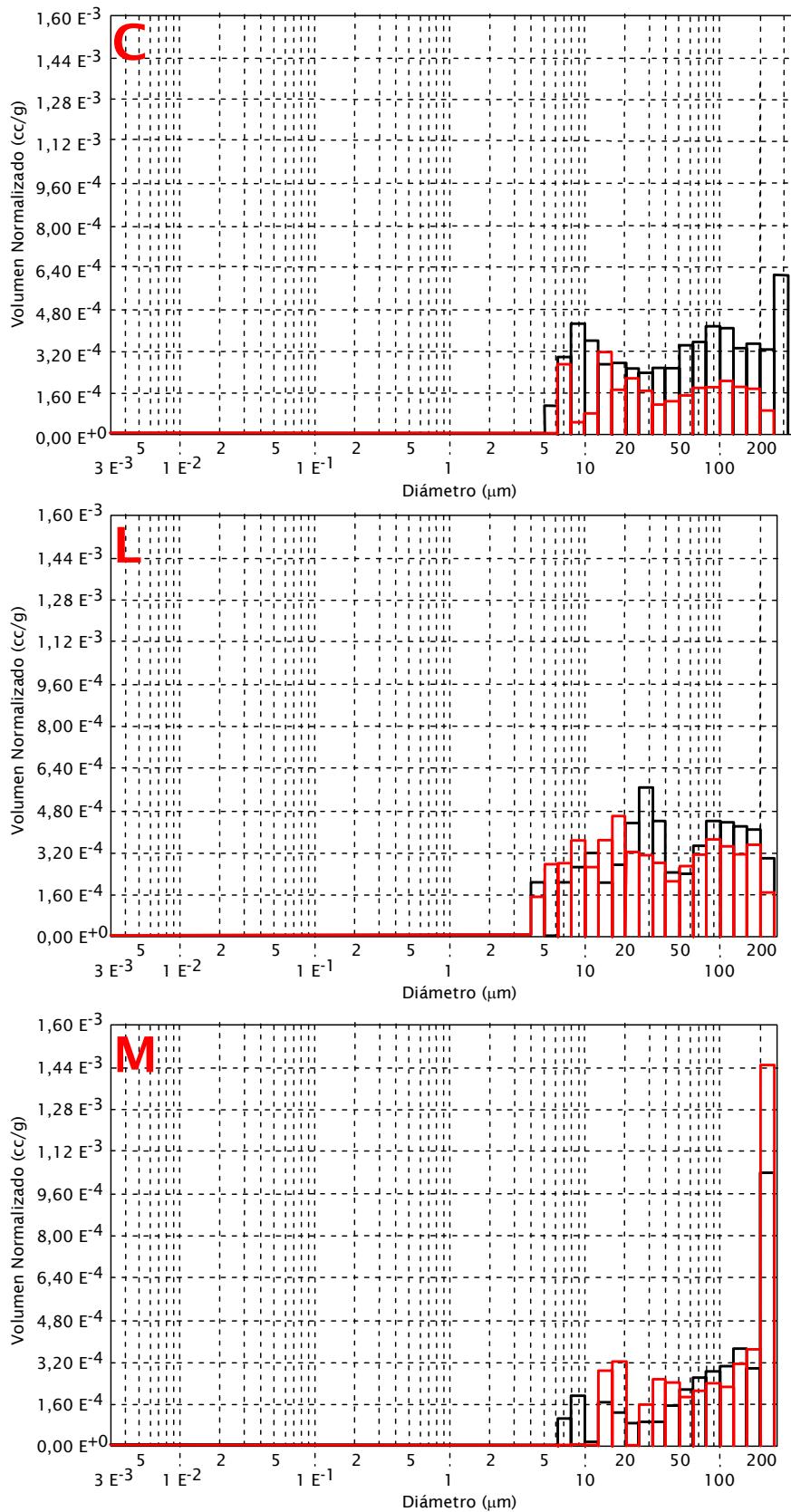


Figura 5.19. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos de muestras de cantera (negro) y envejecidas por HD+CS (rojo). C: vaugnerita de Calzadilla. L: granito de Los Santos y, M: leucogranito de Martinamor.

Tras estudiar los tres envejecimientos y comparativamente se puede concluir que las rocas más sensibles, a simple vista, a efectos de los envejecimientos acelerados, son las vaugneritas de Calzadilla, seguidas por los granitos de Los Santos y, por último, los leucogranitos de Martinamor, que permanecen muy estables frente a cualquier envejecimiento.

De *visu*, el proceso que más degrada las probetas es el envejecimiento por cristalización de sulfatos (CS, 50 ciclos), seguido del combinado por hielo/deshielo junto con frío/calor y cristalización de sulfatos (HD+CS, 25 ciclos), y por último, el envejecimiento acelerado por hielo/deshielo junto con frío/calor (HD, 25 ciclos), que es el que menos muestras de alteración da en las probetas de las tres variedades.

Desde el punto de vista del estudio de las propiedades hídricas, de los tres envejecimientos ensayados, los que más alteraciones producen en las variables estudiadas son el envejecimiento HD/CS y el envejecimiento por CS. El menos agresivo sería el envejecimiento por HD.

Posiblemente, y de forma general, el más agresivo sea el envejecimiento combinado hielo/deshielo junto con frío/calor y cristalización de sales, ya que en el caso de las muestras de Calzadilla y Los Santos, produce efectos similares a los producidos en el envejecimiento por cristalización de sulfatos, pero con la mitad de ciclos. Y en el caso de las muestras de Martinamor genera mayor porosidad que el envejecimiento por cristalización de sulfatos. A esta misma conclusión ya llegaron autores como Iñigo *et al.* (2000a); Iñigo *et al.* (2013), tras el estudio de varios envejecimientos artificiales sobre rocas graníticas, llegando también a la conclusión de que la acción sinérgica de distintos factores de alteración (en este caso, la cristalización de sales unido al hielo/deshielo junto con frío/calor) potencia notablemente el deterioro producido por cada uno de ellos por separado.

5.2 DETERMINACIÓN DE LA EFICACIA DE LOS TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

Tal como se recoge en el apartado 2.1 de la presente memoria, las rocas de cantera (C) se han sometido a distintos tratamientos de conservación (hidrofugante H224, consolidante RC70 y consolidante + hidrofugante RC80), cuya eficacia se evalúa mediante el control de las siguientes variables: su aspecto, las variaciones ponderales, las variaciones en las propiedades petrofísicas al agua y las variaciones en la velocidad de propagación de ultrasonidos y del color.

Por otra parte, como se describió en el apartado 2.1 de esta memoria, se aplican tratamientos de conservación a las rocas de «cantera con sales» (CS) de las variedades de Calzadilla y de Los Santos. En este caso, y a tenor de los resultados obtenidos en el envejecimiento por CS (apartado 4.1), no se emplean muestras de Martinamor para comprobar la eficacia de los tratamientos de conservación sobre rocas CS, debido a la escasa alteración que presentan estas probetas tras los ciclos de envejecimiento por CS.

Previo a la aplicación de los tratamientos de conservación, se realizó el procedimiento de limpieza de las probetas envejecidas por CS, mediante la desalación por cataplasmas de sepiolita, método no agresivo para los sustratos pétreos. Tras la desalación, y de igual modo que las rocas de cantera, a las rocas de «cantera con sales» de las variedades de vaugnerita y granito de Los Santos se les aplican los distintos tratamientos de conservación, cuya eficacia se evalúa mediante el control de las siguientes variables: su aspecto, las variaciones ponderales y las variaciones en la velocidad de propagación de ultrasonidos y del color. Al igual que sucede en el control de la durabilidad de la roca de cantera tras los envejecimientos que conllevan sales, no se emplea la variación de las propiedades petrofísicas al agua para determinar la eficacia de los tratamientos de conservación sobre estas rocas.

5.2.1 LIMPIEZA

Se ha realizado el proceso de desalación de las probetas envejecidas por cristalización de sulfatos para obtener las muestras CS, según el protocolo descrito en el apartado 2.9.1 de la presente memoria.

El proceso de desalación de estas probetas, mediante el uso de cataplasmas de sepiolita, retira la mayoría de las sales presentes en la primera aplicación de sepiolita, tal como podemos observar en el gráfico que enfrenta el contenido en sulfatos en las cataplasmas con cada una de las extracciones (Figura 5.20), resultado similar a los obtenidos por Trujillano *et al.* (1995) con otras variedades graníticas. También se observa que el contenido en sales extraído en las muestras de Martinamor es mucho menor que el de las muestras de las otras variedades, lo que apunta a que, como cabía esperar por su baja porosidad, la absorción de sales y en consecuencia, el contenido en sales de estas muestras es también mucho menor que en el caso de muestras de Calzadilla o de Los Santos, pese a haber sido envejecidas por cristalización de sales del mismo modo. Trujillano *et al.* (1995) describen un efecto similar en otras rocas graníticas, donde el comportamiento de las distintas variedades ante la desalación con cataplasmas no es igual para todas las variedades líticas, sino que está en parte,

condicionado por la porosidad del material, de modo que a mayor porosidad mayor capacidad de acumulación de sales.

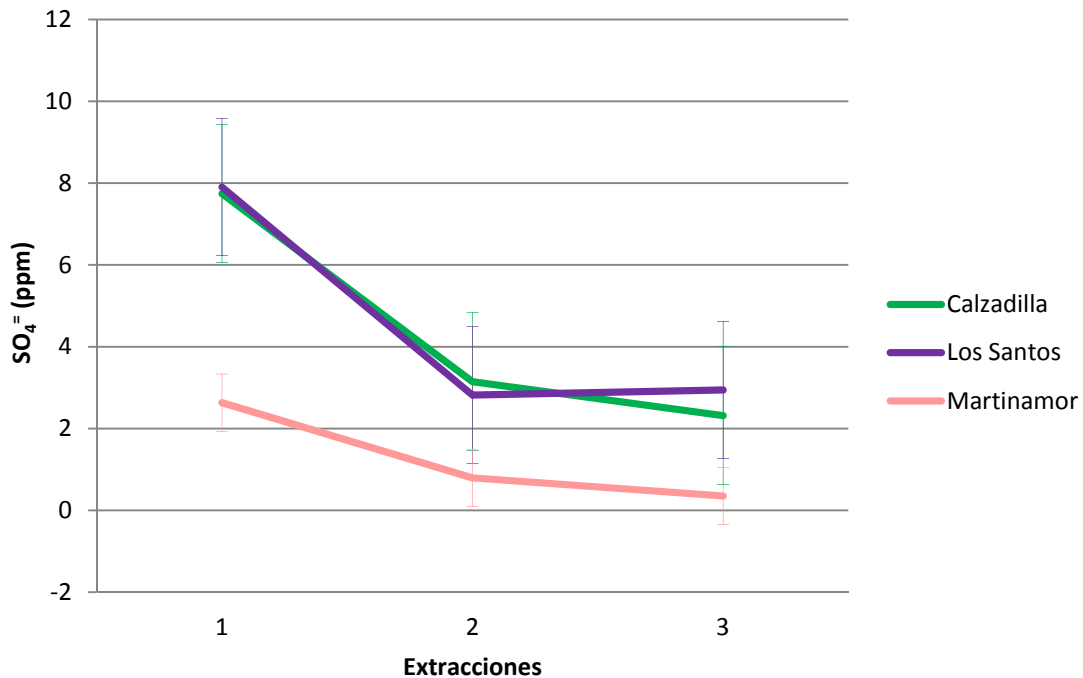


Figura 5.20. Contenido en ion sulfato (ppm) medio en las cataplasmas de sepiolita tras cada una de las tres extracciones en las tres variedades de roca. Las barras verticales de cada punto representan el error típico de la media.

Así pues, una vez que se han extraído la mayoría de las sales presentes en las rocas envejecidas por CS, éstas quedan aptas para someterlas a tratamientos de conservación, al igual que las probetas de rocas de cantera.

5.2.2 HIDROFUGACIÓN

El tratamiento de hidrofugación empleado para la protección del material es el H224, y su aplicación se realizó conforme a lo descrito en el apartado 2.9.3 de la presente memoria, aplicándolo a las tres variedades en las muestras de cantera y las variedades de Calzadilla y Los Santos en las muestras CS.

Descripción de visu

En ninguna de las rocas de cantera y CS sometidas a este tratamiento se aprecia ningún cambio durante el proceso de aplicación, ni tras el mismo (Figura 5.21 y Figura 5.22), haciendo que este sea un tratamiento bastante idóneo desde el punto de vista estético, pues no altera la apariencia externa del material, tanto si es de cantera, como si ya presenta sales.

Variaciones ponderales

El estudio de las variaciones de peso se lleva a cabo de la misma forma que en el estudio de la durabilidad de la roca de cantera, determinando la diferencia de peso, en gramos, entre el peso de la probeta después y antes de cada tratamiento, en este caso.

En las Figura 5.23 y Figura 5.24 está representada la variación ponderal de las muestras (cantera y CS) con los distintos tratamientos de conservación testados: hidrofugación (H224), consolidación (RC70) y consolidación + hidrofugación (RC80).

Con la aplicación del hidrofugante todas las probetas de cualquier variedad, de cantera o CS, ganan peso (Figura 5.23 y Figura 5.24). La ganancia es mucho menor que si se aplican otros tratamientos, lo que puede estar condicionado por el método de aplicación (pincel en lugar de inmersión total de las probetas en el producto). También se observa una mayor ganancia de peso en las muestras de CS que en las de cantera al tratarlas con H224, lo cual puede deberse a que las primeras están más alteradas y, en consecuencia, absorben más producto, al disponer de una mayor porosidad.

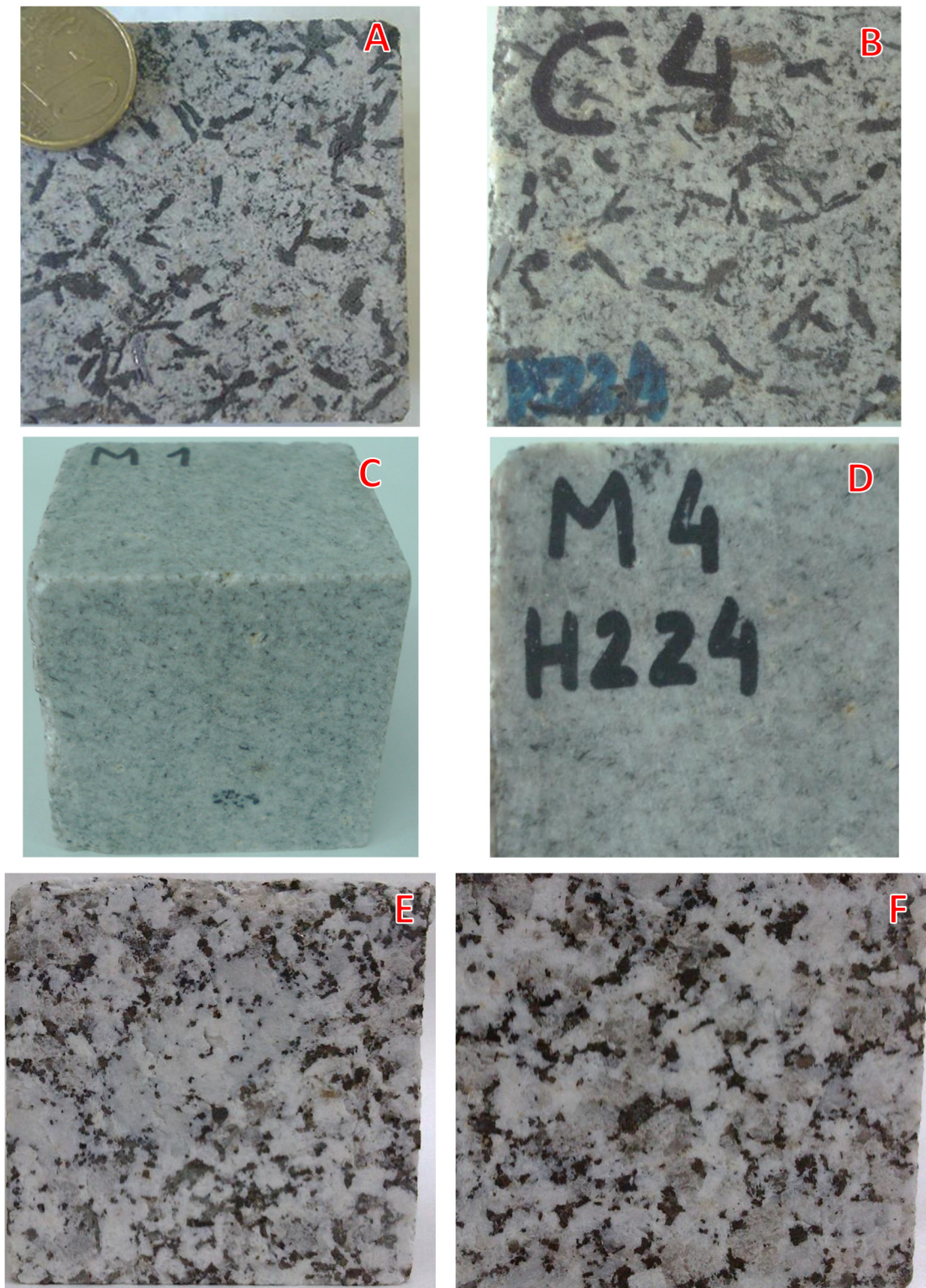


Figura 5.21. Probetas de cantera (A, C y E) y tratadas con H224 (B, D y F) de Calzadilla, Martinamor y Los Santos, respectivamente.

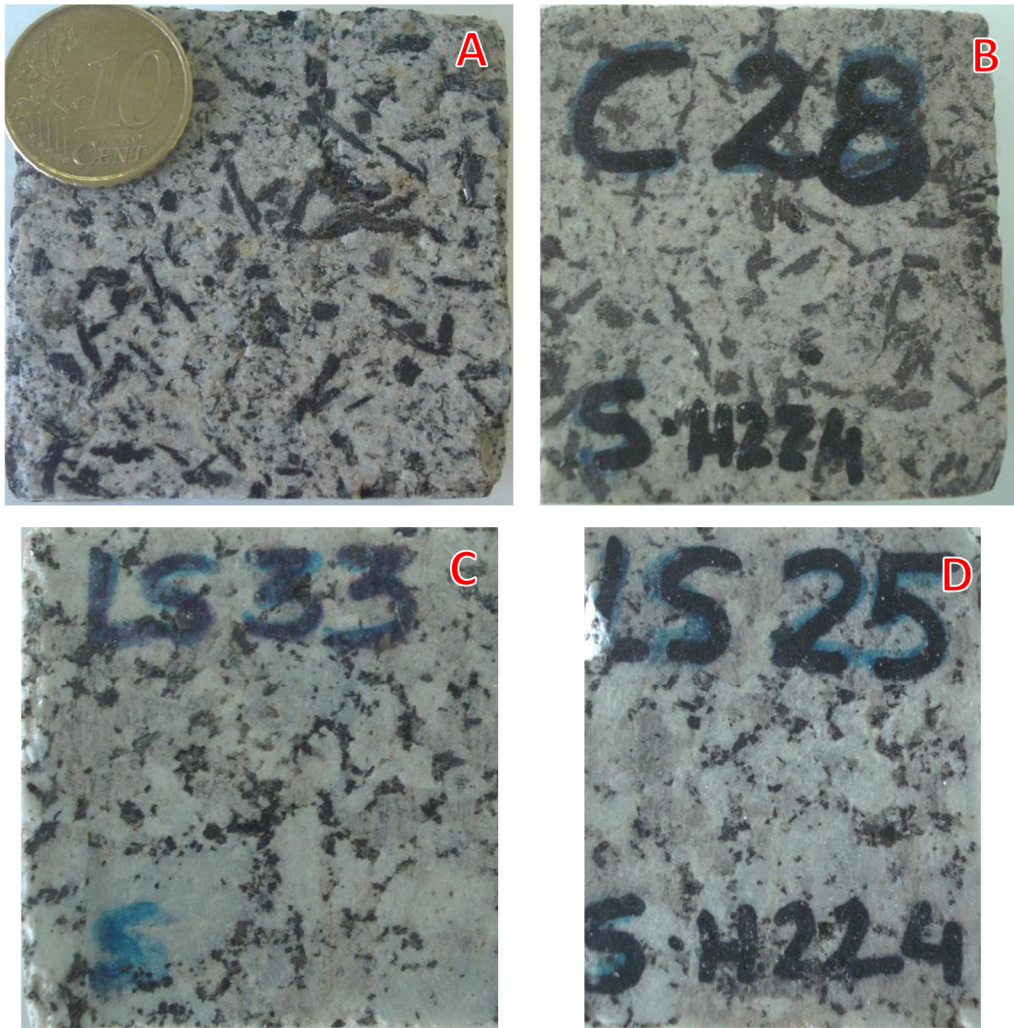


Figura 5.22. Probetas CS (A y C) y después tratadas con H224 (B y D) de Calzadilla y Los Santos, respectivamente.

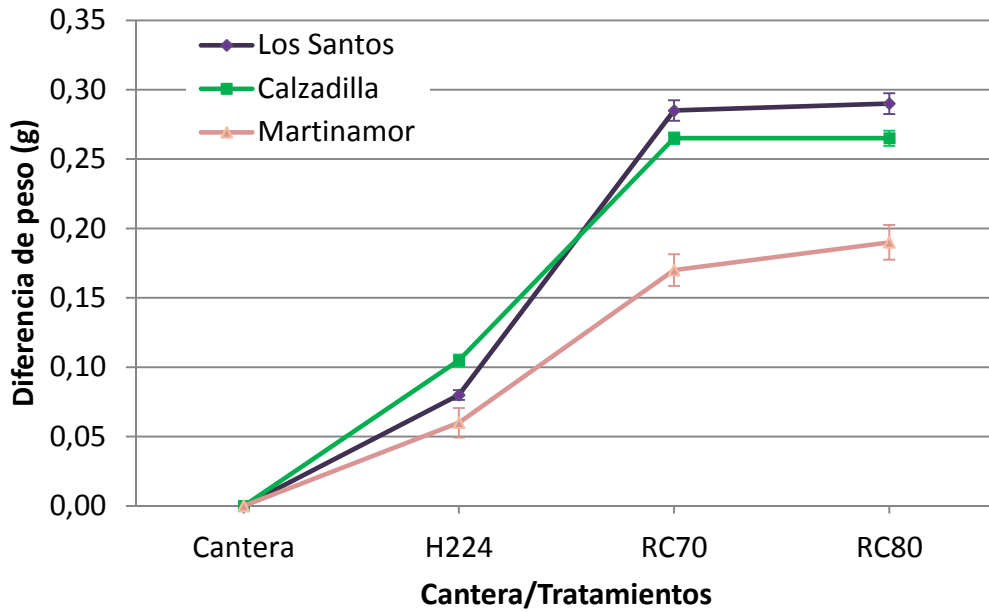


Figura 5.23. Variación ponderal de las muestras de Los Santos, Calzadilla y Martinamor de cantera, tratadas con H224, RC70 y RC80, en relación a las muestras de cantera. Se representa el error típico de la media por barras verticales.

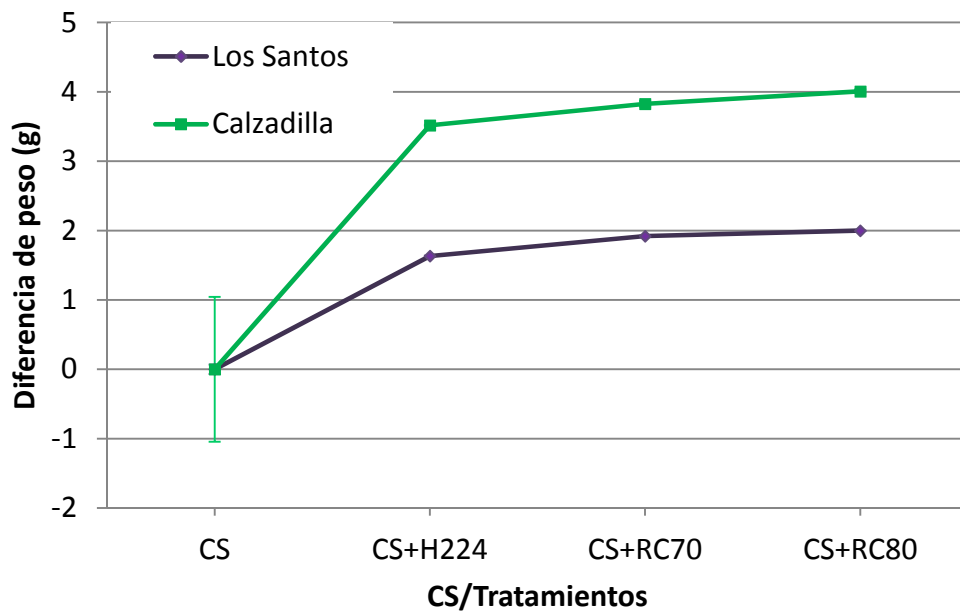


Figura 5.24. Variación ponderal de las muestras de Los Santos y Calzadilla de CS, tratadas con H224, RC70 y RC80, en relación a las muestras de cantera. Se representa el error típico de la media por barras verticales.

Esto también sucede con las muestras de Martinamor de cantera, que en estado fresco tienen tan poca porosidad que la ganancia de peso al aplicar el hidrofugante es la más baja de todas. Como ya hemos visto antes, las muestras de CS de Calzadilla son las más alteradas, por lo tanto, son las que más peso ganan (más producto retienen) al aplicar el hidrofugante.

Microscopía electrónica de barrido

Se han realizado observaciones de las muestras tras la aplicación del hidrofugante. En la Figura 5.25 se presenta un ejemplo del aspecto de los minerales (biotita) bajo MEB tras tratar una muestra, de vaugnerita de cantera, con H224. El producto queda tapizando la superficie, creando una película que protege al material de la entrada de soluciones acuosas.

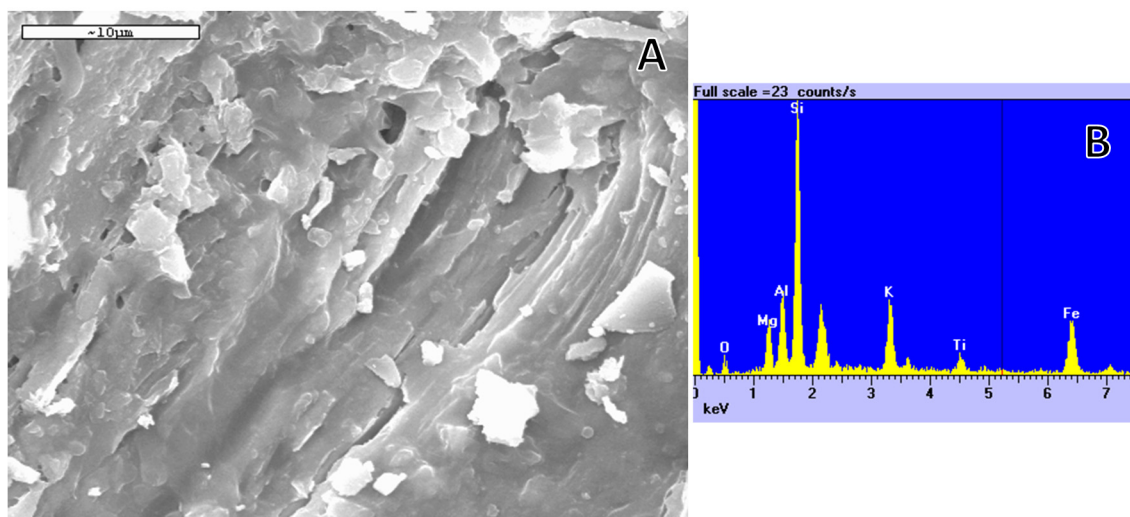


Figura 5.25. Imagen de MEB: A) biotita de vaugnerita C+H224, B) espectro de la biotita de A.

Porosimetría de mercurio

Se ha realizado porosimetría de mercurio en muestras de cantera, CS y tratadas con H224. Los resultados están recogidos en la Tabla 5.4.

El área superficial media, la porosidad total y la porosidad interparticular disminuyen en todos los casos con la aplicación del hidrofugante, excepto en las muestras de Calzadilla de cantera tratada con H224, donde aumenta ligeramente el valor de los tres parámetros. Cabe destacar el caso de la muestra de calzadilla con CS, que al tratarse con H224, sufre una notable disminución de los tres valores, reflejando

lo adecuado de este producto, a priori, para materiales alterados por cristalización de este tipo de sales. El intervalo de diámetro de poro se mantiene constante o disminuye con la aplicación del H224, en todos los casos, como puede verse en el histograma de distribución porosimétrica de las Figura 5.26 y Figura 5.27.

Tabla 5.4. Valores del estudio de porosimetría de mercurio de las muestras de Calzadilla, Los Santos y Martinamor de cantera, CS y posteriormente tratadas con hidrofugante H224.

| <i>Muestra</i> | <i>Características</i> | <i>AS (m²/g)</i> | <i>PT (%)</i> | <i>PInter. (%)</i> |
|----------------|------------------------|-----------------------------|---------------|--------------------|
| Calzadilla | Cantera | 9,305E-04 | 0,5434 | 0,4537 |
| Calzadilla | H224 | 1,256E-03 | 0,5664 | 0,4963 |
| Los Santos | Cantera | 2,660E-04 | 0,3970 | 0,3970 |
| Los Santos | H224 | 1,347E-04 | 0,3261 | 0,3261 |
| Martinamor | Cantera | 1,006E-04 | 0,3629 | 0,3545 |
| Martinamor | H224 | 5,315E-05 | 0,2127 | 0,2127 |
| Calzadilla | CS | 2,123E-03 | 1,1584 | 1,1343 |
| Calzadilla | CS+H224 | 3,316E-04 | 0,1843 | 0,1843 |
| Los Santos | CS | 2,355E-04 | 0,5955 | 0,5955 |
| Los Santos | CS+H224 | 3,391E-04 | 0,5530 | 0,5530 |

AS: Área superficial media PT: Porosidad total. PInter.: Porosidad Interpartícula.

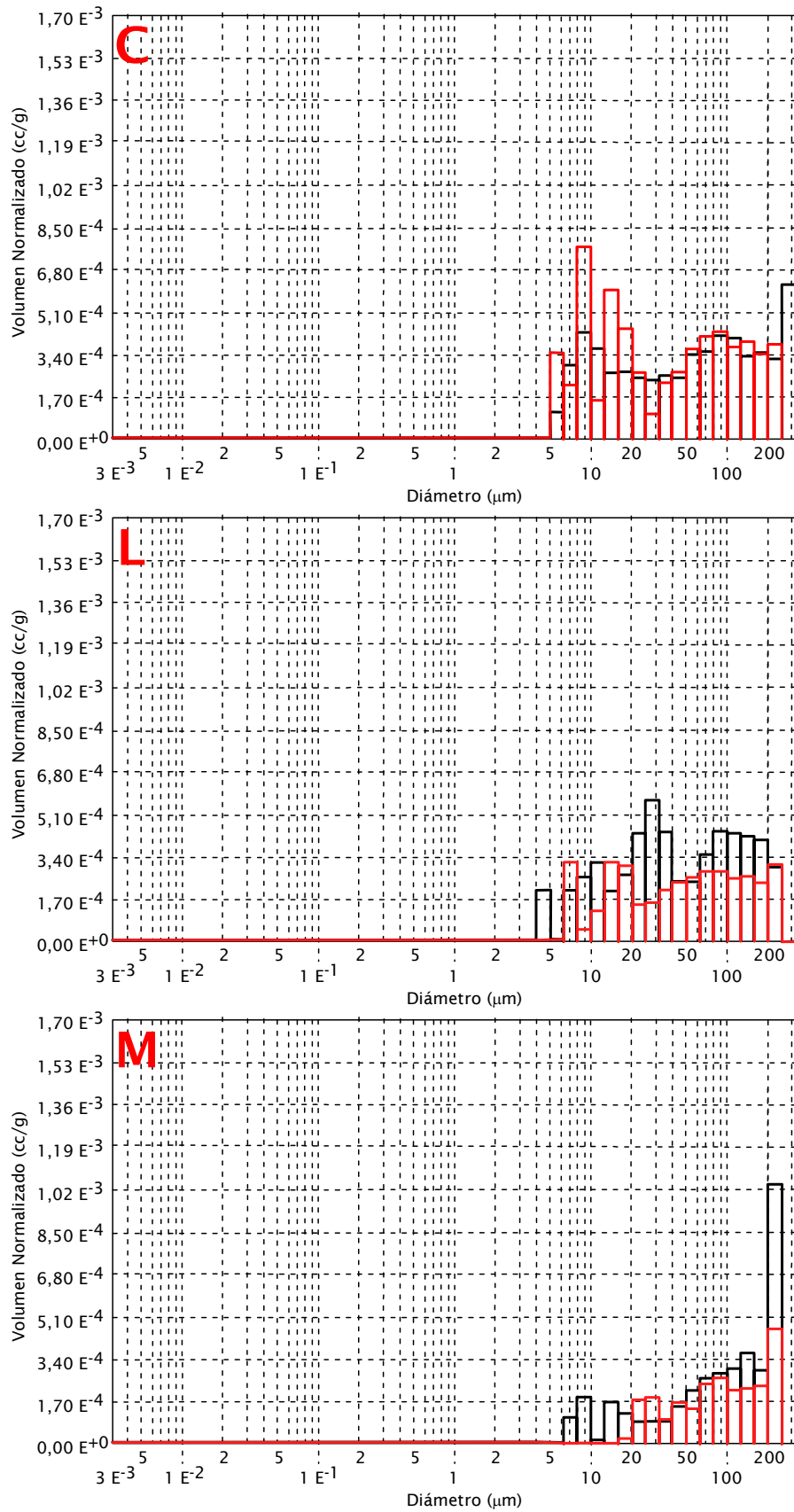


Figura 5.26. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos de muestras de cantera (negro) y tratadas con H224 (rojo). C: vaugnerita. L: granito de Los Santos y, M: leucogranito de Martinamor.

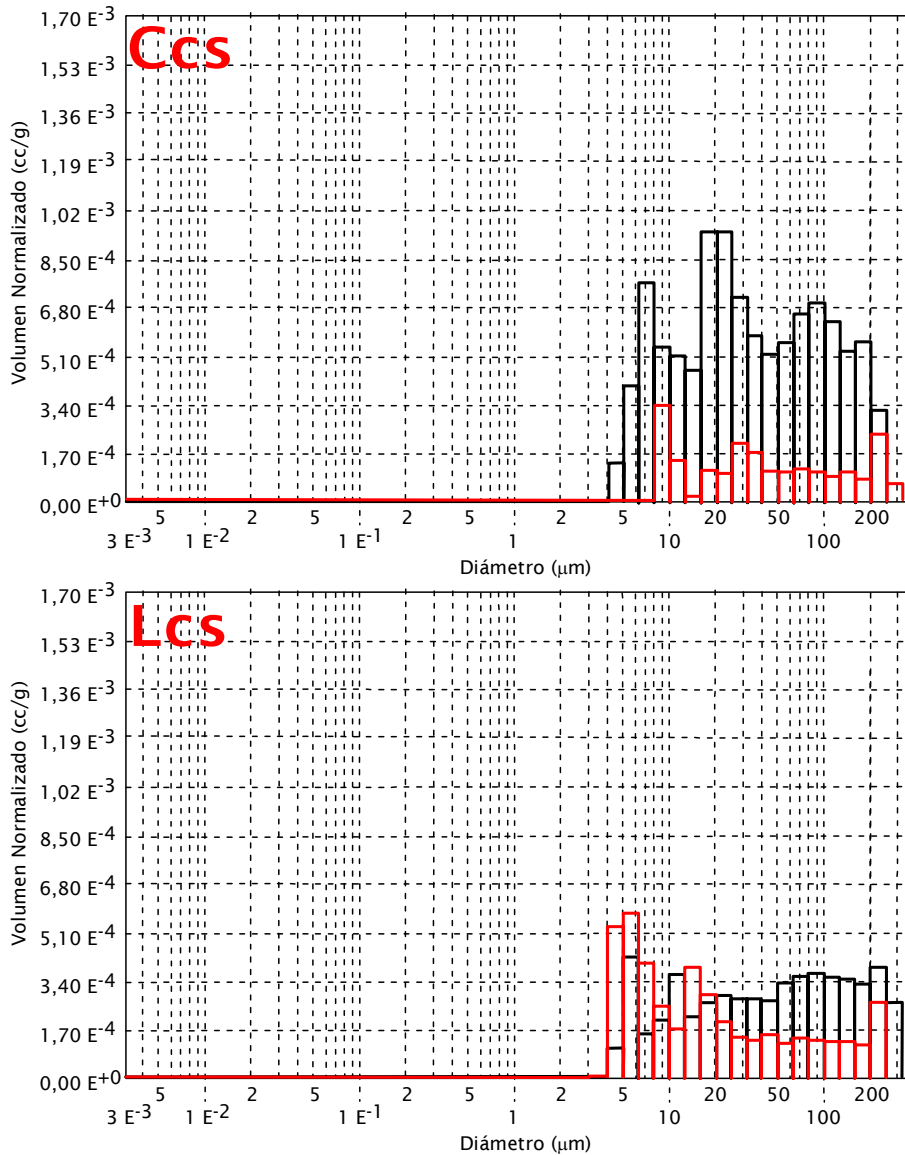


Figura 5.27. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos de muestras de CS (negro) y tratadas con H224 (rojo). C: vaugnerita de Calzadilla. L: granito de Los Santos.

Propiedades petrofísicas determinadas al agua

Para conocer la forma en que los tratamientos afectan a las rocas de cantera, se ha aplicado un Biplot Canónico (análisis 3), en el cual, las variables estudiadas son las siguientes propiedades determinadas al agua: porosidad total accesible al agua (PT) y libre (PL), Coeficiente de Absorción (CA), densidad real (DR) y aparente (DA), Coeficiente de Absorción Capilar (CAC) e imbibición (CI), y permeabilidad al vapor de agua (PER). Se han estudiado en las tres variedades de roca [Vaugnerita de calzadilla (C), granito de Los Santos (L) y leucogranito de Martinamor (M)], determinándose datos en estado fresco (roca de cantera) y tras la aplicación de los tres productos: H224, RC70 y RC80.

La aplicación de la técnica estadística multivariante Biplot Canónico a estos datos arroja un valor de la λ de Wilks de 13,1007 y un $p\text{-value} < 0,001$, claramente significativo. En la Figura 5.28 puede verse el gráfico resultante de la proyección en el plano 1-2.

El efecto de la aplicación del hidrofugante sobre las rocas de cantera en las tres variedades se traduce, en todos los casos, en una disminución de la porosidad total, porosidad libre, coeficiente de absorción, de imbibición y de absorción capilar (PT, PL, CA, CI y CAC). En las muestras de Calzadilla y Martinamor, la aplicación del H224 no varía los valores de la densidad real y aparente; sin embargo, en las muestras de Los Santos, aunque la densidad real no varía, la densidad aparente aumenta con la aplicación del H224.

La variable permeabilidad, sin vector en la Figura 5.28, no influye en el análisis; su variabilidad es cero, es decir, la permeabilidad de las rocas de las tres variedades es la misma tanto en las muestras de cantera, como en aquellas tratadas con cualquiera de los tres productos de conservación, H224, RC70 o RC80.

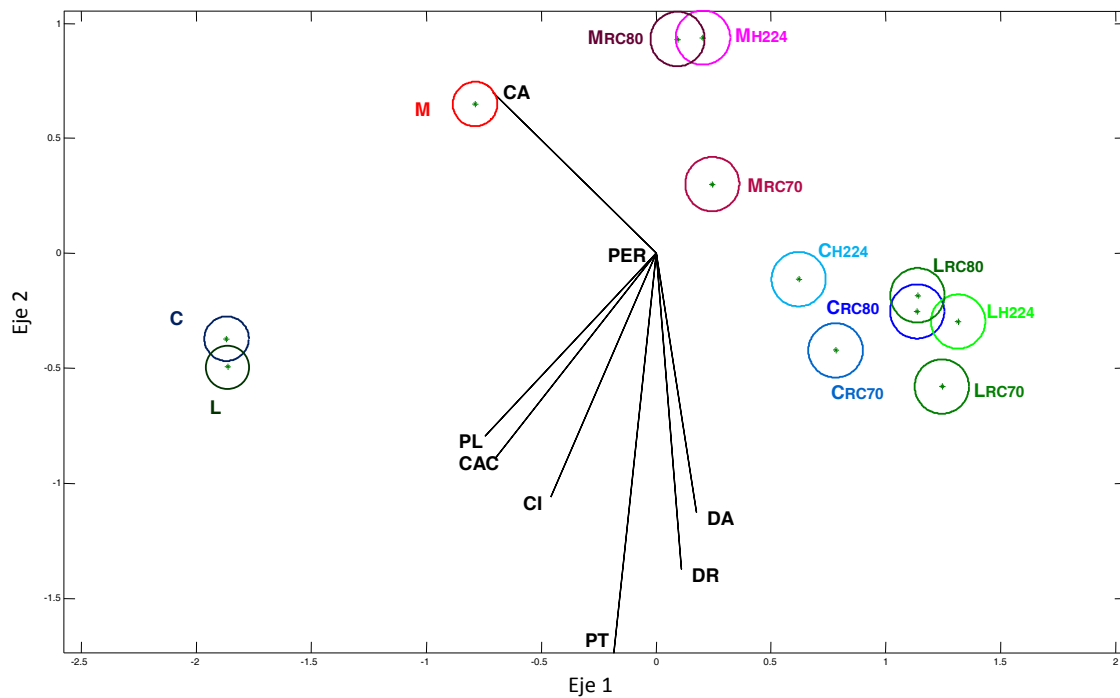


Figura 5.28. Plano 1-2 del Biplot Canónico (análisis 3) para la determinación de la eficacia de los tratamientos de conservación, mediante el estudio de la variación de las propiedades petrofísicas determinadas en agua en rocas de cantera.

Velocidad de propagación de ultrasonidos y color

Para determinar la eficacia de los tratamientos de conservación aplicados sobre las rocas C y CS, se han tomado los datos de las coordenadas cromáticas (L^* , a^* , b^*) y de la velocidad de propagación de los ultrasonidos en las tres direcciones del espacio (V_x , V_y y V_z), antes y después de la aplicación de los distintos productos conforme a lo expuesto en el apartado 2 de la presente memoria (Tabla IV, ANEXO).

Con estos datos, tomados en las tres variedades, en el caso de las muestras de cantera, y en las variedades de Calzadilla y Los Santos, en el caso de las muestras de CS, se ha realizado un Biplot Canónico (análisis 4) que arroja un valor de la λ de Wilks de 114,7875 y un p -value < 0,001. El gráfico resultante puede verse en la Figura 5.29.

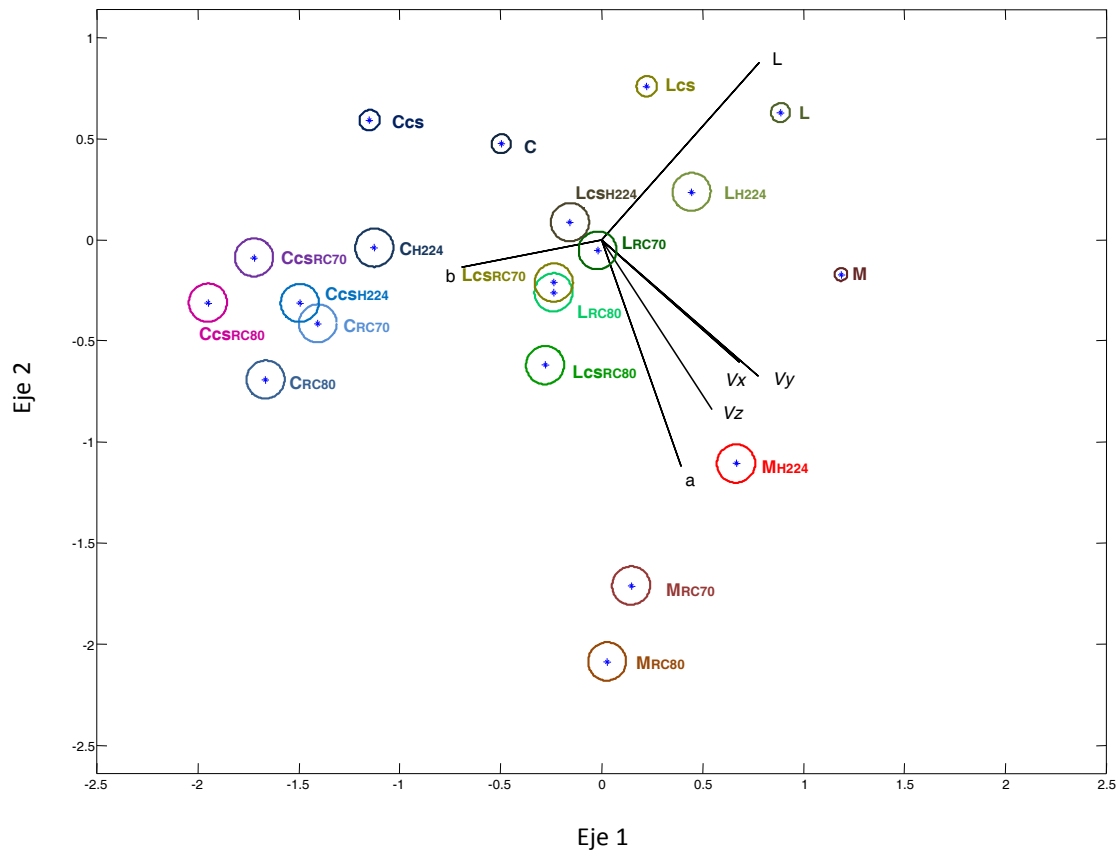


Figura 5.29. Plano 1-2 del Biplot Canónico (análisis 4) para la determinación de la eficacia de los tratamientos de conservación, mediante el estudio del color y la velocidad de propagación de los ultrasonidos

En las muestras de Martinamor de cantera y en las de Los Santos y Calzadilla de CS se observa un aumento en la velocidad de los ultrasonidos en todas las direcciones,

lo que indica que el H224 ocupa los poros directamente conectados con la superficie (porosidad libre o abierta), mejorando así la cohesión del material (Figura 5.30).

En las muestras de Los Santos y de Calzadilla de cantera la velocidad de los ultrasonidos no varía en ninguna de las direcciones del espacio (V_x , V_y o V_z), lo cual nos puede indicar que el tratamiento aplicado no llega a cerrar eficientemente la porosidad interconectada de las probetas testadas, lo cual a su vez, puede deberse a la forma de aplicar el tratamiento sobre el material pétreo.

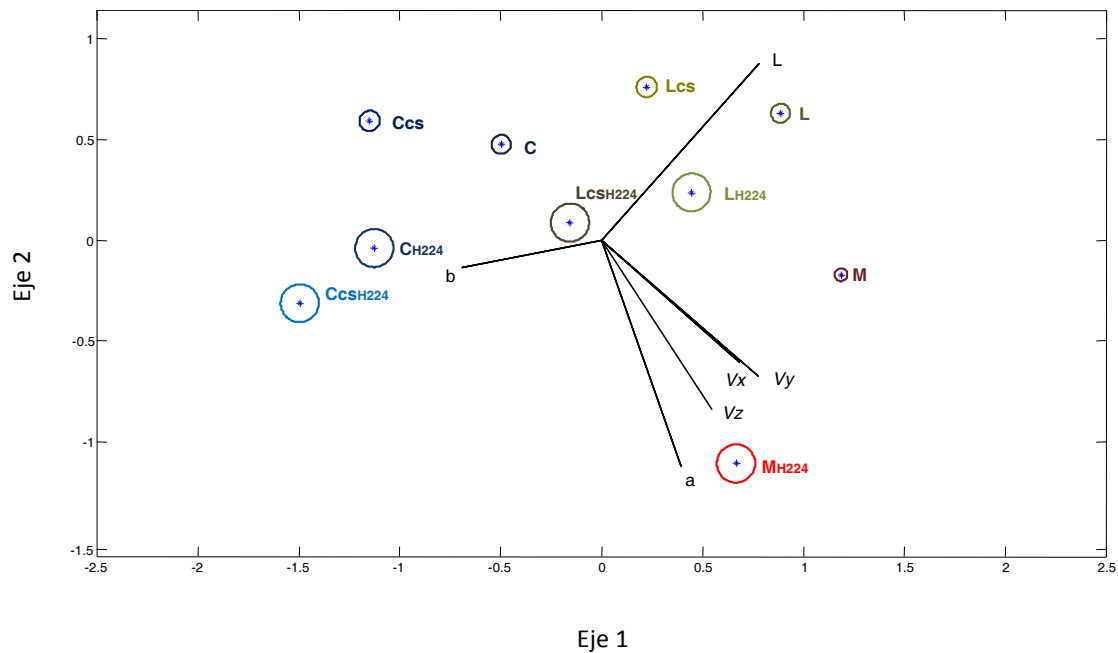


Figura 5.30. Detalle del plano 1-2 del Biplot Canónico del análisis estadístico 4 (Figura 5.29) con las muestras de Martinamor, Los Santos y Calzadilla de C y CS y posteriormente tratadas con H224.

A nivel cromático, el efecto del H224 sobre las probetas, tanto de C como de CS, de las todas las variedades, produce que estas se oscurezcan (L^* disminuye), que amarillean (b^* aumenta) y que enrojeczan (a^* aumenta) (Figura 5.30). Este mismo comportamiento lo presentan otros productos de protección, como el TEGOSIVIN (hidrofugante) aplicado sobre morteros, según Carmona-Quiroga *et al.* (2010), o aplicado sobre rocas graníticas, como indican Rivas *et al.* (1998)

5.2.3 CONSOLIDACIÓN

Descripción de visu

En ninguna de las rocas de cantera y CS sometidas a este tratamiento (RC70) se aprecia ningún cambio durante el proceso de aplicación (Figura 5.31 y Figura 5.32). Tras la aplicación, en algunas probetas se puede observar un ligero cambio de tono, que se cuantificará más adelante. También y sobre todo en las muestras de CS tratadas, se pierde la rugosidad al tacto que tienen las rocas envejecidas por CS y en las muestras de Calzadilla de CS+RC70 ya no se sueltan pequeñas placas de biotita con solo rozarlas.

Variaciones ponderales

Con la aplicación del consolidante RC70 todas las probetas de cualquier variedad, de cantera o CS, ganan peso (Figura 5.23 y Figura 5.24), más en las muestras de CS que en las de cantera. En las rocas de cantera tratadas, las muestras de Los Santos son las que mayor ganancia tienen, seguidas de las de Calzadilla y por último y con menor ganancia, las muestras de Martinamor. En las rocas de CS tratadas, son las de Calzadilla las que mayor ganancia de peso presentan.

Microscopía electrónica de barrido

Se han realizado observaciones de las muestras tras la aplicación del consolidante. En la Figura 5.33 se presenta un ejemplo del aspecto de los minerales (plagioclasa) bajo MEB tras tratar una muestra, de granito de Los Santos de cantera en este caso, con RC70. El producto queda formando una costra fina haciendo difícil incluso la identificación del mineral subyacente. En alguna zona, la costra adquiere mayor espesor y tiende a agrietarse.

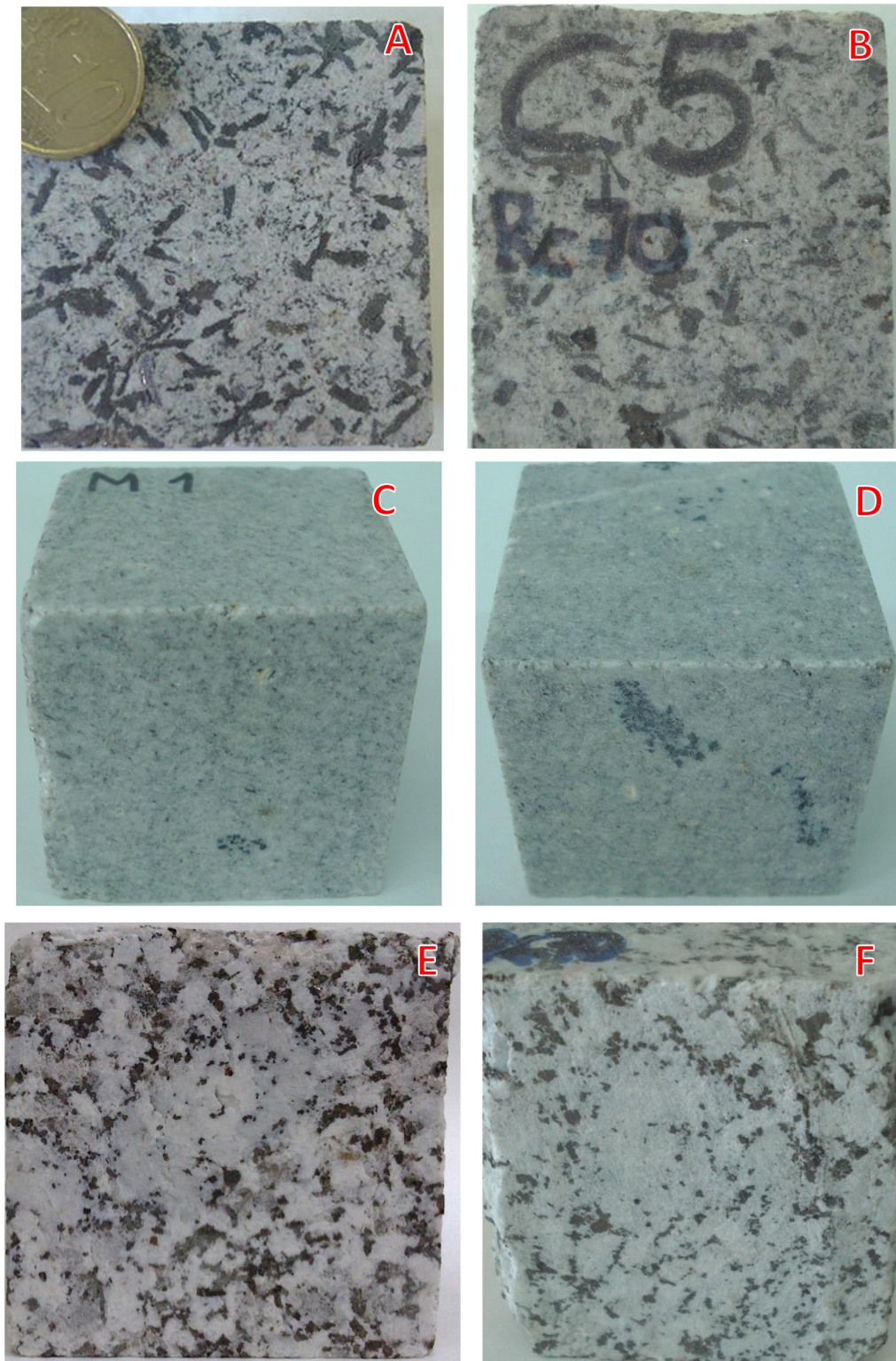


Figura 5.31. Probetas de cantera (A, C y E) y tratadas con RC70 (B, D y F) de Calzadilla, Martinamor y Los Santos, respectivamente.

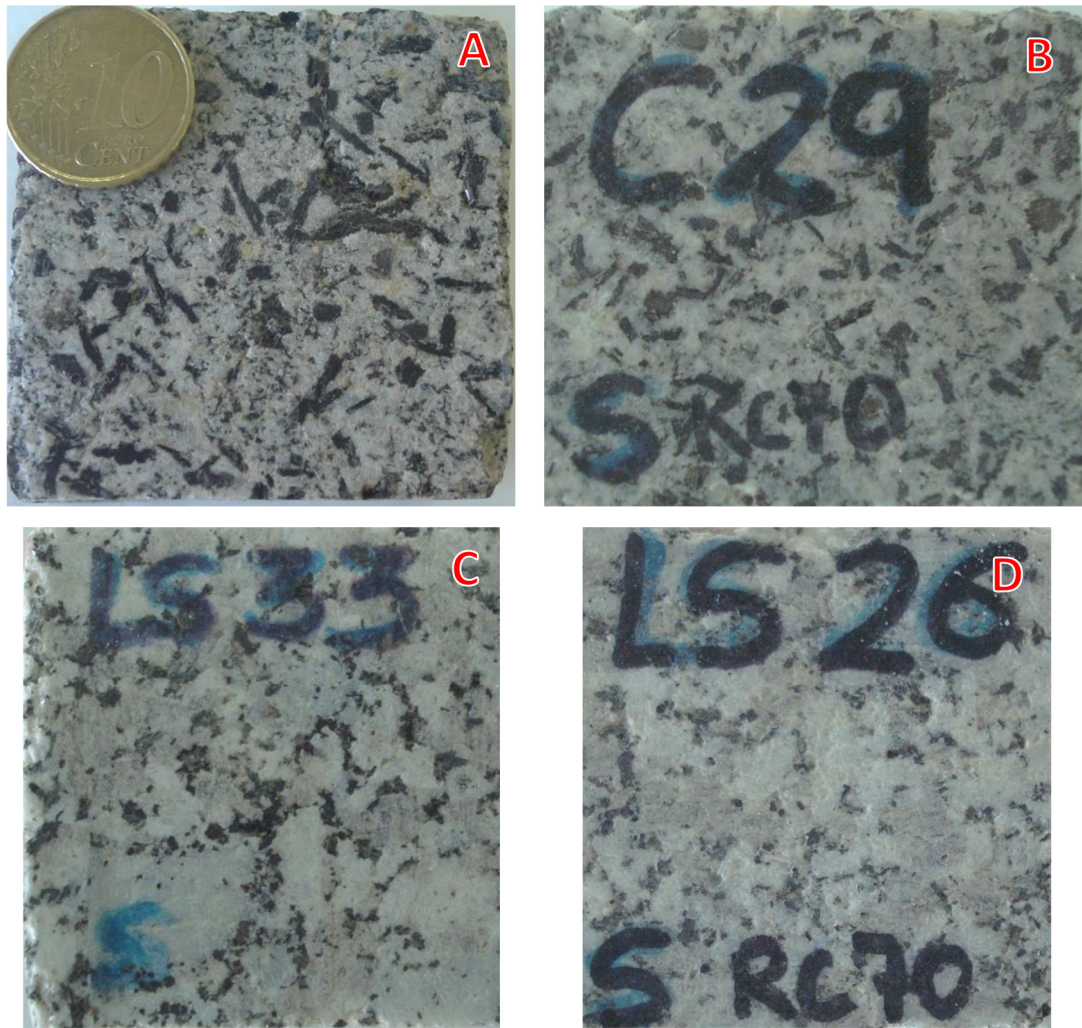


Figura 5.32. Probetas CS (A y C) y después de ser tratadas con RC70 (B y D) de Calzadilla y Los Santos, respectivamente.

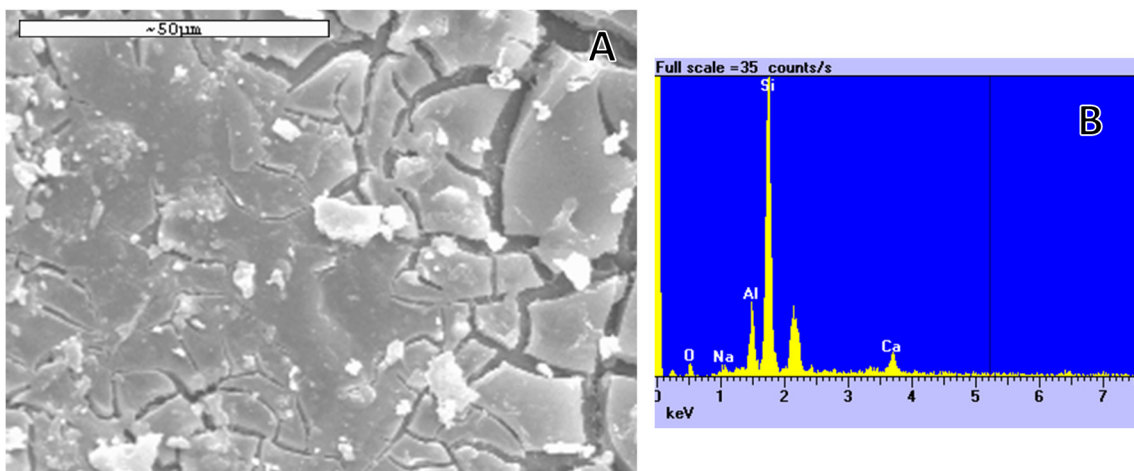


Figura 5.33. Imagen de MEB: A) plagioclasa cubierta por RC70 en granito de Los Santos (C+RC70), B) espectro de la imagen A.

Porosimetría de mercurio

Se ha realizado porosimetría de mercurio en muestras de cantera, CS y tratadas con RC70. Los resultados están recogidos en la Tabla 5.5.

La porosidad total y la porosidad interparticular descienden en todos los casos con la aplicación del consolidante. El área superficial media, en general también desciende, excepto en los casos de Martinamor y CS+RC70 de Los Santos, donde aumenta ligeramente. El intervalo de diámetro de poro se mantiene constante o disminuye, pero menos de lo que lo hace con la aplicación del hidrofugante (Figura 5.26 y Figura 5.27), como puede verse en los histogramas de distribución porosimétrica (Figura 5.34 y Figura 5.35)

Tabla 5.5. Valores del estudio de porosimetría de mercurio de las muestras de Calzadilla, Los Santos y Martinamor de cantera, CS y posteriormente tratadas con consolidante RC70.

| <i>Muestra</i> | <i>Características</i> | <i>AS (m²/g)</i> | <i>PT (%)</i> | <i>PInter. (%)</i> |
|----------------|------------------------|-----------------------------|---------------|--------------------|
| Calzadilla | Cantera | 9,305E-04 | 0,5434 | 0,4537 |
| Calzadilla | RC70 | 2,329E-04 | 0,4679 | 0,4679 |
| Los Santos | Cantera | 2,660E-04 | 0,397 | 0,397 |
| Los Santos | RC70 | 9,378E-05 | 0,2127 | 0,2127 |
| Martinamor | Cantera | 1,006E-04 | 0,3629 | 0,3545 |
| Martinamor | RC70 | 6,236E-04 | 0,156 | 0,156 |
| Calzadilla | CS | 2,123E-03 | 1,1584 | 1,1343 |
| Calzadilla | CS+RC70 | 6,943E-04 | 0,4361 | 0,397 |
| Los Santos | CS | 2,355E-04 | 0,5955 | 0,5955 |
| Los Santos | CS+RC70 | 2,494E-04 | 0,4537 | 0,4537 |

AS: Área superficial media PT: Porosidad total. PInter.: Porosidad Interpartícula.

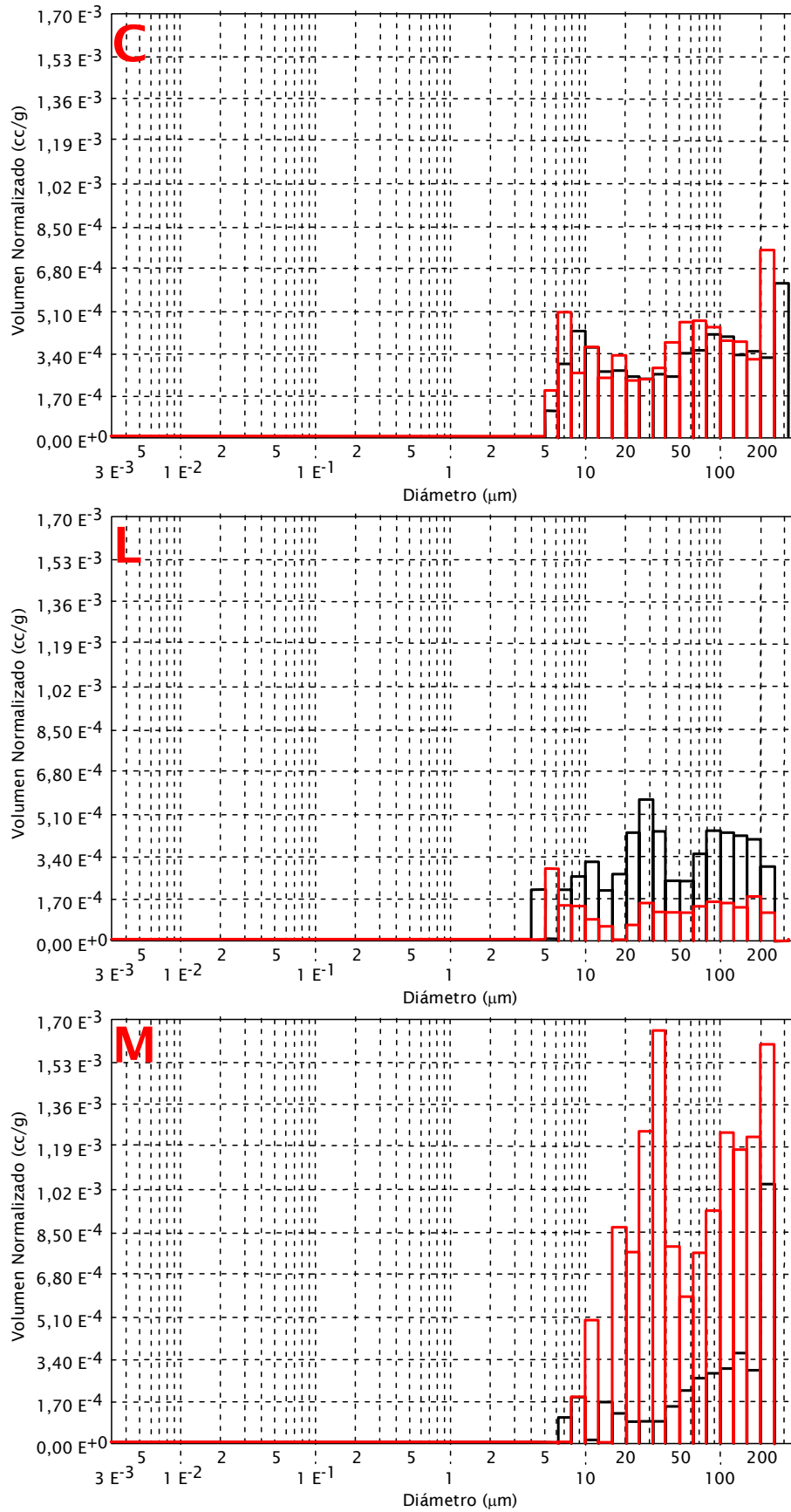


Figura 5.34. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos de muestras de cantera (negro) y tratadas con RC70 (rojo). C: vaugnerita. L: granito de Los Santos y, M: leucogranito de Martinamor.

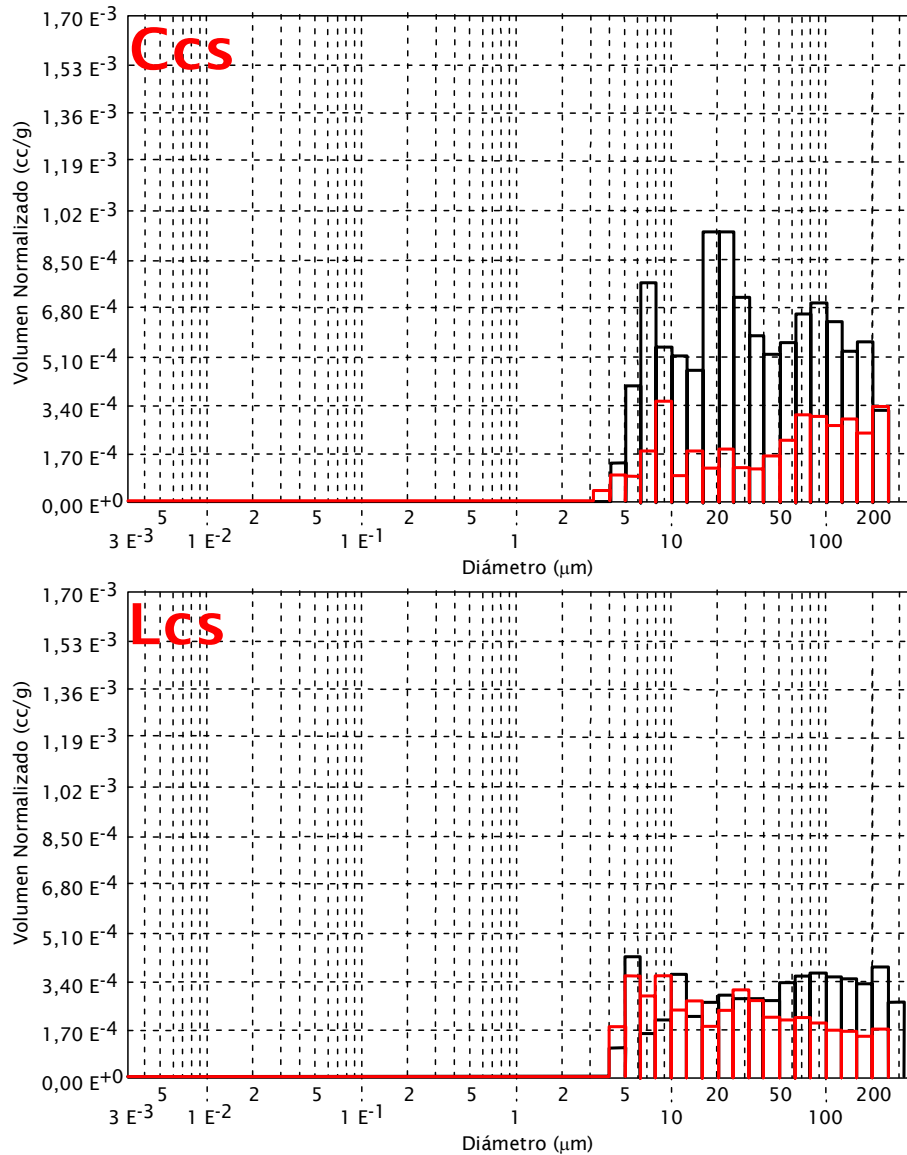


Figura 5.35. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos de muestras de CS (negro) y tratadas con RC70 (rojo). C: vaugnerita. L: granito de Los Santos.

Propiedades petrofísicas determinadas al agua

El efecto de la aplicación del consolidante RC70 sobre las rocas de cantera de las tres variedades (Figura 5.28) se traduce, en todos los casos, en una disminución del coeficiente de absorción, de la porosidad libre y del coeficiente de absorción capilar (CA, PL y CAC). Así mismo, en todos los casos, aumentan los valores de las densidades reales y aparente (DR y DA). La porosidad total no varía en las muestras de Calzadilla y Los Santos y aumenta ligeramente en las muestras de Martinamor. El coeficiente de imbibición sigue la misma tendencia de descenso que los otros coeficientes, salvo en las muestras de Martinamor, donde no presenta variaciones.

Velocidad de propagación de ultrasonidos y color

La velocidad de propagación de los ultrasonidos en las muestras de Martinamor de C y en las de Los Santos CS tratadas con RC70 siempre aumenta indicando, al igual que en la aplicación del H224, que el RC70 ocupa los poros directamente conectados con la superficie (porosidad libre o abierta), mejorando así la cohesión del material (Figura 5.36). En las muestras de Calzadilla, tanto de cantera, como de CS, la velocidad de propagación de los ultrasonidos no varía en las direcciones V_x y V_y , y aumenta en V_z . En las muestras de Los Santos de cantera la velocidad de propagación de los ultrasonidos no varía en ninguna de las tres direcciones.

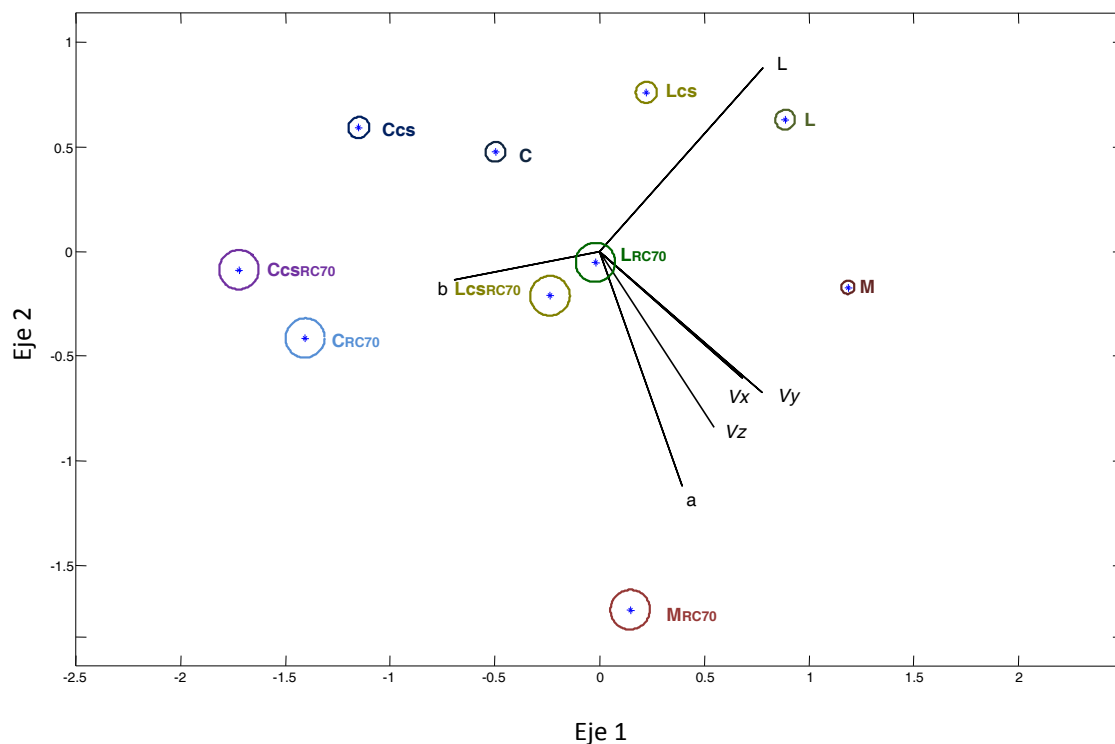


Figura 5.36. Detalle del plano 1-2 del Biplot canónico del análisis estadístico 4 con las muestras de Martinamor, Los Santos y Calzadilla de C y CS y posteriormente tratadas con RC70.

A nivel cromático, el efecto del RC70 sobre las probetas, tanto de C como de CS, de las todas las variedades, produce que estas se oscurezcan (L^* disminuye), que amarillean (b^* aumenta) y que enrojezcan (a^* aumenta) (Figura 5.36), igual que el efecto descrito anteriormente del hidrofugante H224, o del hidrofugante TEGOSIVIN (Rivas *et al.*, 1998; Carmona-Quiroga *et al.*, 2010).

5.2.4 CONSOLIDACIÓN+HIDROFUGACIÓN

Descripción de visu

En ninguna de las rocas de cantera y CS sometidas a este tratamiento (RC80) se aprecia ningún cambio durante el proceso de aplicación (Figura 5.37 y Figura 5.38). Tras la aplicación en algunas probetas se observa un cambio de tono, que se cuantificará más adelante. También se pierde la rugosidad al tacto que tienen las rocas envejecidas por CS y se dejan de perder placas de material suelto, rellenándose parcialmente alguna de las oquedades formadas por la pérdida de placas de biotita, sobre todo en las muestras de calzadilla.

Variaciones ponderales

Con la aplicación del RC80 todas las probetas de cualquier variedad, de cantera o CS, ganan peso (Figura 5.23 y Figura 5.24), más en las muestras de CS que en las de cantera. En las rocas de cantera tratadas, las muestras de Los Santos son las que mayor ganancia tienen, seguidas de las de Calzadilla y por último y con menor ganancia, las muestras de Martinamor. En las rocas de CS tratadas son las de Calzadilla las que mayor ganancia de peso presentan. En comparación con los otros tratamientos, este es el que mayor ganancia de peso genera, tanto en las probetas de cantera como en las de CS de cualquiera de las variedades testadas.

Microscopía electrónica de barrido

Se han realizado observaciones de las muestras tras la aplicación del consolidante. En la Figura 5.39 se presenta un ejemplo del aspecto de los minerales (plagioclasa) bajo MEB tras tratar una muestra, de granito de Los Santos de cantera, con RC80. El producto queda formando una costra fina haciendo difícil incluso la identificación del mineral subyacente. En alguna zona la costra adquiere mayor espesor y tiende a agrietarse.

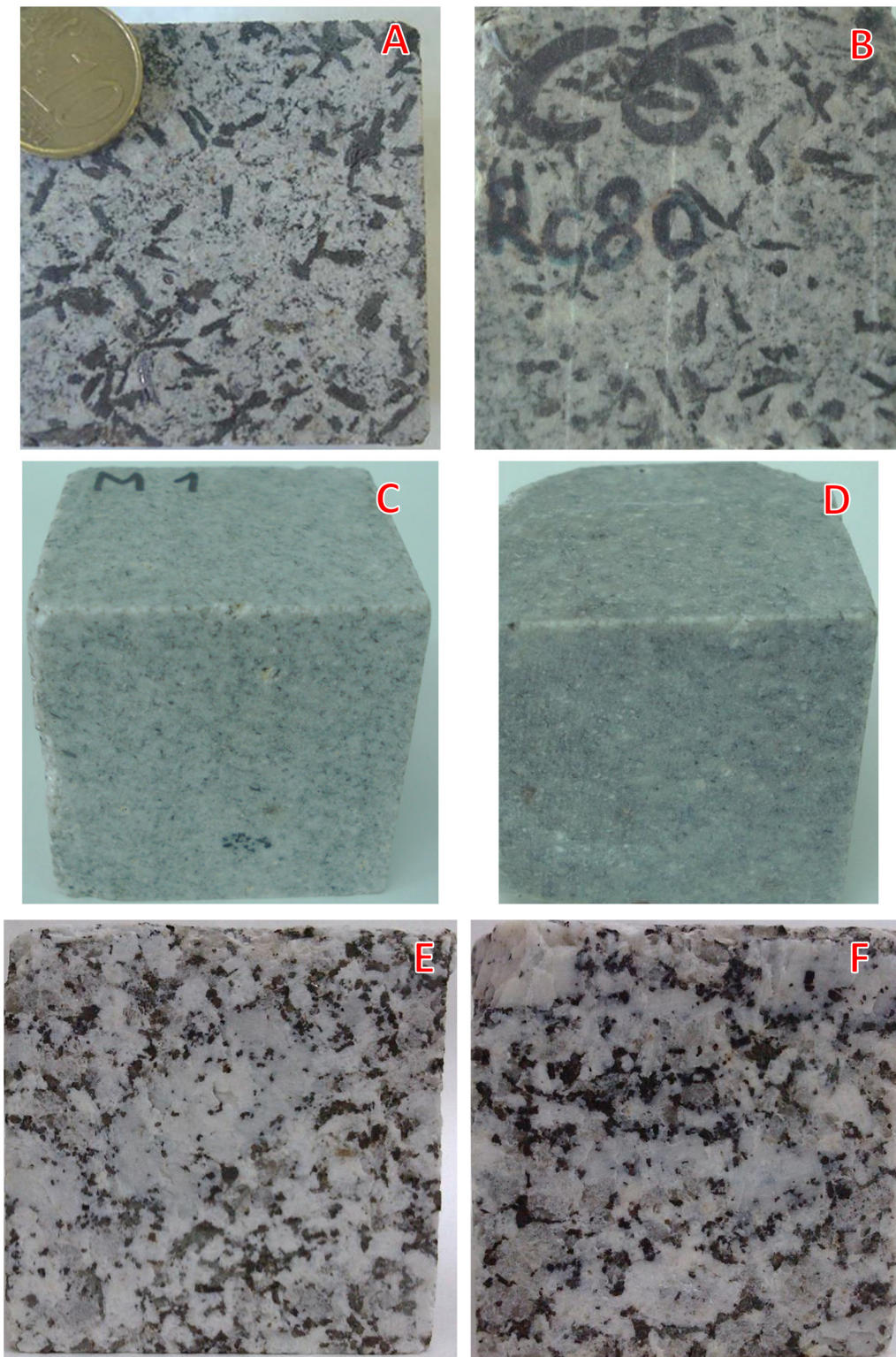


Figura 5.37. Probetas de cantera (A, C y E) y tratadas con RC80 (B, D y F) de Calzadilla, Martinamor y Los Santos, respectivamente.

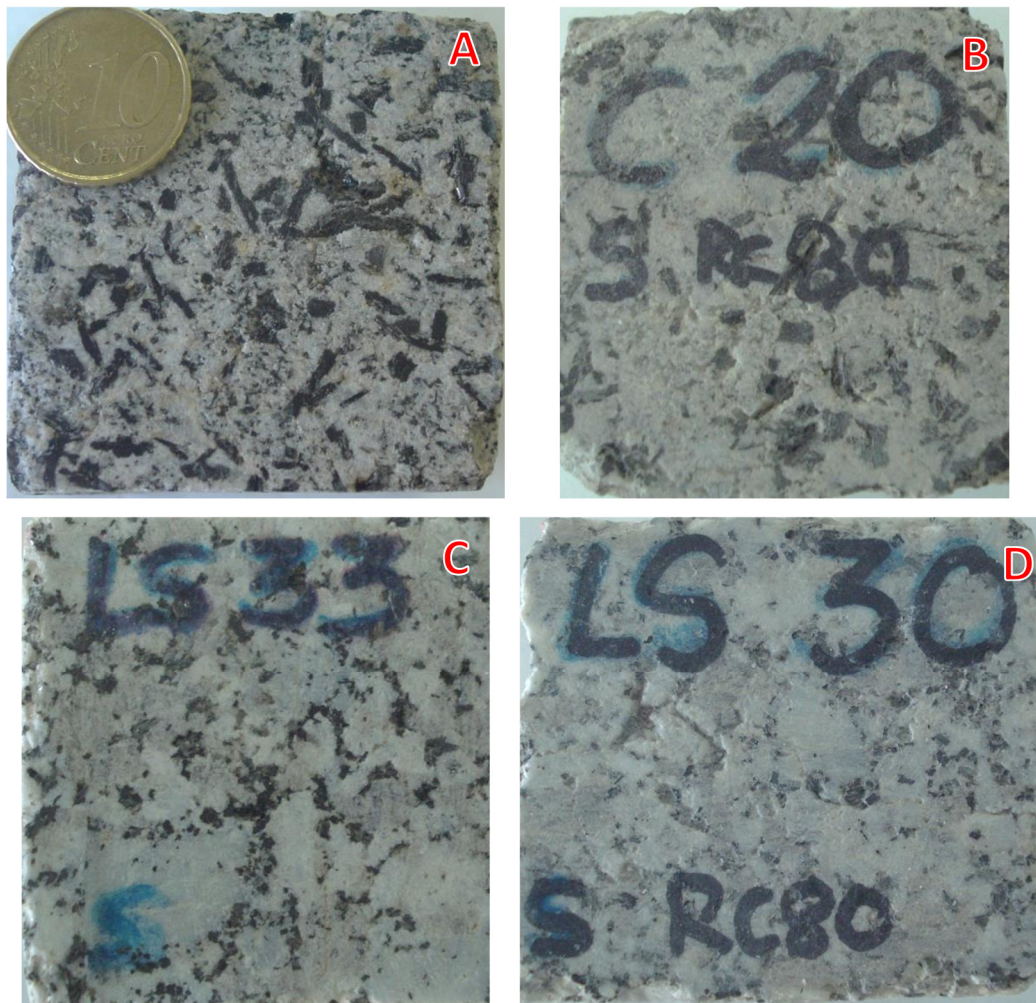


Figura 5.38. Probetas CS (A y C) y después tratadas con RC80 (B y D) de Calzadilla y Los Santos, respectivamente.

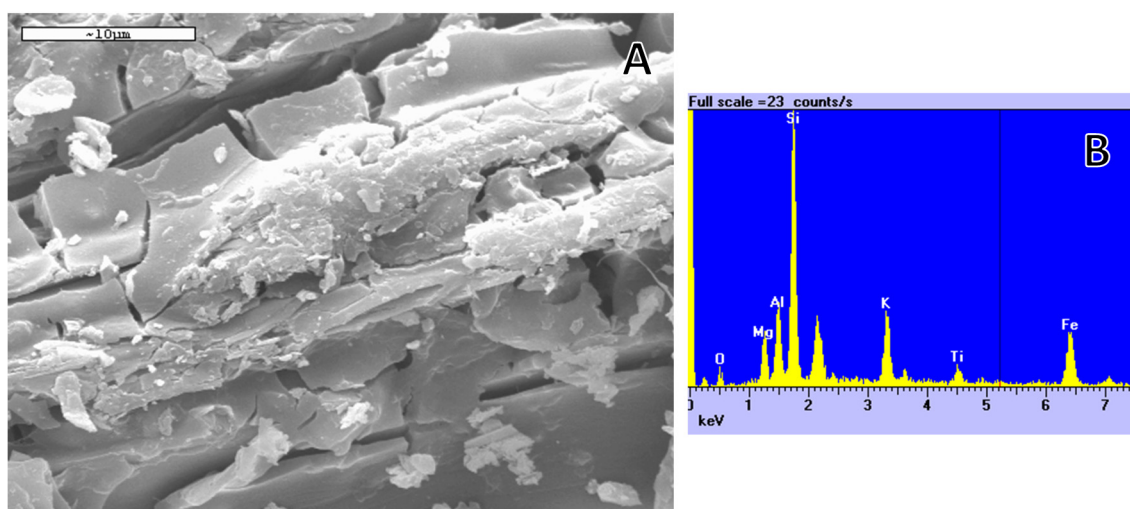


Figura 5.39. Imagen de MEB. A: Capa de RC80 sobre minerales en una muestra de leucogranito de Martinamor de cantera tratado con RC80. B: espectro de la imagen A.

Porosimetría de mercurio

Se ha realizado porosimetría de mercurio en muestras de cantera, CS y tratadas con RC80. Los resultados están recogidos en la Tabla 5.6.

La porosidad total y la porosidad interparticular descienden en todos los casos con la aplicación del consolidante+hidrofugante (RC80), salvo en el caso de las muestras de Los Santos aplicado directamente sobre rocas de cantera. El área superficial media, en general también desciende, excepto en el caso de Martinamor (de C a C+RC80), donde aumenta ligeramente. El intervalo de diámetro de poro se mantiene constante como puede verse en los histogramas de distribución porosimétrica (Figura 5.40 y Figura 5.41).

Tabla 5.6. Valores del estudio de porosimetría de mercurio de las muestras de Calzadilla, Los Santos y Martinamor de cantera, CS y posteriormente tratadas con consolidante RC70.

| <i>Muestra</i> | <i>Características</i> | <i>AS (m²/g)</i> | <i>PT (%)</i> | <i>PInter. (%)</i> |
|----------------|------------------------|-----------------------------|---------------|--------------------|
| Calzadilla | Cantera | 9,305E-04 | 0,5434 | 0,4537 |
| Calzadilla | RC80 | 1,435E-04 | 0,3545 | 0,3545 |
| Los Santos | Cantera | 2,660E-04 | 0,3970 | 0,3970 |
| Los Santos | RC80 | 1,984E-04 | 0,6239 | 0,6239 |
| Martinamor | Cantera | 1,006E-04 | 0,3629 | 0,3545 |
| Martinamor | RC80 | 4,393E-04 | 0,2054 | 0,1843 |
| Calzadilla | CS | 2,123E-03 | 1,1584 | 1,1343 |
| Calzadilla | CS+RC80 | 8,213E-04 | 0,5188 | 0,5104 |
| Los Santos | CS | 2,355E-04 | 0,5955 | 0,5955 |
| Los Santos | CS+RC80 | 1,232E-04 | 0,2410 | 0,2410 |

AS: Área superficial media PT: Porosidad total. PInter.: Porosidad Interpartícula.

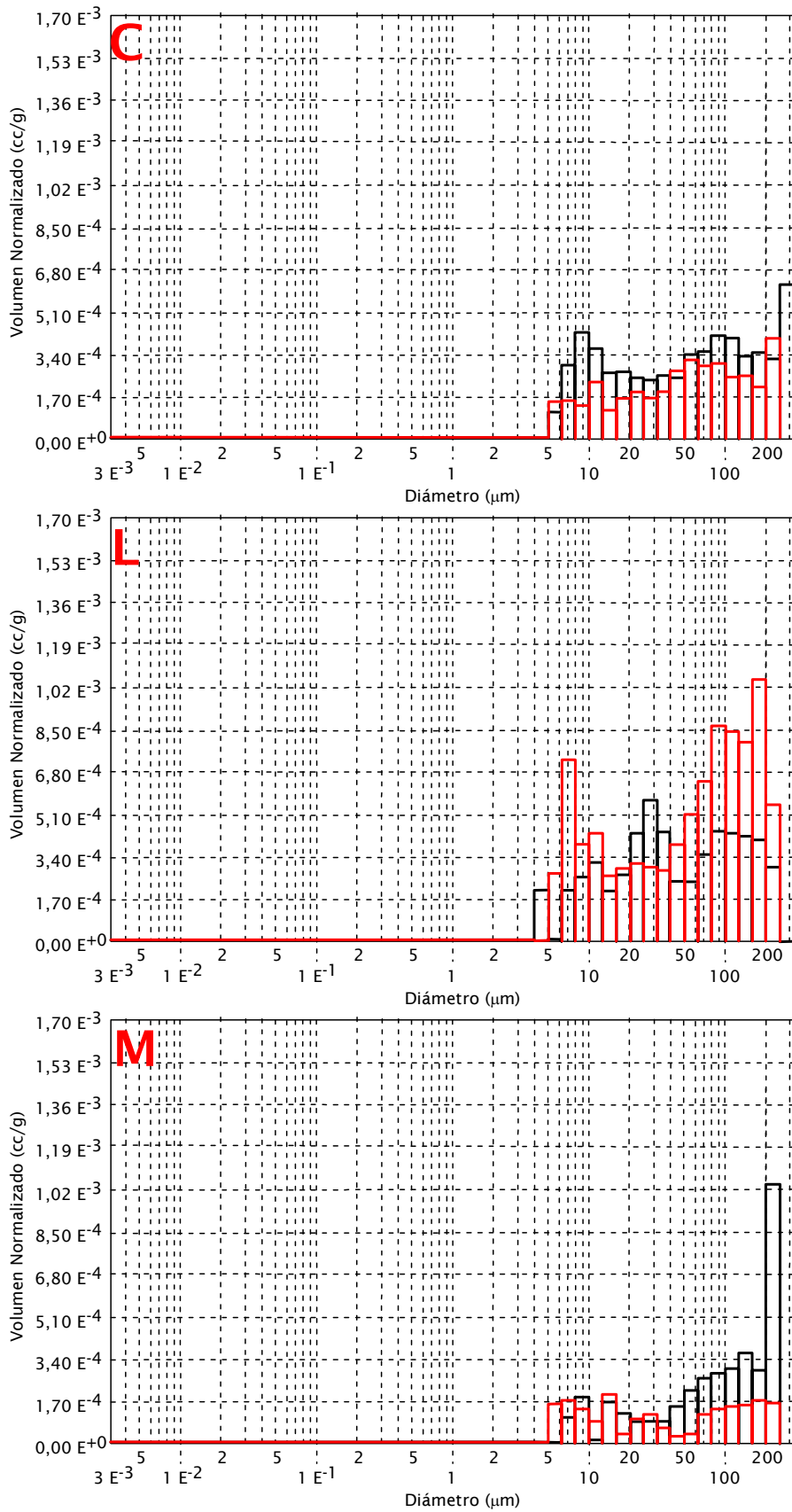


Figura 5.40. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos de muestras de cantera (negro) y tratadas con RC70 (rojo). C: vaugnerita. L: granito de Los Santos y, M: leucogranito de Martinamor.

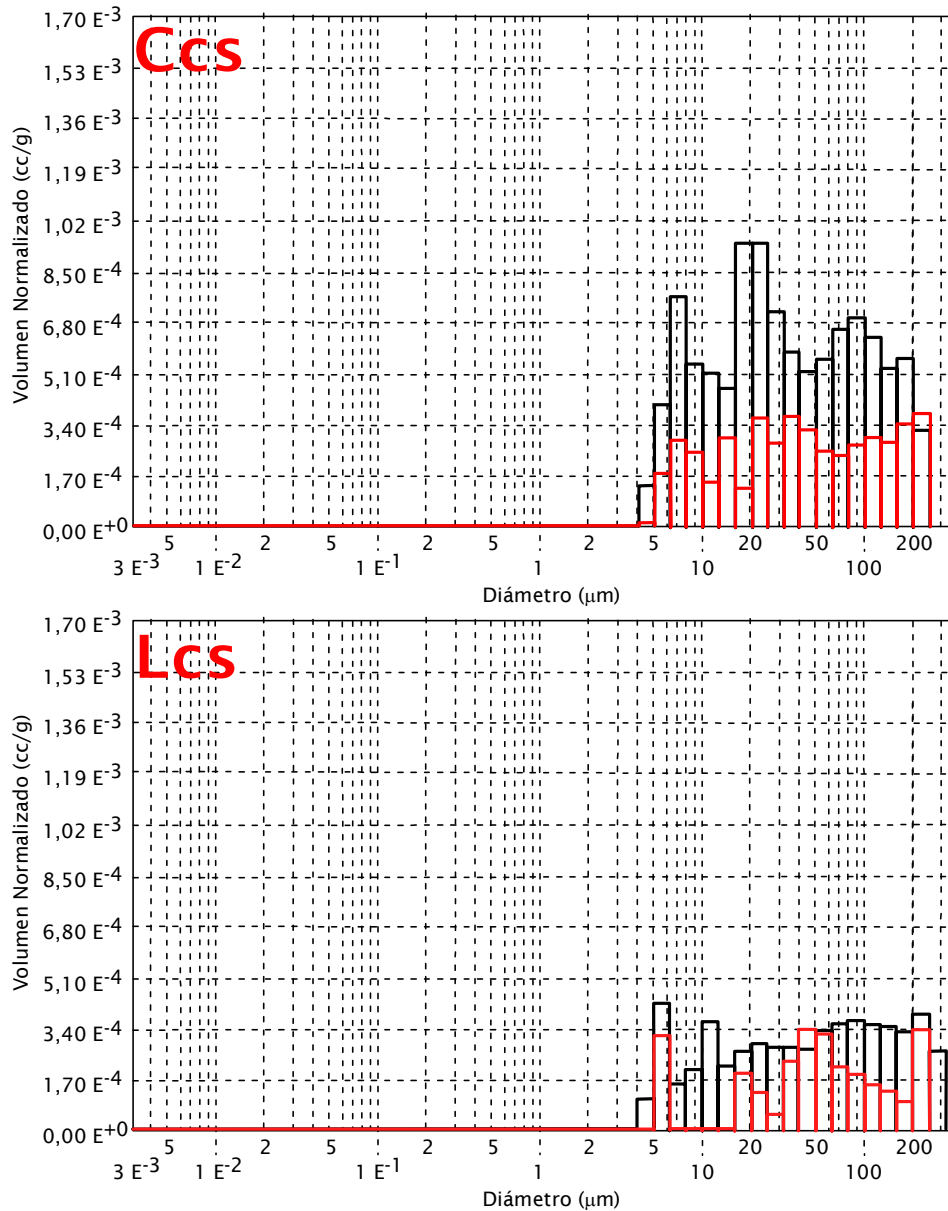


Figura 5.41. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos de muestras de CS (negro) y tratadas con RC70 (rojo). C: vaugnerita. L: granito de Los Santos.

Propiedades petrofísicas determinadas al agua

En la Figura 5.28 se deduce del plano 1-2 del Biplot Canónico (análisis 3) que el efecto de la aplicación del RC80 sobre las rocas de cantera de las tres variedades, en todos los casos, produce una disminución del coeficiente de absorción, de la porosidad libre y total, del coeficiente de absorción capilar e imbibición (CA, PL, PT, CAC y CI), al igual que en el caso de la aplicación del hidrofugante. Al mismo tiempo y en todos los casos, la densidad real permanece invariable. Además, la densidad aparente aumenta en las muestras de Calzadilla y no tiene variaciones en las muestras de Los Santos y

Martinamor. Estos resultados hacen que el tratamiento con este producto consolidante+hidrofugante sea, a priori, muy adecuado para consolidar material, pues cierra de forma efectiva la porosidad accesible al agua y a las soluciones salinas, principal agente erosivo del material, sin tener variación la permeabilidad al vapor de agua, es decir, dejando transpirar a la piedra.

Según la información que nos ofrecen las propiedades petrofísicas determinadas al agua, los productos de conservación con hidrofugantes (bien el hidrofugante solo o bien acompañado del consolidante) ofrecen mejores resultados a la hora de disminuir los valores de las propiedades, que indican penetración de soluciones acuosas en el material (Coeficiente de absorción, porosidad libre y total, coeficiente de absorción capilar y coeficiente de imbibición); es decir, estos productos cierran mejor la porosidad conectada con el exterior y además, en el caso del RC80, además, mejoran la cohesión del material, por tener un consolidante en su composición.

Velocidad de propagación de ultrasonidos y color

La velocidad de propagación de los ultrasonidos (análisis 4) en las muestras C y en las CS tratadas con RC80 nunca disminuye (Figura 5.42). En la mayoría de los casos se observa un aumento en la velocidad de los ultrasonidos, lo que indica que el RC80 ocupa los poros directamente conectados con la superficie (porosidad libre o abierta), mejorando así la cohesión del material.

La velocidad de los ultrasonidos no varía en alguna de las direcciones del espacio (V_x , V_y o V_z), lo cual sucede en las siguientes circunstancias: 1) al tratar con RC80 las muestras de cantera de Los Santos (paso de L a LRC80 en V_z), 2) en las muestras de cantera de Calzadilla (paso de C a CRC80 en V_x y V_y) y 3) en las muestras de CS de Calzadilla (paso de Ccs a CcsRC80 en V_x y V_y). Esto nos puede indicar que el tratamiento aplicado no llega a cerrar eficientemente la porosidad interconectada de las probetas testadas.

A nivel cromático, el efecto del RC80 sobre las probetas de las tres variedades de C y las dos de CS, produce que éstas se oscurezcan (L^* disminuye), que amarilleen (b^* aumenta) y que enrojezcan (a^* aumenta), al igual que el H224 y el RC70.

Comparativamente con los otros tratamientos, las probetas tratadas con RC80 son las que mayor oscurecimiento y enrojecimiento muestran, seguidas por las tratadas con RC70.

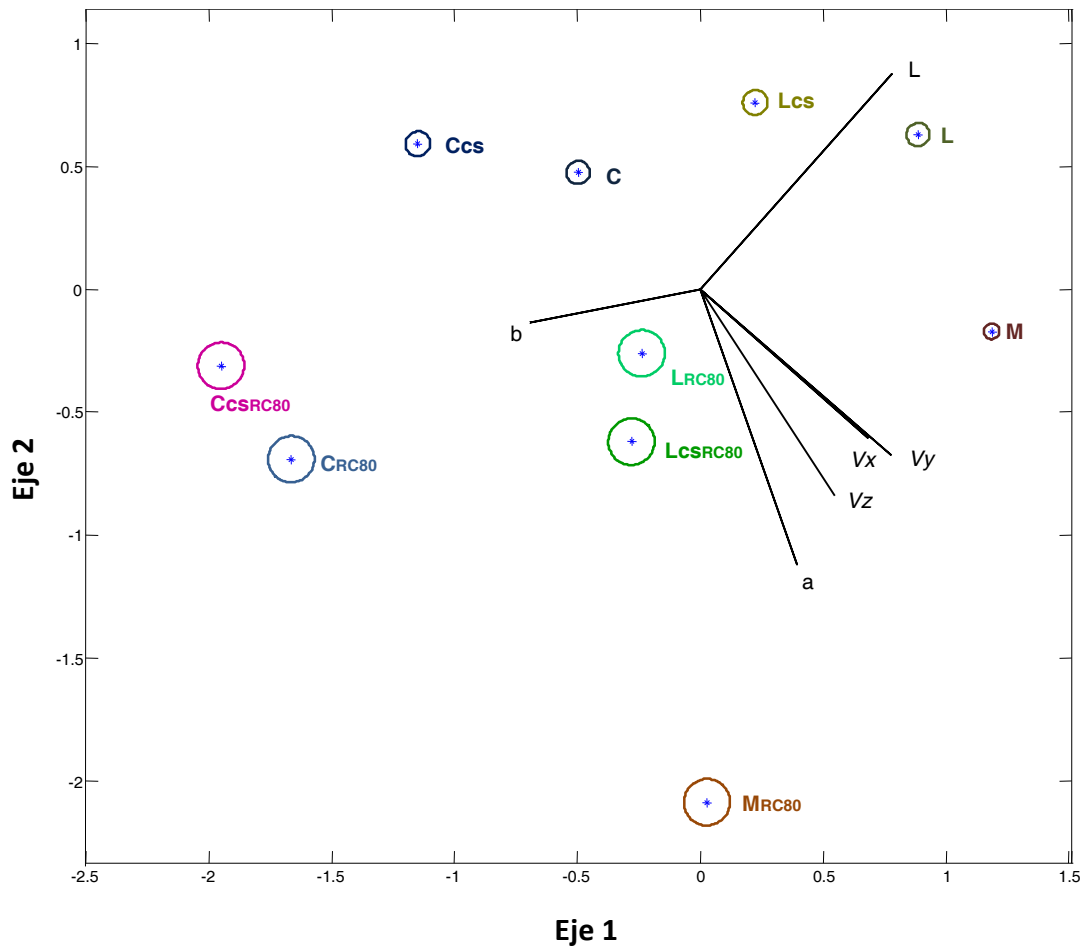


Figura 5.42. Detalle del plano 1-2 del Biplot Canónico del análisis 4 con las muestras de Martinamor, Los Santos y Calzadilla de C y de Calzadilla y Los Santos de CS y posteriormente tratadas con RC80.

5.3 DETERMINACIÓN DE LA DURABILIDAD DE LOS TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

Para establecer la durabilidad de los tratamientos de conservación aplicados (H224, RC70 y RC80), las rocas tratadas se someten a un envejecimiento artificial acelerado por hielo/deshielo junto con frío/calor, cuyo efecto se controla y evalúa con las mismas herramientas empleadas para determinar la eficacia de los tratamientos: el control de su aspecto, las variaciones ponderales y, las variaciones en la velocidad de propagación de ultrasonidos y del color, tanto en las rocas de cantera, como en las CS. En las rocas de cantera tratadas y posteriormente envejecidas, además, se evalúa la durabilidad del tratamiento mediante las variaciones de las propiedades petrofísicas al agua.

Se verá, por separado, la acción del envejecimiento por HD sobre cada uno de los tratamientos.

5.3.1 DURABILIDAD DEL HIDROFUGANTE

Descripción de visu

Todas las rocas tratadas con H224 y posteriormente sometidas a envejecimiento por hielo/deshielo junto con frío/calor no muestran un deterioro apreciable durante el proceso, por lo que nos centramos en su estado al finalizar el ensayo, no mostrando apenas deterioro al finalizar el mismo (Figura 5.43 y Figura 5.44), excepto en las muestras CS de las dos variedades, en las que tras los 25 ciclos de envejecimiento presentan un aumento en la rugosidad de la superficie al tacto y se marcan de nuevo las fracturas ya presentes cuando se les aplicó el envejecimiento por CS original.

Variaciones ponderales

El estudio de las variaciones de peso se lleva a cabo de la misma forma que en el estudio de la durabilidad de la roca de cantera y la eficacia de los tratamientos de conservación, determinando la diferencia de peso, en gramos, entre el peso de la probeta antes y después de los 25 ciclos de envejecimiento por HD.

En las Figura 5.45 y Figura 5.46 está representada la variación ponderal de las muestras con los distintos tratamientos de conservación testados: hidrofugación (H224), consolidación (RC70) y consolidación+hidrofugación (RC80) y las mismas muestras tras el envejecimiento por HD.

El envejecimiento sobre las muestras tratadas con H224 de cualquier variedad, ya sean de cantera o de CS, origina una pérdida de peso en las probetas, lo que indica que llega a degradar el producto hidrofugante aplicado. La pérdida de peso es más acusada en las muestras de CS que en las de cantera. Dentro de las muestras de cantera, las de Martinamor son las que menos peso pierden.

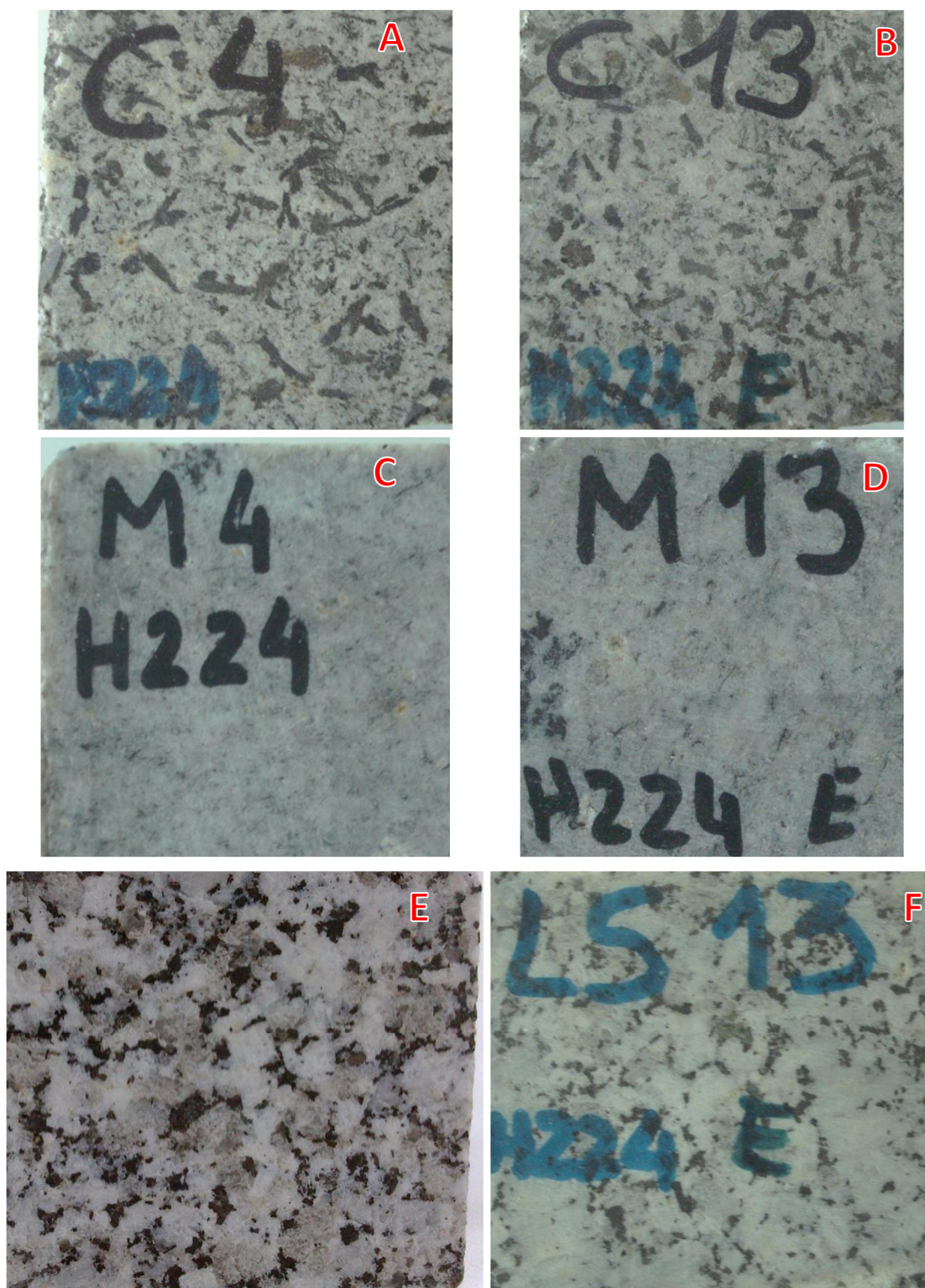


Figura 5.43. Probetas tratadas con H224 (A, C y E) y envejecidas por HD (B, D y F) de Calzadilla, Martinamor y Los Santos, respectivamente.



Figura 5.44. Probetas CS tratadas con H224 (A y C) y después envejecidas por HD (B y D) de Calzadilla y Los Santos, respectivamente.

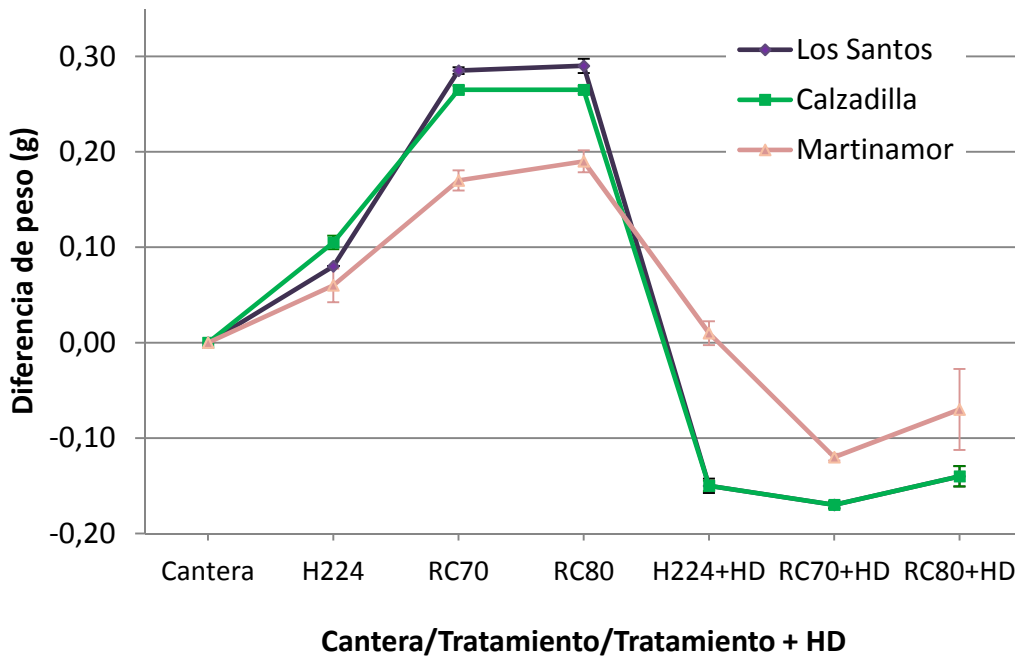


Figura 5.45. Variación ponderal de las muestras de Los Santos, Calzadilla y Martinamor de cantera, tratadas con H224, RC70 y RC80 y posteriormente envejecidas por HD. En cada punto, está representado el error típico de la media por una barra vertical.

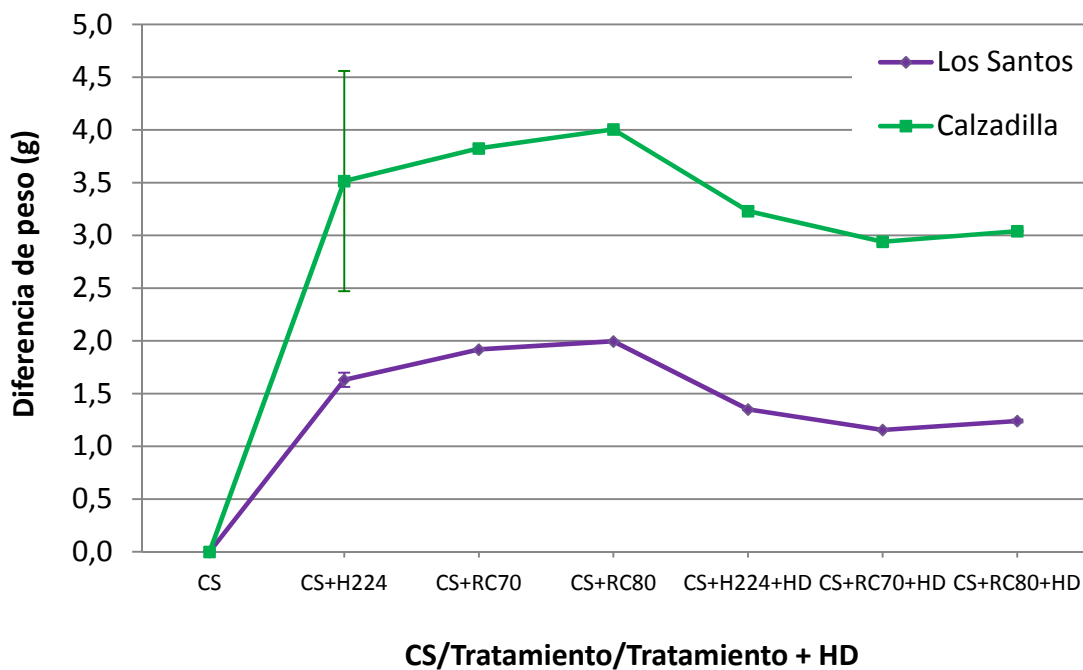


Figura 5.46. Variación ponderal de las muestras de Los Santos y Calzadilla de CS, tratadas con H224, RC70 y RC80, y posteriormente envejecidas por HD. En cada punto está representado el error típico de la media por una barra vertical.

Microscopía electrónica de barrido

Se han realizado observaciones de las muestras tratadas con H224 tras el envejecimiento por HD. En la Figura 5.47 se presenta un ejemplo del aspecto de los minerales (plagioclasas) bajo MEB tras tratar una muestra, de granito de Los Santos de cantera, con H224 y posteriormente envejecerla por HD. El producto que anteriormente tapizaba las superficies, presenta huecos y discontinuidades al verse alterado por el envejecimiento.

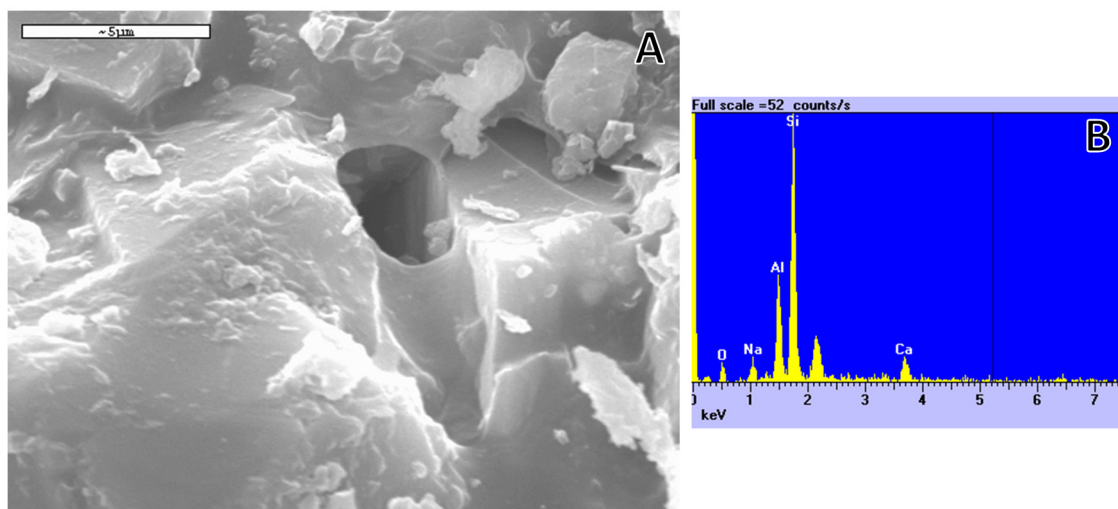


Figura 5.47. Imagen de MEB: A) plagioclasa de granito de Los Santos tratado con H224 y posteriormente envejecida por HD (C+H224+HD), B) espectro de la imagen A.

Porosimetría de mercurio

Se ha realizado porosimetría de mercurio en muestras de cantera, CS y tratadas con H224 y envejecidas por HD. Los resultados están recogidos en la Tabla 5.7.

La porosidad total y la porosidad interparticular asciende en la mayoría de los casos con el envejecimiento, excepto en las muestras de Los Santos de cantera y de CS, donde desciende ligeramente el valor de los dos parámetros. Esto indica el ligero deterioro del producto de hidrofugación aplicado con los ciclos de envejecimiento. En cuanto al área superficial media, el comportamiento es dispar, aumentando y disminuyendo muy poco y sin lógica aparente, aunque hay que recordar que estamos tratando con valores de órdenes de magnitud muy pequeños y cualquier variación es muy pequeña.

El intervalo de diámetro de poro se mantiene constante en todos los casos, como puede verse en el histograma de distribución porosimétrica de las Figura 5.48 y

Figura 5.49. En los histogramas de las muestras CS (Figura 5.49) se aprecia cómo el envejecimiento hace que aumente la porosidad de mayor diámetro de poro a expensas de la de menor tamaño, fenómeno que también se intuye en las muestras de cantera de Los Santos tratadas con H224 y posteriormente envejecidas.

Tabla 5.7. Valores del estudio de porosimetría de mercurio de las muestras de Calzadilla, Los Santos y Martinamor de cantera, CS tratadas con hidrofugante H224 y posteriormente envejecidas por HD.

| <i>Muestra</i> | <i>Características</i> | <i>AS (m²/g)</i> | <i>PT (%)</i> | <i>PInter. (%)</i> |
|----------------|------------------------|-----------------------------|---------------|--------------------|
| Calzadilla | H224 | 1,256E-03 | 0,5664 | 0,4963 |
| Calzadilla | H224+HD | 2,591E-04 | 0,7657 | 0,7657 |
| Los Santos | H224 | 1,347E-04 | 0,3261 | 0,3261 |
| Los Santos | H224+HD | 1,194E-04 | 0,2978 | 0,2978 |
| Martinamor | H224 | 5,315E-05 | 0,2127 | 0,2127 |
| Martinamor | H224+HD | 8,290E-05 | 0,3119 | 0,3119 |
| Calzadilla | CS+H224 | 3,316E-04 | 0,1843 | 0,1843 |
| Calzadilla | CS+H224+HD | 1,139E-04 | 0,2978 | 0,2978 |
| Los Santos | CS+H224 | 3,391E-04 | 0,5530 | 0,5530 |
| Los Santos | CS+H224+HD | 2,822E-04 | 0,5388 | 0,5388 |

AS: Área superficial media PT: Porosidad total. PInter.: Porosidad Interpartícula.

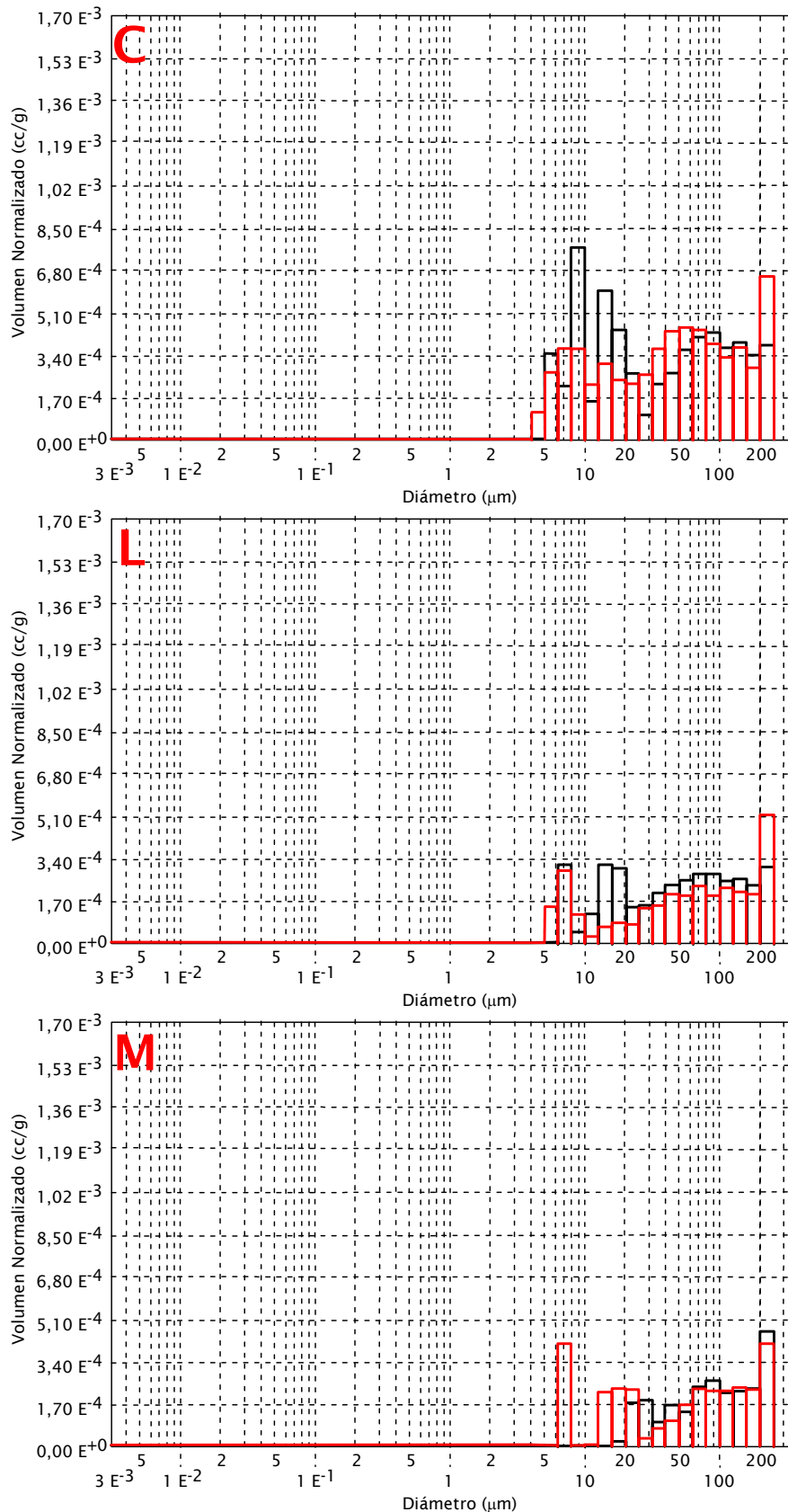


Figura 5.48. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos de muestras de cantera tratadas con H224 (negro) y envejecidas HD (rojo). C: vaugnerita de Calzadilla. L: granito de Los Santos y, M: leucogranito de Martinamor.

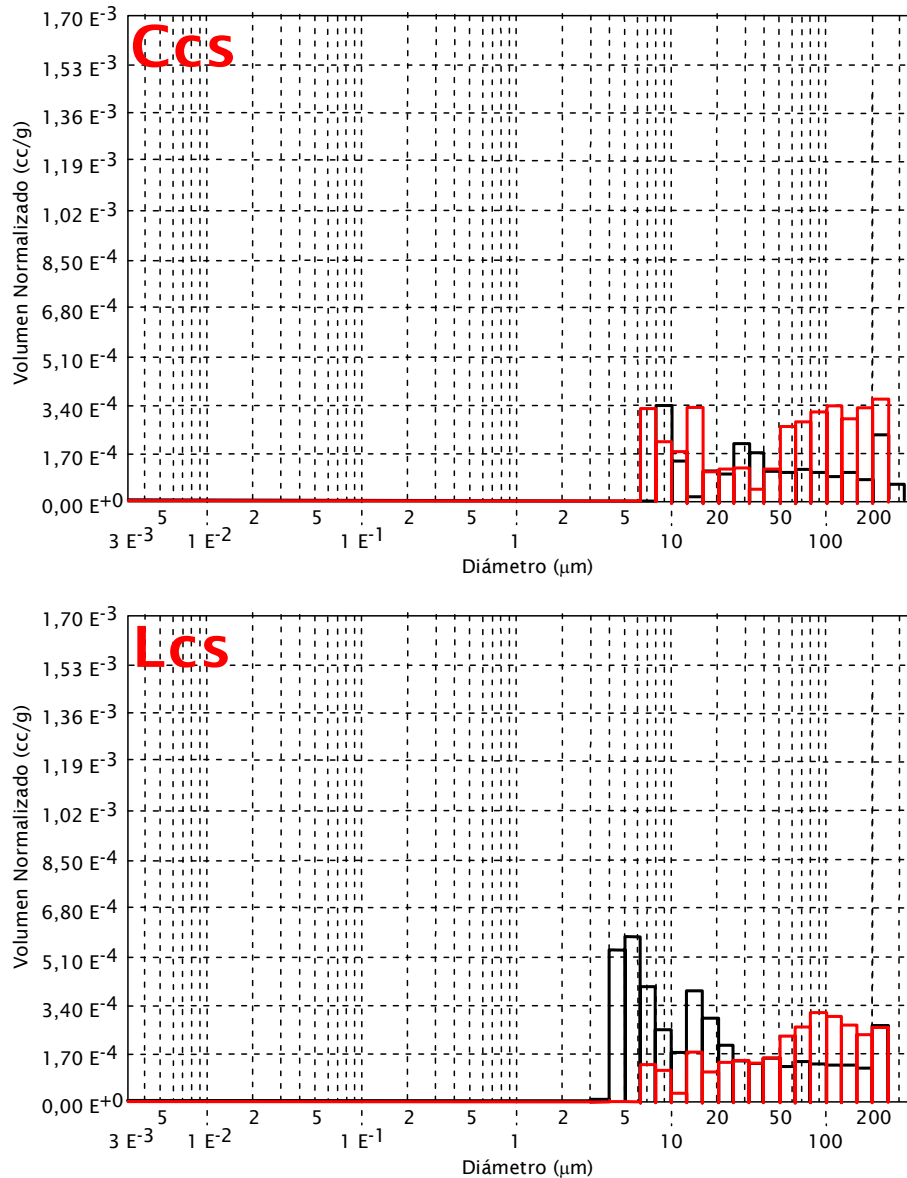


Figura 5.49. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos de muestras de CS tratadas con H224 (negro) y envejecidas HD (rojo). C: vaugnerita de Calzadilla y L: granito de Los Santos

Propiedades petrofísicas determinadas al agua

Para la determinación de la durabilidad de los tratamientos de conservación aplicados se emplea un análisis Biplot Canónico (análisis 5) sobre todos los datos de las distintas propiedades petrofísicas determinadas al agua, obtenidos antes y después de la aplicación de los tratamientos y tras el envejecimiento por HD.

El estudio se realiza en las tres variedades de roca, vaugnerita de Calzadilla, granito de Los Santos y granito turmalínifero de Martinamor. Los grupos, son las distintas combinaciones del tipo de roca en estado natural, con los distintos tratamientos (H224, RC70 y RC80) y el envejecimiento por HD. Las variables estudiadas

son las propiedades petrofísicas determinadas en agua: Porosidad total accesible al agua (PT) y libre (PL), Coeficiente de Absorción (CA), Densidad Real (DR) y Aparente (DA), Coeficiente de Absorción Capilar (CAC) e Imbibición (CI). La Permeabilidad al vapor del agua no se ha tenido en cuenta a la hora de hacer el análisis estadístico dado que no influye en el análisis. Su variabilidad es cero, es decir, la permeabilidad de las rocas es la misma tanto en las muestras tratadas, como en aquellas envejecidas artificialmente por HD después de tratarlas.

La aplicación de la técnica estadística multivariante Biplot Canónico a estos datos arroja un $p\text{-value} < 0,001$, claramente significativo, y un valor de la λ de Wilks de 6,3629. En la Figura 5.50 puede verse el gráfico resultante de la proyección del plano 1-2.

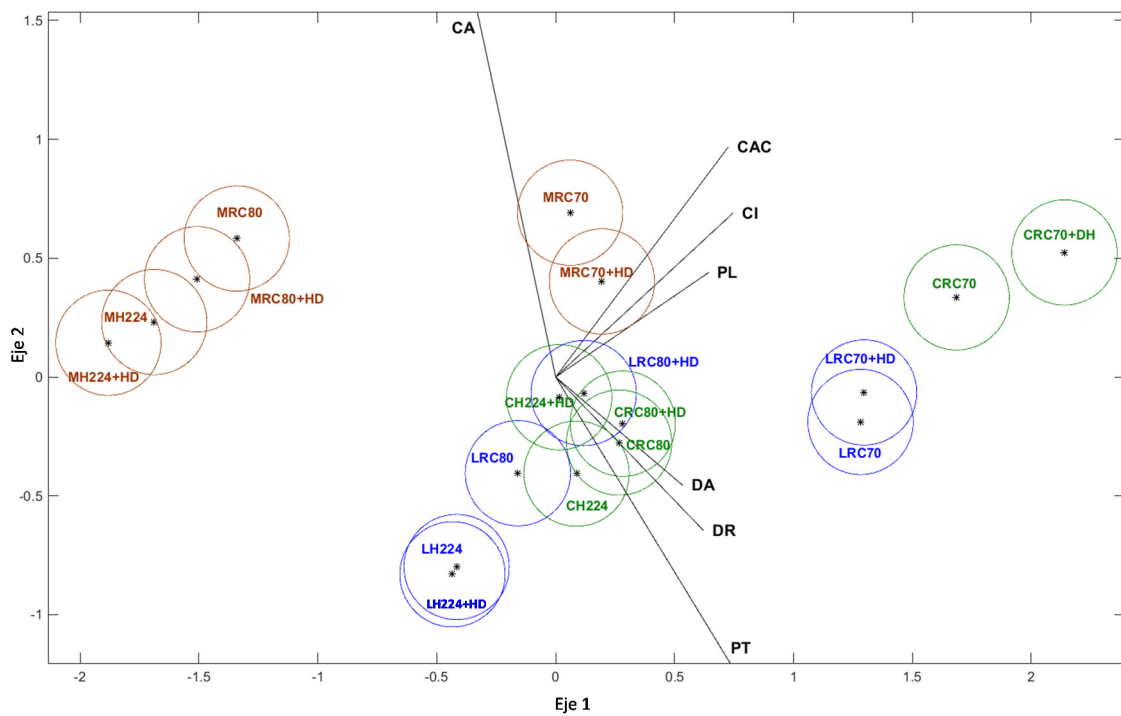


Figura 5.50. Plano 1-2 del Biplot Canónico (análisis 5) para la determinación de la durabilidad de los productos de conservación aplicados a las tres variedades de cantera, estudiando su comportamiento antes y después de la someterlos a envejecimiento por HD, mediante el estudio de las propiedades petrofísicas determinadas al agua.

En las tres variedades en las que se ha aplicado el hidrofugante H224, el envejecimiento por HD no produce ningún cambio considerable en ninguna de las propiedades hídricas estudiadas, como puede deducirse de la Figura 5.50, donde se ve como las representaciones de las muestras tratadas con H224 se solapan con las de roca tratadas y envejecidas (H224HD).

Velocidad de propagación de ultrasonidos y color

Una herramienta más para determinar la forma en que este envejecimiento afecta a las rocas de cantera es el estudio de la velocidad de propagación de los ultrasonidos a través de las tres direcciones del espacio (V_v , V_y y V_z), y el estudio de las coordenadas cromáticas del sistema de color recomendado por la CIE (1976) (L^* , a^* , b^*). Para ello, se toman medidas de estas variables antes y después de someter las probetas de cantera y Cs tratadas, al envejecimiento por HD y con estos datos, se realiza un Biplot Canónico (análisis 6), obteniéndose un valor de la λ de Wilks de 43,3949 y un p -value < 0,001. El gráfico del plano 1-2 resultante puede verse en la Figura 5.51. Para poder hacer una interpretación más clara se estudia por separado la durabilidad del cada uno de los tratamientos. Los datos están en la Tabla V, ANEXO.

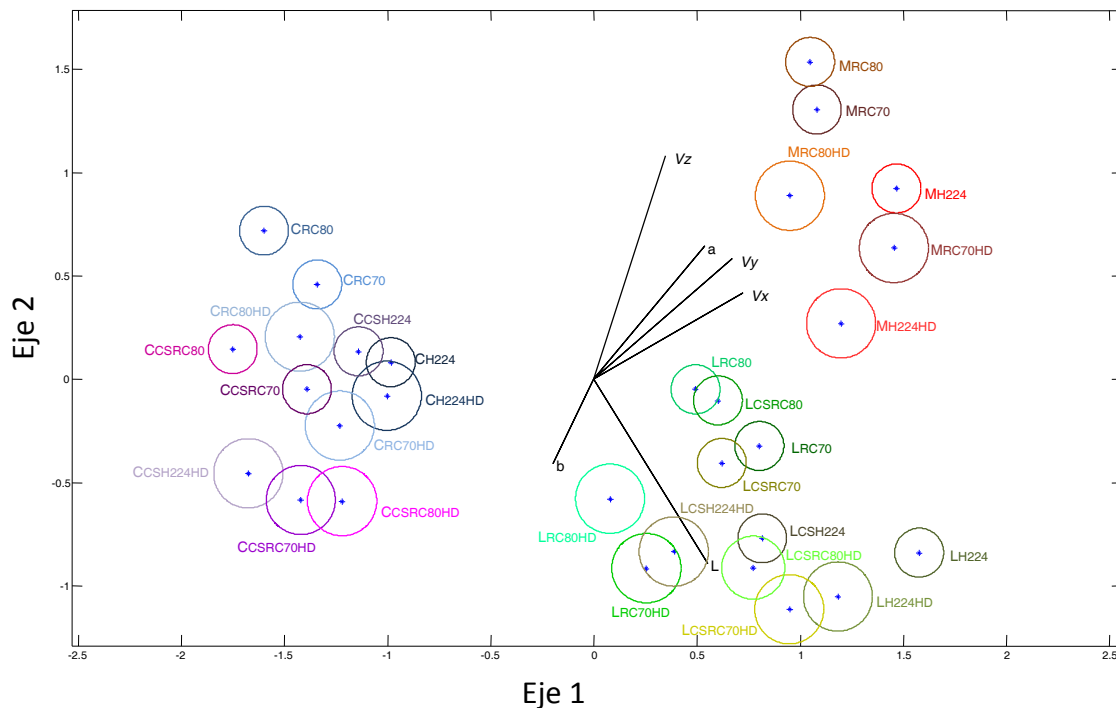


Figura 5.51. Plano 1-2 del Biplot Canónico (análisis 6) para la determinación de la durabilidad de los tratamientos de conservación aplicados a roca de cantera y CS de las tres variedades estudiadas, mediante el estudio del color y la velocidad de propagación de ultrasonidos.

La velocidad de propagación de los ultrasonidos en las tres variedades pétreas estudiadas nunca aumenta tras someter las muestras tratadas con H224 a envejecimiento HD (Figura 5.52), tanto si son de cantera como si son de CS. Las muestras de Martinamor y las de Los Santos de cantera, junto con las de Calzadilla de CS muestran un descenso en la velocidad de propagación de ultrasonidos con el HD.

Las muestras de Calzadilla de cantera no varían la velocidad de propagación de los ultrasonidos con el envejecimiento, mientras que en las de Los Santos de CS desciende en V_x y V_y y no varía en V_z .

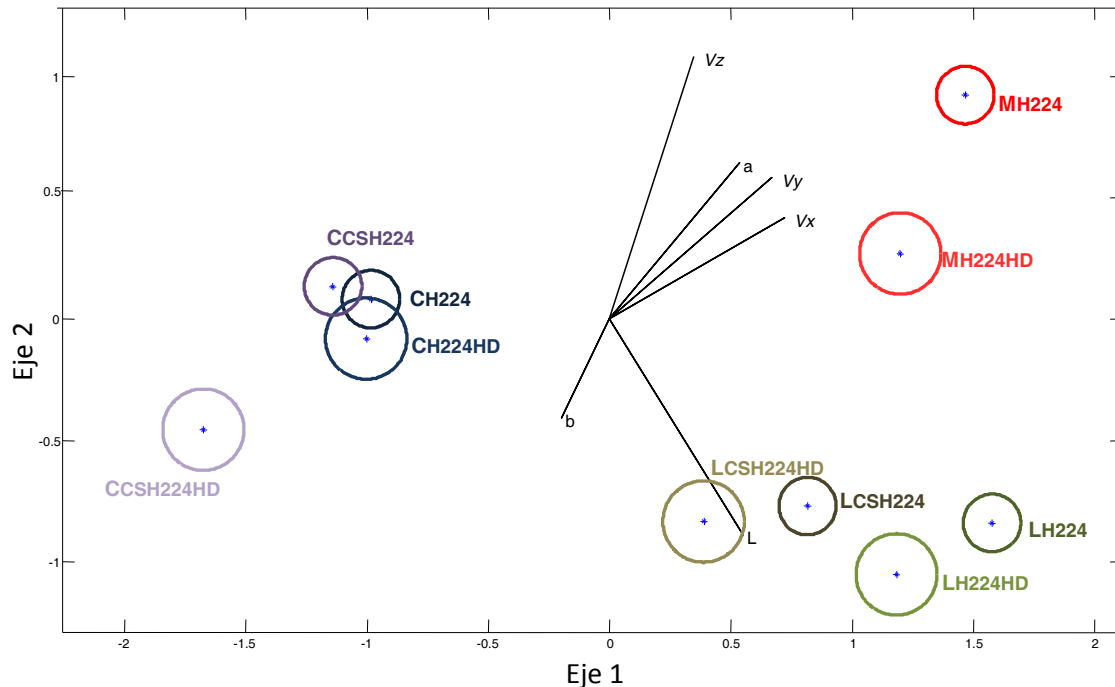


Figura 5.52. Detalle del plano 1-2 del Biplot Canónico (análisis 6) con la representación de las muestras tratadas sólo con H224 y H224+HD.

A nivel cromático, el efecto del envejecimiento por HD sobre las muestras de las tres variedades previamente tratadas con H224, en líneas generales, no produce cambios en la variable L^* , excepto en las muestras de Martinamor que se aclaran ligeramente (L^* aumenta); hace que pierdan el enrojecimiento (a^* disminuye), excepto en las muestras de cantera de Calzadilla, donde la variable a^* no varía y hace que amarillean (b^* aumenta), aunque las muestras de Los Santos de CS y de Calzadilla de Cantera no presentan variaciones en la variable b^* (Figura 5.52).

5.3.2 DURABILIDAD DEL CONSOLIDANTE

Descripción de visu

Ninguna de las rocas tratadas con consolidante RC70 y posteriormente sometidas a envejecimiento por HD muestran un deterioro apreciable durante el

proceso, por lo que nos centramos en su estado al finalizar el ensayo. Las muestras de cantera apenas presentan deterioro al finalizar los ciclos de envejecimiento (Figura 5.53). Las muestras CS, de las dos variedades, presentan un aumento en la rugosidad de la superficie al tacto (Figura 5.54).

Variaciones ponderales

El envejecimiento sobre las muestras tratadas con RC70 de cualquier variedad, ya sean de cantera o de CS, origina una ligera pérdida de peso en las probetas. La pérdida de peso es más acusada en las muestras de CS que en las de cantera (Figura 5.45 y Figura 5.46). Dentro de las muestras de cantera, las de Martinamor son las que menos peso pierden y las de Los Santos las que mayor pérdida muestran. En las muestras de CS, la pérdida es similar en ambos tipos de rocas.

Microscopía electrónica de barrido

Se han realizado observaciones de las muestras tratadas con RC70 tras el envejecimiento por HD. En la Figura 5.55 se presenta un ejemplo del aspecto de los minerales (plagioclasas) bajo MEB tras tratar una muestra, de granito de Los Santos de cantera, con RC70 y posteriormente envejecerla por HD. El producto que anteriormente tapizaba las superficies se presenta agrietado y con huecos por pérdida de materia al verse alterado por el envejecimiento.

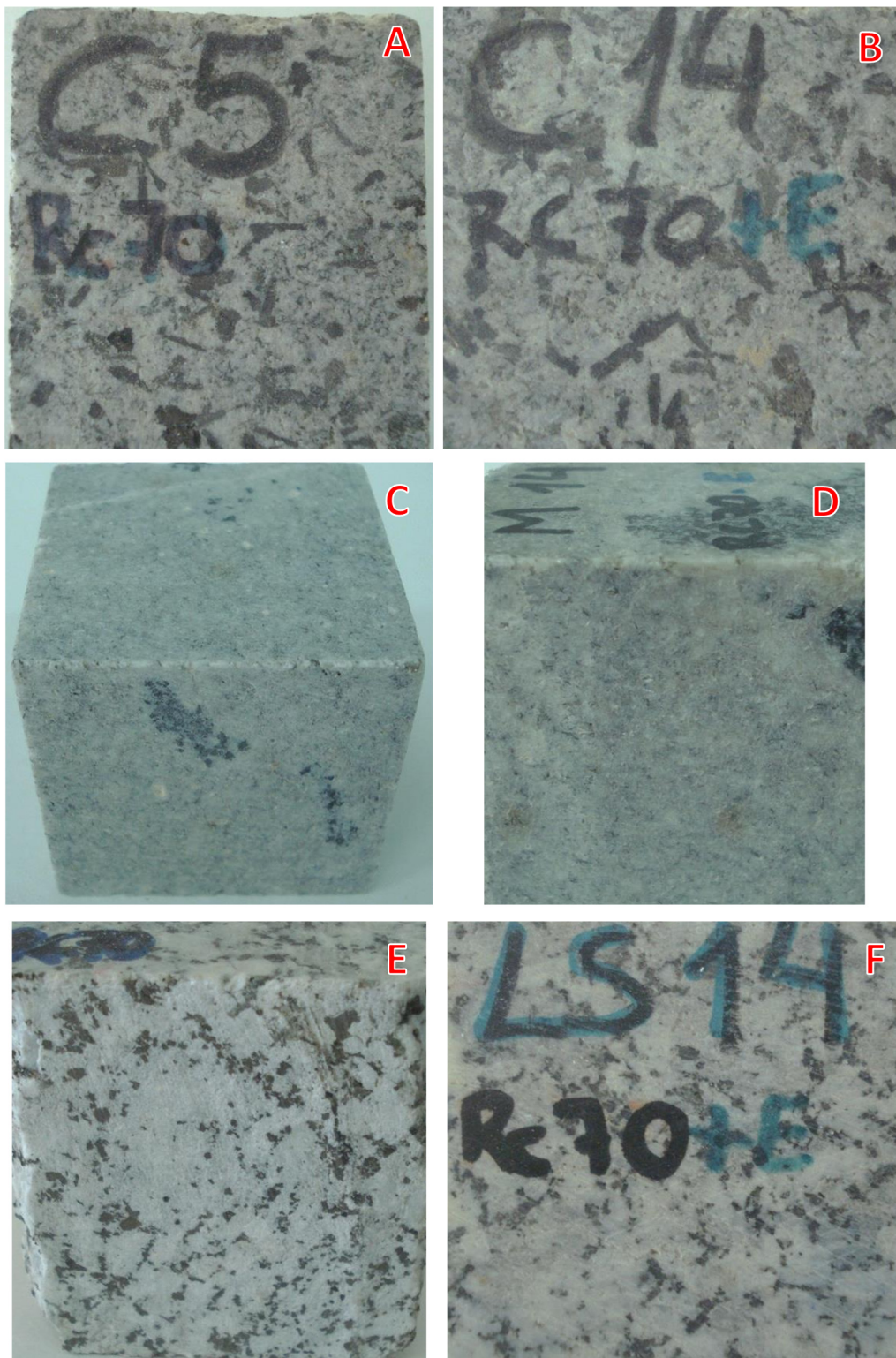


Figura 5.53. Probetas tratadas con RC70 (A, C y E) y envejecidas por HD (B, D y F) de Calzadilla, Martinamor y Los Santos, respectivamente.



Figura 5.54. Probetas CS tratadas con RC70 (A y C) y después envejecidas por HD (B y D) de Calzadilla y Los Santos, respectivamente.

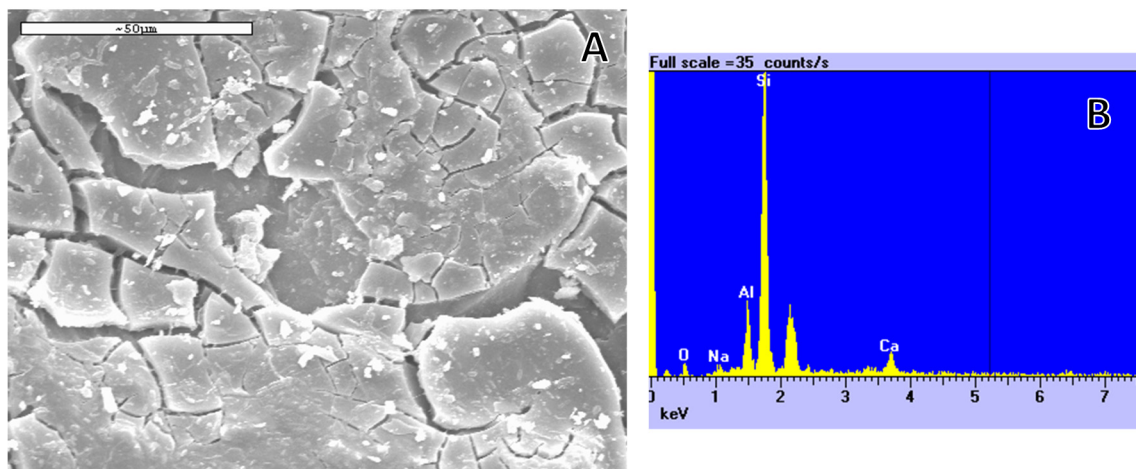


Figura 5.55. Imagen de MEB: A: plagioclasa de granito de Los Santos tratado con RC70 y posteriormente envejecida por HD. B: espectro de la imagen A.

Porosimetría de mercurio

Se ha realizado porosimetría de mercurio en muestras de cantera, CS y tratadas con RC70 y envejecidas por HD. Los resultados están recogidos en la Tabla 5.8 y los histogramas de distribución porosimétrica están en las Figura 5.56 y Figura 5.57.

Tabla 5.8. Valores del estudio de porosimetría de mercurio de las muestras de Calzadilla, Los Santos y Martinamor de cantera, CS tratadas con RC70 y posteriormente envejecidas por HD.

| <i>Muestra</i> | <i>Características</i> | <i>AS (m²/g)</i> | <i>PT (%)</i> | <i>PInter. (%)</i> |
|----------------|------------------------|-----------------------------|---------------|--------------------|
| Calzadilla | RC70 | 2,329E-04 | 0,4679 | 0,4679 |
| Calzadilla | RC70+HD | 1,540E-03 | 1,1385 | 1,1201 |
| Los Santos | RC70 | 9,378E-05 | 0,2127 | 0,2127 |
| Los Santos | RC70+HD | 1,121E-04 | 0,3687 | 0,3687 |
| Martinamor | RC70 | 6,236E-04 | 0,1560 | 0,1560 |
| Martinamor | RC70+HD | 1,844E-04 | 0,5813 | 0,5813 |
| Calzadilla | CS+RC70 | 6,943E-04 | 0,4361 | 0,3970 |
| Calzadilla | CS+RC70+HD | 3,578E-04 | 1,0918 | 1,0918 |
| Los Santos | CS+RC70 | 2,494E-04 | 0,4537 | 0,4537 |
| Los Santos | CS+RC70+HD | 9,656E-05 | 0,3545 | 0,3545 |

AS: Área superficial media PT: Porosidad total. PInter.: Porosidad Interpartícula.

La porosidad total y la porosidad interparticular asciende en la mayoría de los casos con el envejecimiento, excepto en las muestras de Los Santos de CS, donde desciende ligeramente el valor de los dos parámetros. Esto indica el ligero deterioro del producto de consolidación aplicado con los ciclos de envejecimiento. En cuanto al área superficial media, las muestras de Calzadilla y Los Santos de cantera aumentan su valor, mientras que el resto disminuyen.

El intervalo de diámetro de poro se mantiene constante en todos los casos, como puede verse en los histogramas de distribución porosimétrica. En los histogramas de las muestras de cantera de Calzadilla y Los Santos se aprecia una tendencia a la apertura de porosidad de menor tamaño de poro a expensas de la de mayor diámetro.

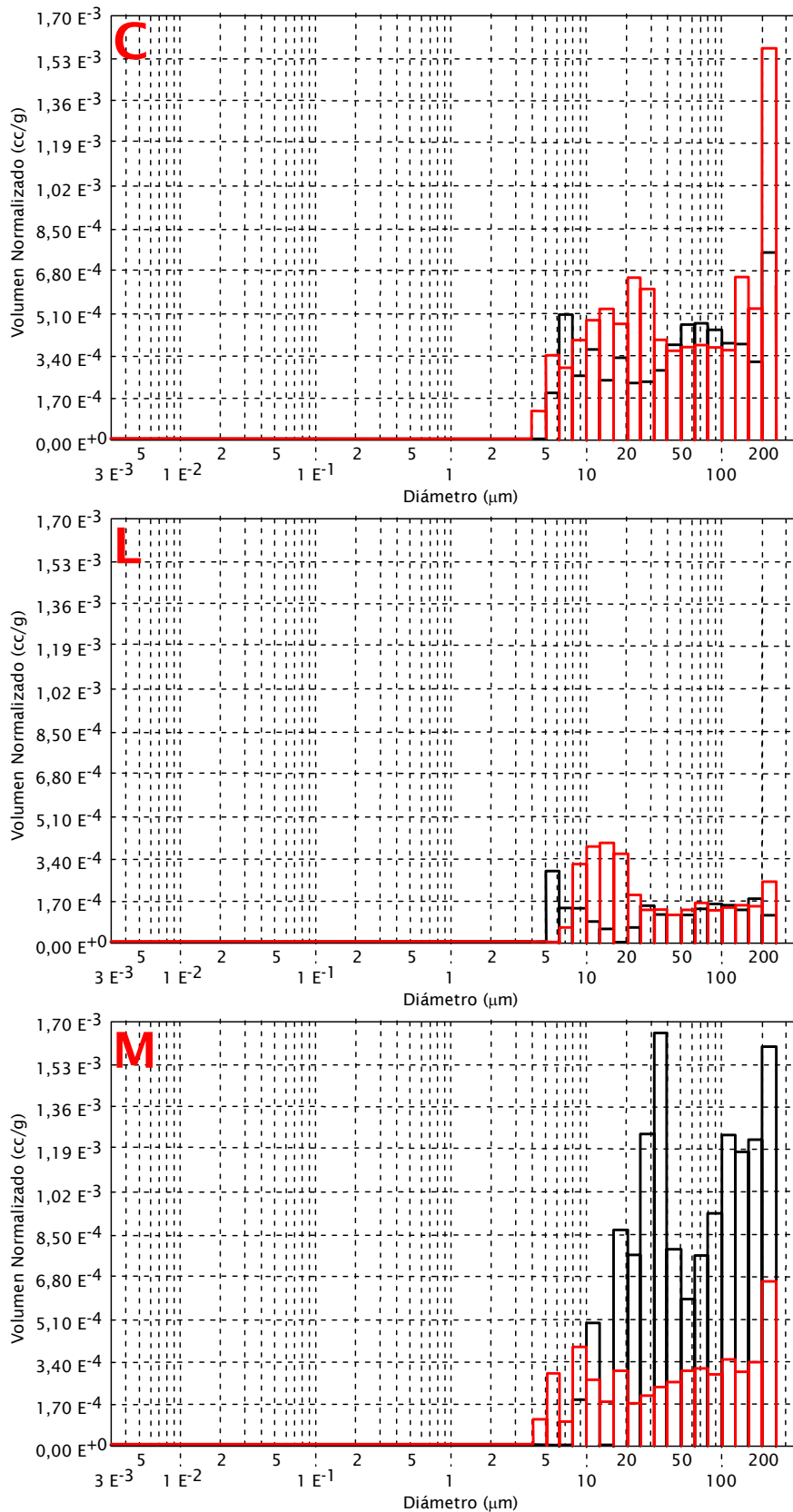


Figura 5.56. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos de muestras de cantera tratadas con RC70 (negro) y envejecidas HD (rojo). C: vaugnerita de Calzadilla. L: granito de Los Santos y, M: leucogranito de Martinamor.

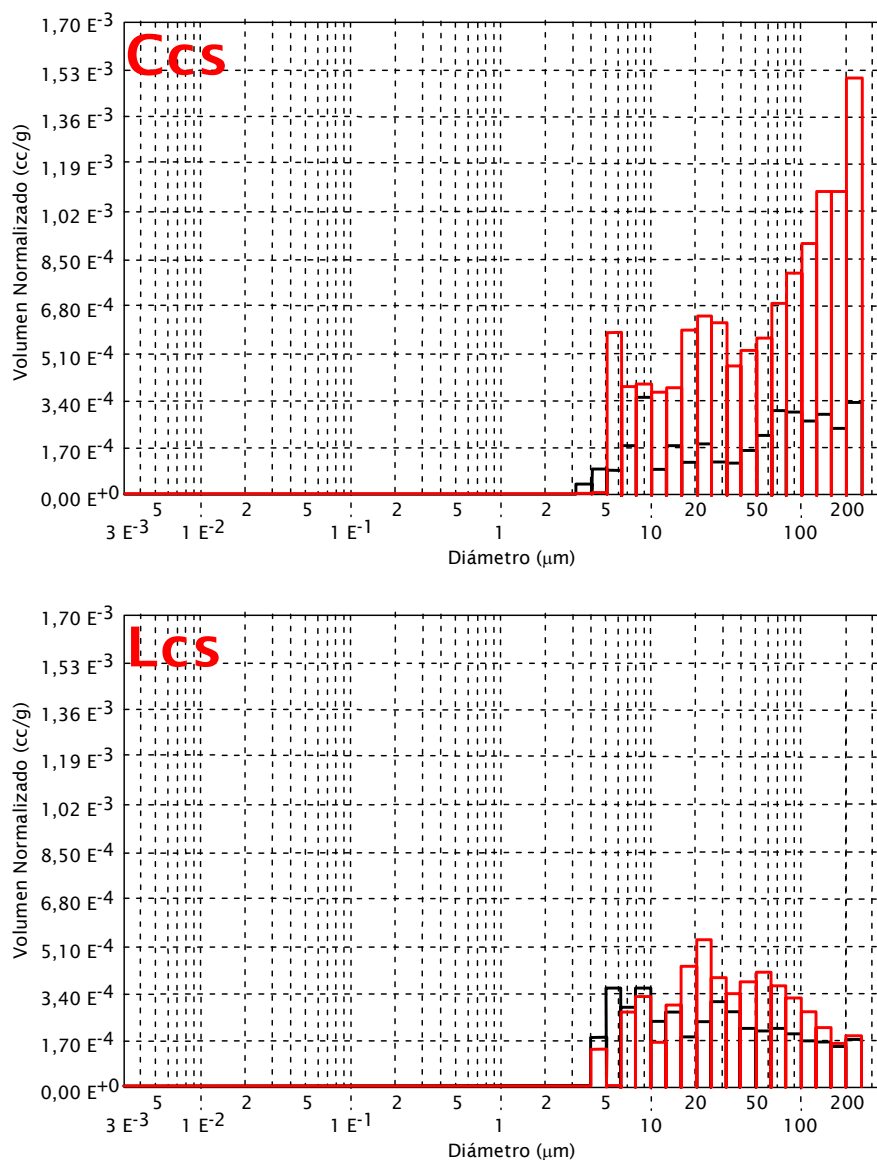


Figura 5.57. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos de muestras de CS tratadas con RC70 (negro) y envejecidas HD (rojo). C: vaugnerita de Calzadilla y L: granito de Los Santos

Propiedades petrofísicas determinadas al agua

En las tres variedades en las que se ha aplicado el consolidante RC70, el envejecimiento por HD no produce ningún cambio considerable en ninguna de las propiedades hídricas estudiadas, excepto en las muestras de Calzadilla, donde la porosidad libre y el coeficiente de imbibición aumentan con el envejecimiento, como puede deducirse de la Figura 5.50.

Velocidad de propagación de ultrasonidos y color

La velocidad de propagación de los ultrasonidos en las tres variedades pétreas estudiadas nunca aumenta tras someter las muestras tratadas con RC70 a envejecimiento HD (Figura 5.58), tanto si son de cantera, como si son de CS, como ocurre con las muestras tratadas con H224 y posteriormente envejecidas. Las muestras de Los Santos de cantera presentan un descenso en la velocidad de propagación de ultrasonidos con el HD en todas las direcciones. En Las muestras de Calzadilla de cantera y de CS la velocidad desciende en Vz y Vy y no varía en Vx, mientras que en las muestras de Martinamor y Los Santos de CS desciende en Vz y no varía en Vx y Vy.

En general, la velocidad, disminuye un poco o se mantiene estable. El descenso en la velocidad de propagación de ultrasonidos nos puede indicar que las muestras envejecidas presentan una mayor porosidad, es decir, el envejecimiento HD en la zona de microporos, produce la apertura de los poros de menor tamaño para dar lugar a otros de mayor diámetro, lo que hace que aumente la porosidad directamente interconectada con la superficie (porosidad libre o abierta), haciendo que la velocidad de ultrasonidos de estas muestras sea menor (Iñigo *et al.*, 2000b)

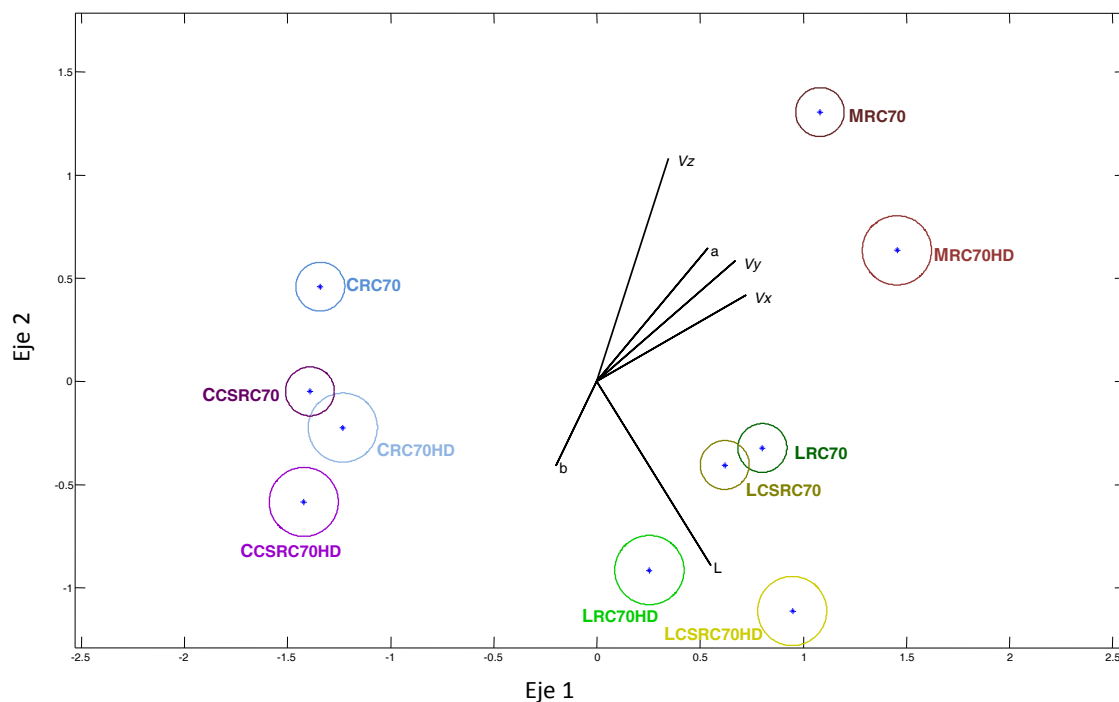


Figura 5.58. Detalle del plano 1-2 del Biplot canónico (análisis 6) con la representación de las muestras tratadas sólo con RC70 y RC70+HD.

A nivel cromático, el efecto del envejecimiento HD sobre las muestras de las tres variedades previamente tratadas con RC70, amarillea las muestras (aumenta la variable b^*). En líneas generales, aclaran (aumenta L^*), excepto en las muestras de Los Santos de cantera donde L^* no varía; y, pierden el enrojecimiento (a^* disminuye), excepto en las muestras de cantera de Martinamor, donde la variable a^* no varía (Figura 5.58).

5.3.3 DURABILIDAD DEL CONSOLIDANTE CON HIDROFUGANTE

Descripción de visu

Todas las rocas tratadas con consolidante + hidrofugante (RC80) y posteriormente sometidas a envejecimiento por HD no muestran un deterioro apreciable durante el proceso, ni al finalizar el ensayo. Las muestras de cantera apenas muestran deterioro al finalizar los ciclos de envejecimiento (Figura 5.59). Las muestras CS de las dos variedades presentan un aumento en la rugosidad de la superficie al tacto (Figura 5.60) y un cambio cromático apreciable.

Variaciones ponderales

El envejecimiento sobre las muestras tratadas con RC80 de cualquier variedad, ya sean de cantera o de CS, origina una pérdida de peso en las probetas (Figura 5.45 y Figura 5.46), lo que indica que llega a degradar el producto aplicado. La pérdida de peso es más acusada en las muestras de CS que en las de cantera. Dentro de las muestras de cantera, las de Martinamor son las que menos peso pierden y las de Los Santos las que mayor pérdida muestran, mientras que en las muestras de CS, las que mayor pérdida de masa presentan son las de Calzadilla.

Microscopía electrónica de barrido

Se han realizado observaciones de las muestras tratadas con RC80 tras el envejecimiento por HD. En la Figura 5.61 se presenta un ejemplo del aspecto de los minerales (biotita) bajo MEB tras tratar una muestra, de vaugnerita de Calzadilla de cantera, con RC80 y posteriormente envejecerla por HD. El producto que anteriormente tapizaba las superficies se presenta con grietas y con huecos por pérdida de materia al verse alterado por el envejecimiento.

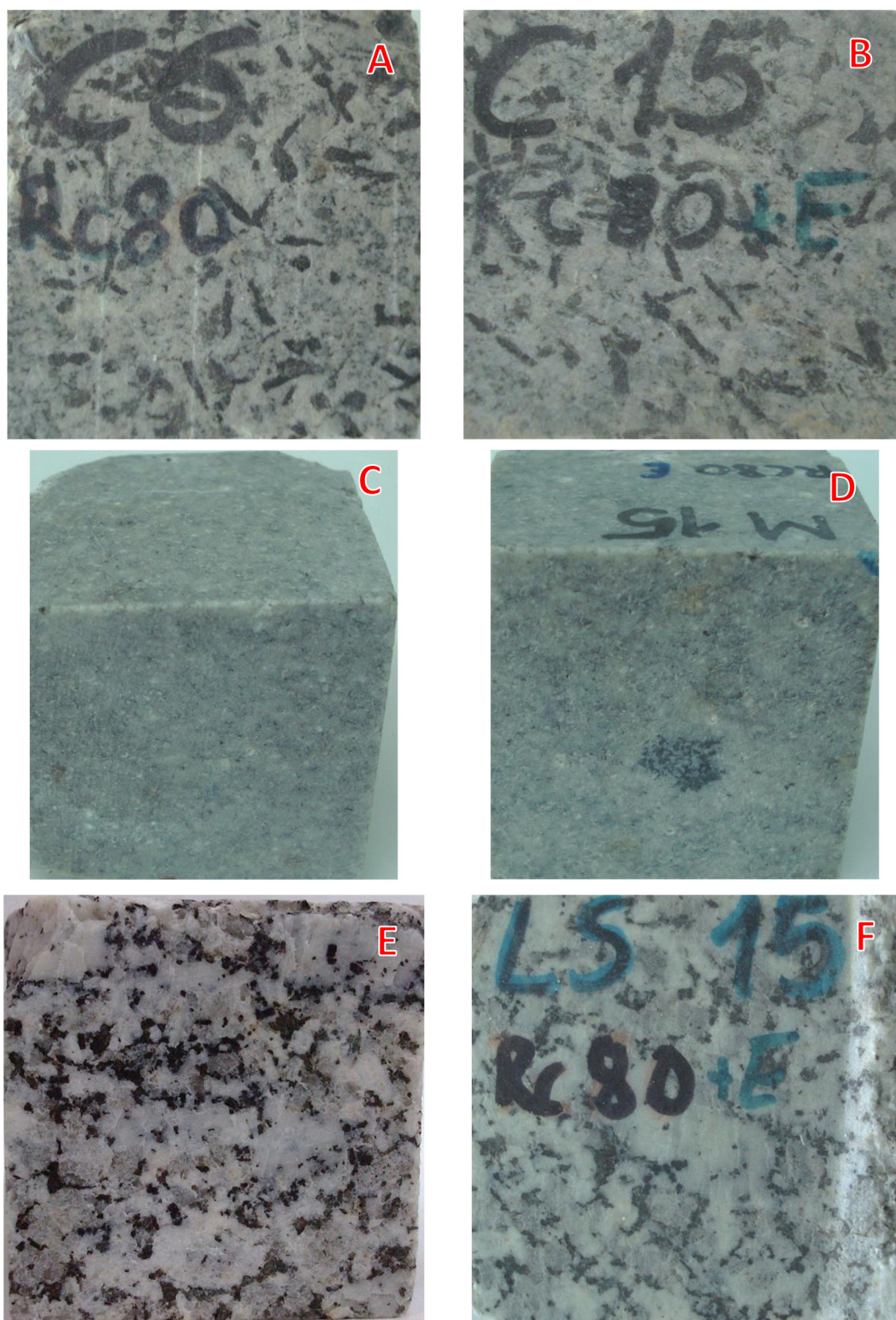


Figura 5.59. Probetas tratadas con RC80 (A, C y E) y envejecidas por HD (B, D y F) de Calzadilla, Martinamor y Los Santos, respectivamente.



Figura 5.60. Probetas CS tratadas con RC80 (A y C) y después envejecidas por HD (B y D) de Calzadilla y Los Santos, respectivamente.

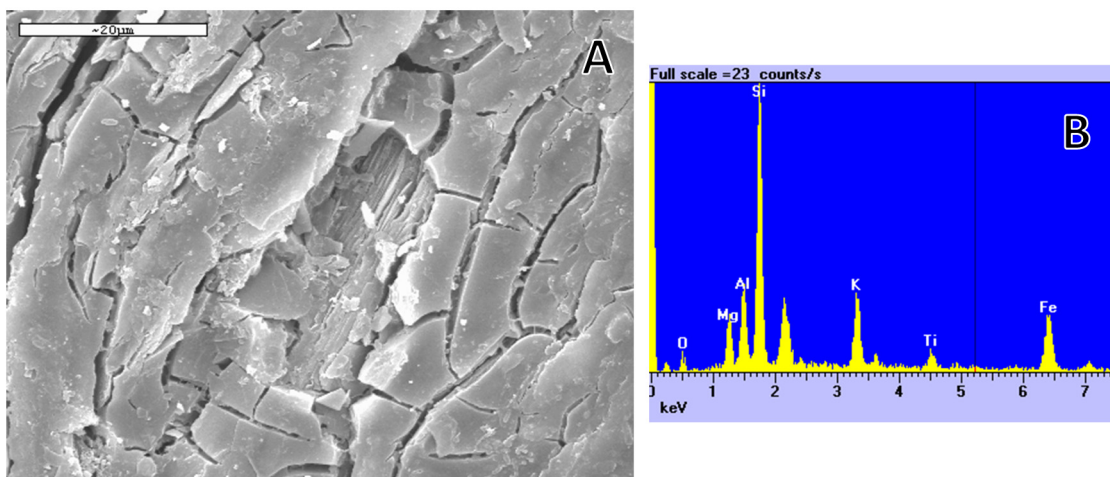


Figura 5.61. Imagen de MEB: A: biotitas de vaugnerita de Calzadilla tratada con RC80 y posteriormente envejecida por HD. B: espectro de la imagen A.

Porosimetría de mercurio

Se ha realizado porosimetría de mercurio en muestras de cantera y CS tratadas con RC80 y envejecidas por HD. Los resultados están recogidos en la Tabla 5.9, y los histogramas de distribución porosimétrica están en las Figura 5.62 y Figura 5.63.

Tabla 5.9. Valores del estudio de porosimetría de mercurio de las muestras de Calzadilla, Los Santos y Martinamor de cantera, CS tratadas con RC80 y posteriormente envejecidas por HD.

| <i>Muestra</i> | <i>Características</i> | <i>AS (m²/g)</i> | <i>PT (%)</i> | <i>PInter. (%)</i> |
|----------------|------------------------|-----------------------------|---------------|--------------------|
| Calzadilla | RC80 | 1,435E-04 | 0,3545 | 0,3545 |
| Calzadilla | RC80+HD | 2,425E-04 | 0,8791 | 0,8791 |
| Los Santos | RC80 | 1,984E-04 | 0,6239 | 0,6239 |
| Los Santos | RC80+HD | 1,727E-04 | 0,3686 | 0,3686 |
| Martinamor | RC80 | 4,393E-04 | 0,2054 | 0,1843 |
| Martinamor | RC80+HD | 1,725E-04 | 0,1866 | 0,1843 |
| Calzadilla | CS+RC80 | 8,213E-04 | 0,5188 | 0,5104 |
| Calzadilla | CS+RC80+HD | 1,621E-04 | 0,3545 | 0,3545 |
| Los Santos | CS+RC80 | 1,232E-04 | 0,2410 | 0,2410 |
| Los Santos | CS+RC80+HD | 1,585E-04 | 0,3119 | 0,3119 |

AS: Área superficial media PT: Porosidad total. PInter.: Porosidad Interpartícula.

El área superficial media aumenta en las muestras de Calzadilla de cantera y en las de Los Santos de CS. En el resto de las muestras disminuye ligeramente, pero siempre dentro del mismo orden de magnitud. La porosidad total y la porosidad interparticular ascienden en las mismas muestras en las que lo hace el área superficial y disminuyen en las mismas. Esto indica el ligero deterioro del producto de consolidación aplicado con los ciclos de envejecimiento.

El intervalo de diámetro de poro se mantiene constante en todos los casos, como puede verse en los histogramas de distribución porosimétrica (Figura 5.62 y Figura 5.63).

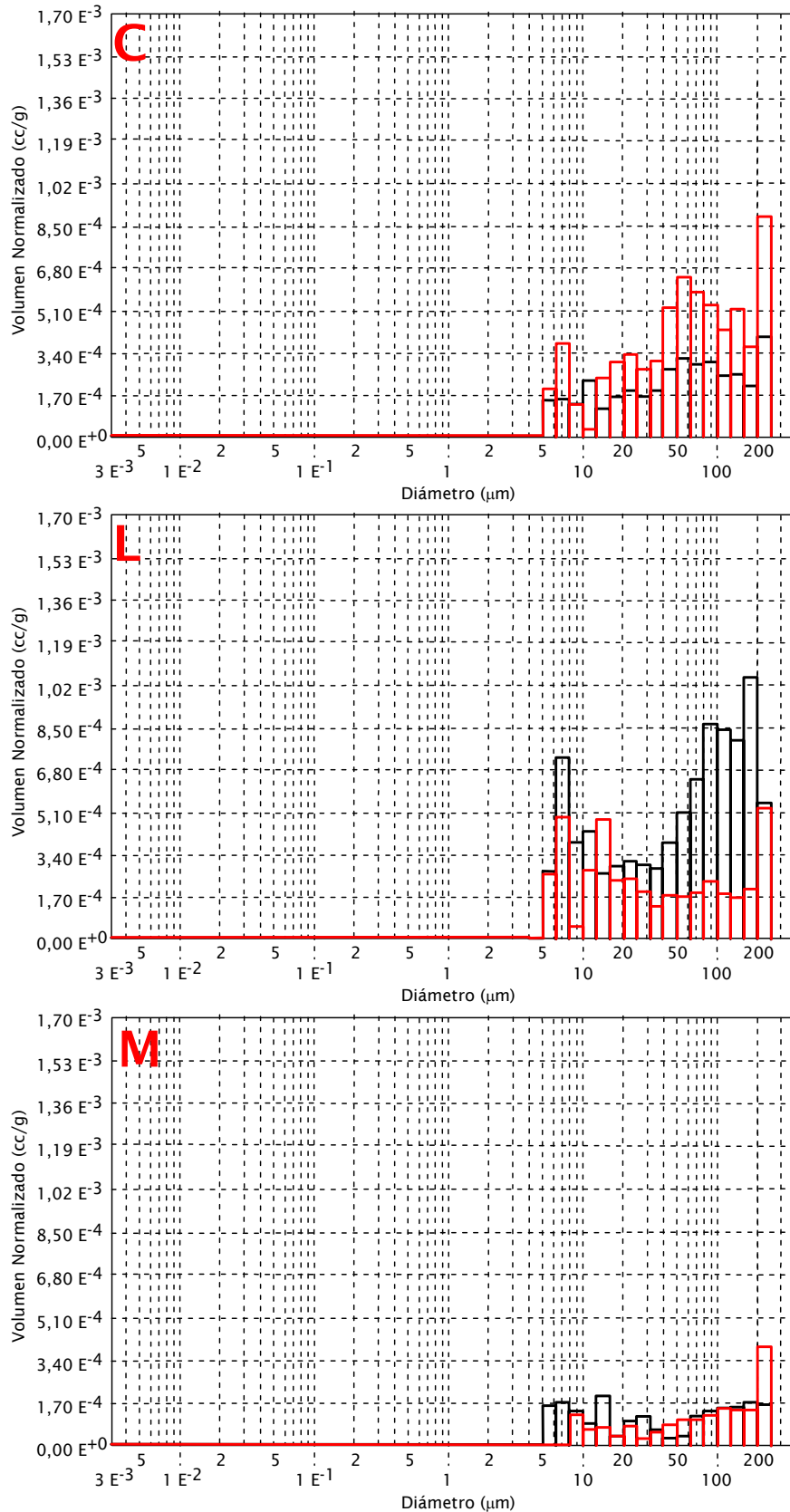


Figura 5.62. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos de muestras de cantera tratadas con RC80 (negro) y envejecidas HD (rojo). C: vaugnerita de Calzadilla. L: granito de Los Santos y, M: leucogranito de Martinamor.

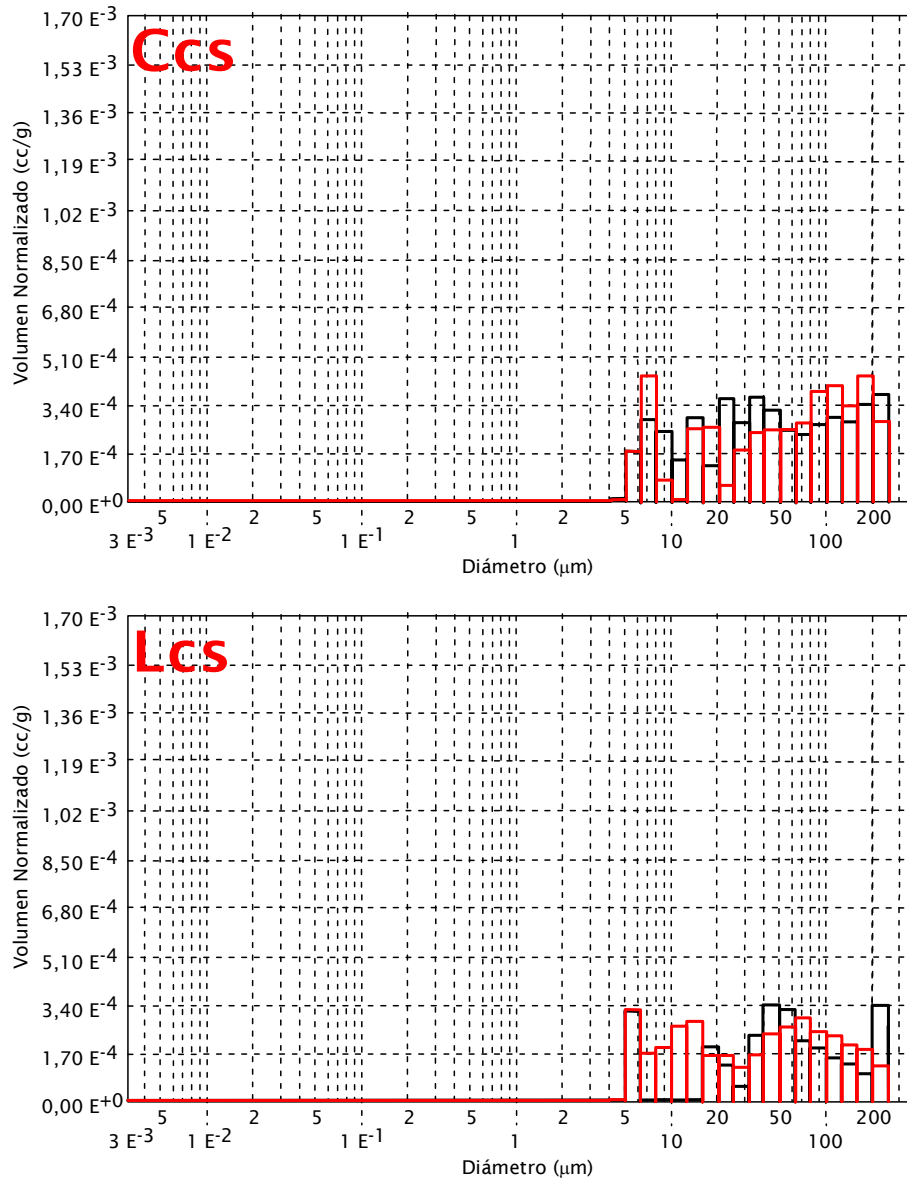


Figura 5.63. Histogramas de distribución porosimétrica obtenidos de muestras de CS tratadas con RC80 (negro) y envejecidas HD (rojo). C: vaugnerita de Calzadilla y L: granito de Los Santos.

Propiedades petrofísicas determinadas al agua

En las tres variedades en las que se ha aplicado el consolidante + hidrofugante, RC80, el envejecimiento por HD no produce ningún cambio en ninguna de las propiedades hídras estudiadas, como puede deducirse de la Figura 5.50, donde se ve como las representaciones de las muestras tratadas con RC80 se solapan o tocan con las de roca tratadas y envejecidas (RC80HD).

Velocidad de propagación de ultrasonidos y color

La velocidad de propagación de los ultrasonidos en las tres variedades pétreas estudiadas nunca aumenta tras someterlas muestras tratadas con RC80 a envejecimiento HD (Figura 5.64), tanto si son de cantera, como si son de CS, como ocurre con las muestras tratadas con H224 o RC70 y posteriormente envejecidas. Las muestras de Los Santos y Martinamor de cantera muestran un descenso en la velocidad de propagación de ultrasonidos con el HD en todas las direcciones. En Las muestras de Calzadilla de cantera y de CS la velocidad desciende en Vz y no varía en Vx y Vy, mientras que en las muestras de Los Santos de CS desciende en Vz y Vy, no variando en Vx.

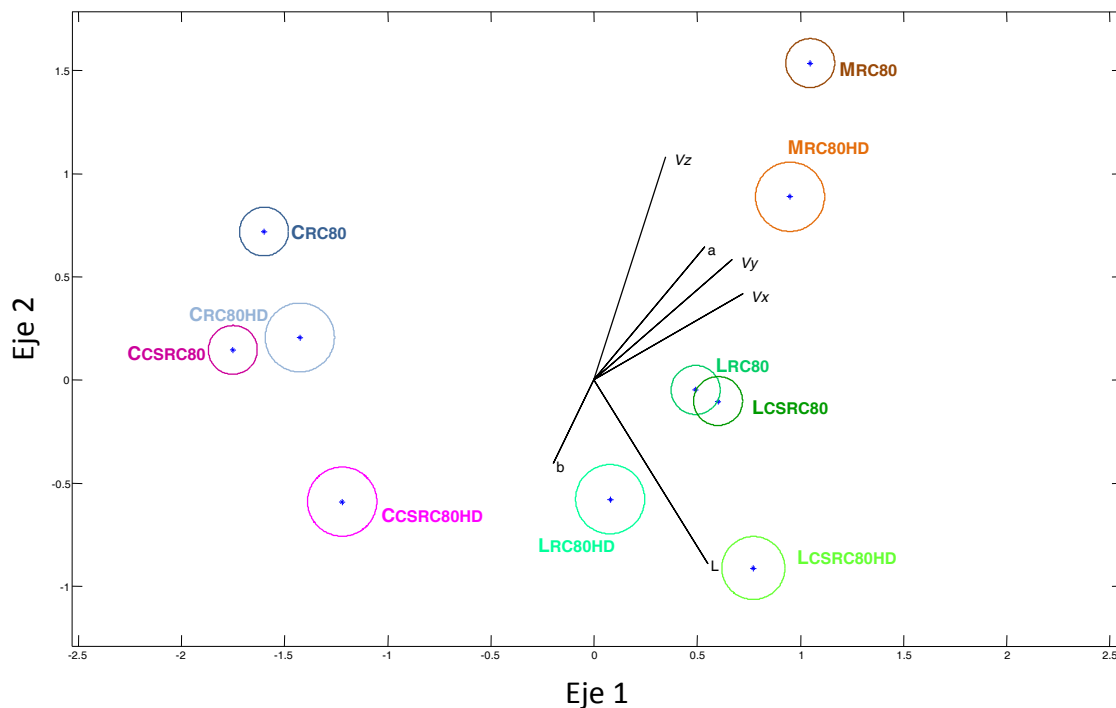


Figura 5.64. Detalle del plano 1-2 del Biplot canónico (análisis 6) con la representación de las muestras tratadas sólo con RC80 y RC80+HD.

A nivel cromático, el efecto del envejecimiento HD sobre las muestras de las tres variedades previamente tratadas con RC80, amarillea las muestras (aumenta la variable b^*). En líneas generales, las muestras aclaran (aumenta L^*), excepto en las muestras de Los Santos de cantera donde L^* no varía; y, pierden el enrojecimiento (a^* disminuye), excepto en las muestras de Calzadilla de cantera y CS, donde la variable a^* no varía (Figura 5.64).

**6. ANIONES SOLUBLES EN AGUA PRESENTES EN LOS
MONUMENTOS**

Para la consecución del cuarto objetivo presentado en este trabajo «Determinar la influencia de las sales solubles en agua en el deterioro de materiales pétreos en función de su ubicación en un monumento» se realizan análisis Biplot Canónico individualizados para cada monumento, sobre los datos de aniones solubles en agua presentes en las muestras de monumento y en las rocas de cantera. Las variables estudiadas son los contenidos en aniones solubles en agua analizados (Cl^- , NO_3^- y $\text{SO}_4^{=}$), que quedan recogidos en la Tabla 6.1.

De las muestras tomadas en cada monumento, se hacen agrupaciones según la litología, orientación y posición en la vertical, de modo que estos grupos reciben una denominación abreviada representada por tres letras mayúsculas, del tipo “XYZ”, donde:

- **X** es la litología, que puede ser: M (leucogranito de Martinamor), C (Vaugnerita de Calzadilla) o L (granito de Los Santos)
- **Y** es la posición en la vertical, pudiendo ser: G (muestras tomadas en el suelo), D (entre 0 y 50 cm), M (entre 50 y 100 cm) o U (tomadas a más de 100 cm de altura), y
- **Z** es la orientación cardinal, es decir: N, norte; E, este; W, oeste y S, sur.

Un ejemplo de una muestra de la Plaza Mayor con esta nomenclatura sería: CMN, es decir, Vaugnerita de calzadilla (C), tomada a media altura (M: entre 50 y 100 cm) y orientada al norte (N). Esto mismo se aplica para las muestras del Conjunto Catedralicio y las del Puente Romano.

En el caso de las muestras tomadas en las canteras, la denominación se reduce a dos letras, la primera corresponde a la litología (C, M o L), como hemos indicado antes, y la segunda será una “C”. CC, MC y LC serán las denominaciones de las muestras de cantera de Calzadilla, Martinamor y Los Santos, respectivamente, y esta denominación será común y se empleará en los tres análisis de los tres monumentos.

En casos puntuales, las muestras tomadas a nivel del suelo se identificarán igualmente por dos letras, la primera corresponde a la litología (C, M o L) y la segunda será la “G”, pues carecen de altura en la vertical y de orientación cardinal. Así, tanto en el estudio del conjunto catedralicio, como en el de la Plaza Mayor existirá un grupo denominado CG y en el estudio del Puente Romano, uno denominado MG.

Tabla 6.1. Aniones solubles en agua en las muestras de los monumentos y cantera.

| <i>Denominación Biplot Canónico</i> | <i>Monumento</i> | <i>Aniones (ppm)</i> | | |
|---|------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | | <i>Cl⁻</i> | <i>NO₃⁻</i> | <i>SO₄⁼</i> |
| CDW | Catedral | 1,18 | 2,21 | 4,74 |
| CMW | Catedral | 1,39 | 3,63 | 4,55 |
| CUW | Catedral | 1,90 | 4,58 | 20,08 |
| CMW | Catedral | 1,41 | 3,43 | 3,84 |
| CDW | Catedral | 8,44 | 3,91 | 7,79 |
| CG | Catedral | 9,83 | 2,13 | 7,76 |
| CMN | Catedral | 9,74 | 2,85 | 11,85 |
| MDS | Catedral | 14,32 | 2,54 | 9,06 |
| MMS | Catedral | 2,71 | 3,51 | 4,33 |
| MUS | Catedral | 2,51 | 2,62 | 3,98 |
| MUS | Catedral | 4,08 | 5,77 | 4,39 |
| MDS | Catedral | 2,31 | 2,11 | 4,70 |
| MUS | Catedral | 2,70 | 2,15 | 4,76 |
| MUS | Catedral | 2,08 | 2,11 | 4,15 |
| LUN | Catedral | 2,05 | 2,19 | 4,26 |
| LUW | Puente | 2,72 | 3,80 | 5,05 |
| LDW | Puente | 3,13 | 2,52 | 6,63 |
| Larco | Puente | 3,47 | 9,76 | 13,84 |
| MG | Puente | 2,11 | 2,15 | 4,69 |
| CUE | Puente | 2,18 | 2,09 | 4,29 |
| CUE | Puente | 3,53 | 3,15 | 8,75 |
| CG | Plaza Mayor | 3,54 | 4,53 | 12,89 |
| CDS | Plaza Mayor | 2,31 | 2,23 | 18,56 |
| CDS | Plaza Mayor | 2,22 | 2,25 | 4,82 |
| CMN | Plaza Mayor | 2,87 | 3,23 | 16,47 |
| CDS | Plaza Mayor | 3,56 | 2,69 | 7,31 |
| CMS | Plaza Mayor | 2,92 | 4,92 | 7,92 |
| MDE | Plaza Mayor | 2,65 | 3,07 | 14,39 |
| MDE | Plaza Mayor | 3,04 | 4,09 | 17,57 |
| MDW | Plaza Mayor | 2,66 | 2,36 | 5,50 |
| MDW | Plaza Mayor | 2,12 | 2,29 | 5,04 |
| LDS | Plaza Mayor | 2,06 | 2,16 | 4,76 |
| LDS | Plaza Mayor | 2,23 | 2,39 | 5,92 |
| LDE | Plaza Mayor | 2,23 | 2,11 | 5,47 |
| LUE | Plaza Mayor | 2,22 | 2,25 | 6,39 |
| MQ | Cantera | 1,03 | 2,07 | 3,36 |
| CQ | Cantera | 1,04 | 2,08 | 3,43 |
| LQ | Cantera | 1,25 | 2,09 | 3,43 |

Conjunto Catedralicio

El Biplot Canónico da un resultado global con un valor de la λ de Wilks de 31,946 y un $p\text{-value} < 0,001$ ($1,9768 \cdot 10^{-45}$).

Se han proyectado en un gráfico todos los elementos de la matriz para el análisis de los diferentes campos (Figura 6.1), apreciándose dos grupos que se separan claramente del resto, impidiendo la correcta interpretación de los datos. Se trata de los grupos CUW y CMN, correspondientes a muestras de roca de Calzadilla orientadas al oeste (CUW) y al norte (CMN).

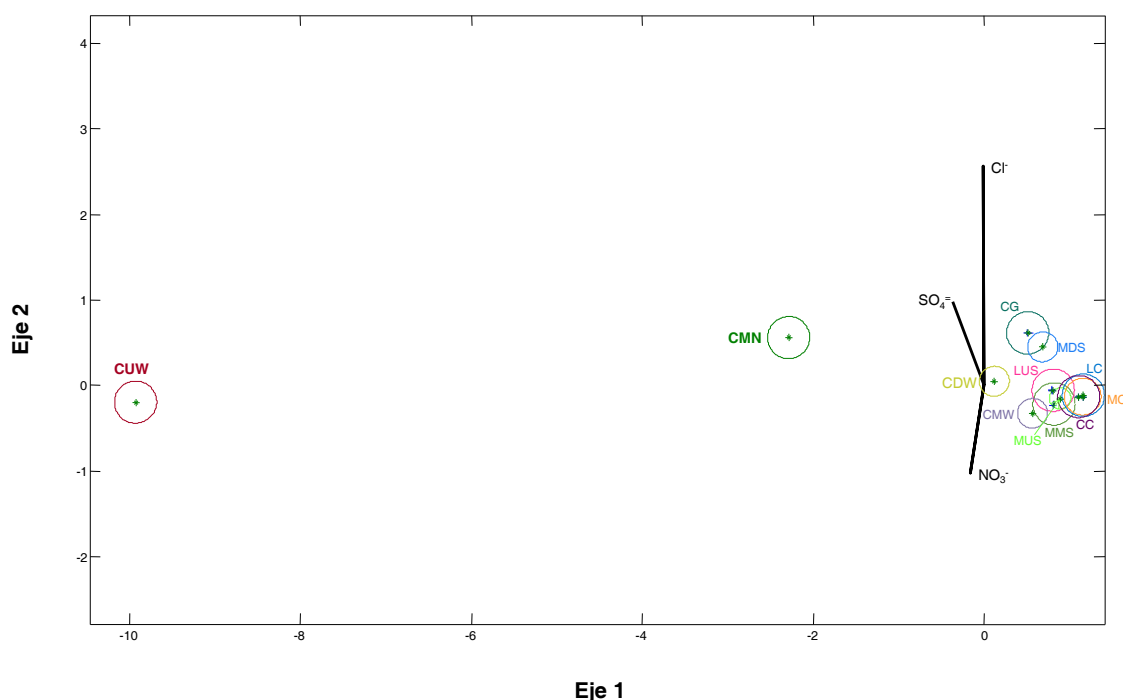


Figura 6.1. Plano 1-2 del Biplot Canónico de las muestras tomadas en el Conjunto Catedralicio.

Como puede verse en los análisis químicos (Tabla 6.1), la muestra CMN tiene mayores contenidos en Cl^- y SO_4^{2-} que los que presenta la muestra de Calzadilla tomada en las canteras (CC). Esta muestra está tomada en la Portada de Los Ramos de la Catedral Nueva, la cual fue restaurada antes de la IV Edición de las Edades del Hombre, “El contrapunto y su mirada”, albergada en el Conjunto Catedralicio de Salamanca entre 1993 y 1994. Es muy posible que los altos contenidos en sulfato y cloruro se deban a la utilización de mortero para sellar juntas entre bloques en dicha restauración, tal como se ve en la imagen tomada en el lugar y momento del muestreo (Figura 6.2).

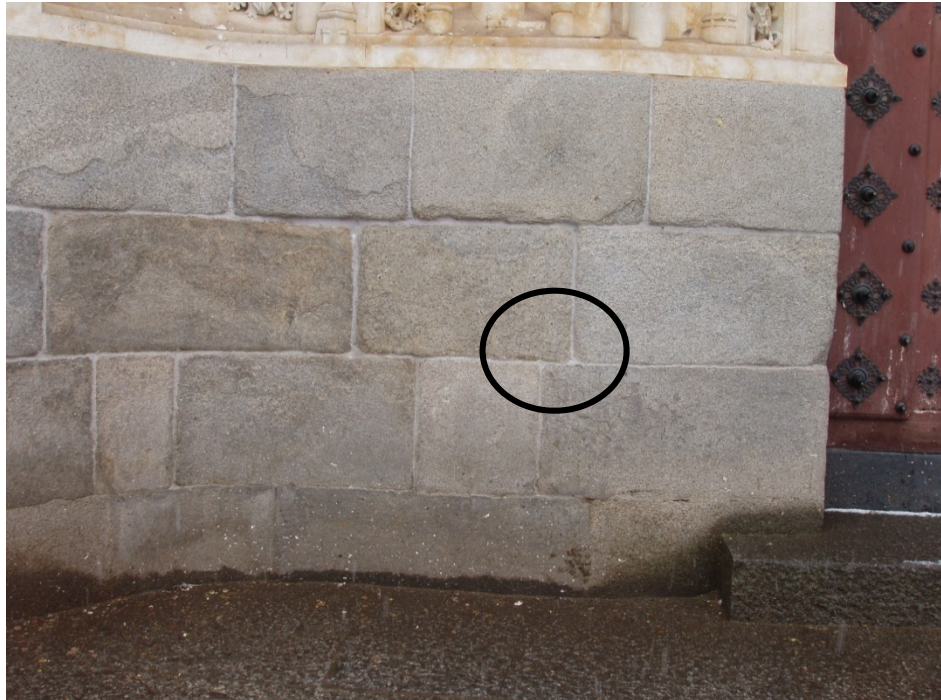


Figura 6.2. Lugar de toma de la muestra CMN en la Puerta de los Ramos en la Catedral Nueva de Salamanca

Por otro lado, la muestra CUW corresponde a una vaugnerita tomada a más de 1 m de altura en la Portada Principal de la Catedral Vieja. Tiene un mayor contenido en nitratos y sulfatos que el de las muestras de vaugnerita de cantera (Tabla 6.1). En la Figura 6.3 se detalla el lugar de toma de la muestra, en una esquina de un bloque de vaugnerita, cuyas juntas están selladas con un mortero gris, posible origen de las sales solubles presentes en la muestra.

Estos dos grupos son tan distintos del resto, que acaparan toda la variabilidad del análisis, por lo cual se decide, para la correcta interpretación estadística de los datos, realizar un nuevo análisis Biplot Canónico, prescindiendo de estos dos grupos.

El nuevo análisis ofrece un valor de la λ de Wilks de 6,4319, con un p -value < 0,001 ($9,1764 \cdot 10^{-13}$). El resultado del análisis se proyecta en un gráfico biplot (Figura 6.4), en el que cada círculo representa las regiones de confianza de cada grupo entorno a la media, representada por asteriscos.

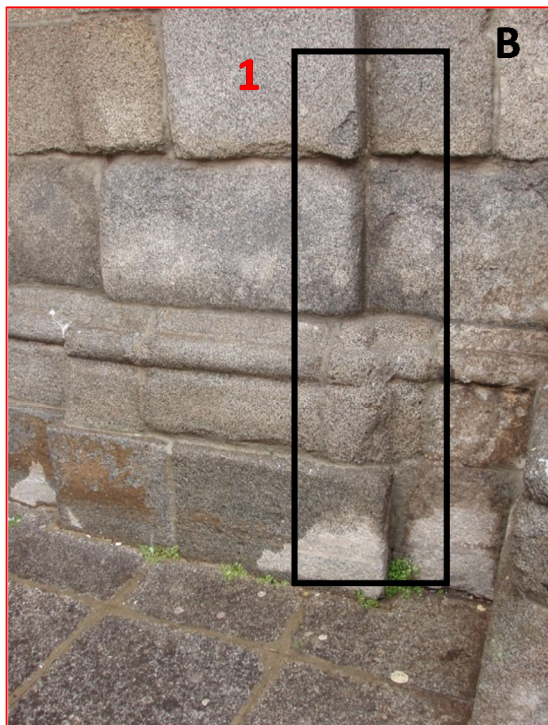


Figura 6.3. Lugar de toma de la muestra CUW en la Portada Principal de la Catedral Vieja de Salamanca. A: Vista de la puerta con las dos columnas donde se ha muestreado (1 y 2). B: Detalle de la columna 1. C: Lugar exacto de toma de la muestra CUW en la columna 2.

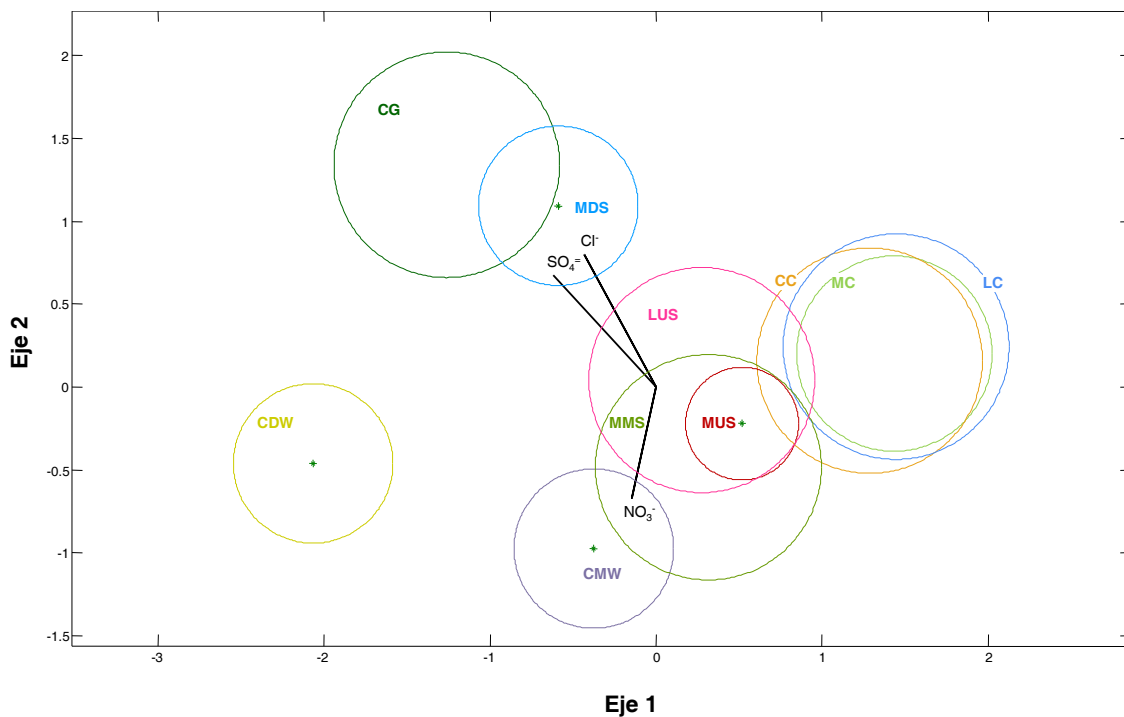


Figura 6.4. Plano 1-2 del Biplot Canónico de las muestras tomadas en el Conjunto Catedralicio, exceptuando las muestras CUW y CMN.

Como puede verse en la Figura 6.4, las muestras de cantera de Calzadilla, Los Santos y Martinamor (CC, LC y MC) están representadas juntas, lo que nos da una idea del contenido natural en sales de estas rocas, que es muy bajo. El resto de los grupos, está más o menos desplazado con respecto a estas muestras, lo que indica una mayor o menor contaminación por sales solubles.

Las muestras de Calzadilla están representadas en tres grupos: CDW, CMW y CG. El grupo CG corresponde a una muestra tomada a nivel del suelo en la base de una de las columnas del atrio que rodean la Catedral Nueva en su parte norte (Figura 6.5), a nivel del suelo. Esta muestra presenta contenidos en cloruros y sulfatos altos, mientras que no hay diferencias significativas en el contenido en nitratos, con respecto a las muestras de Calzadilla de cantera (CC). Con respecto a las otras muestras, tiene menor contenido en nitratos y mayor en cloruros que las otras dos (CDW y CMW), presentando mayor contenido en sulfato que el grupo CMW, sin haber variación en el contenido en sulfatos con el grupo CDW.

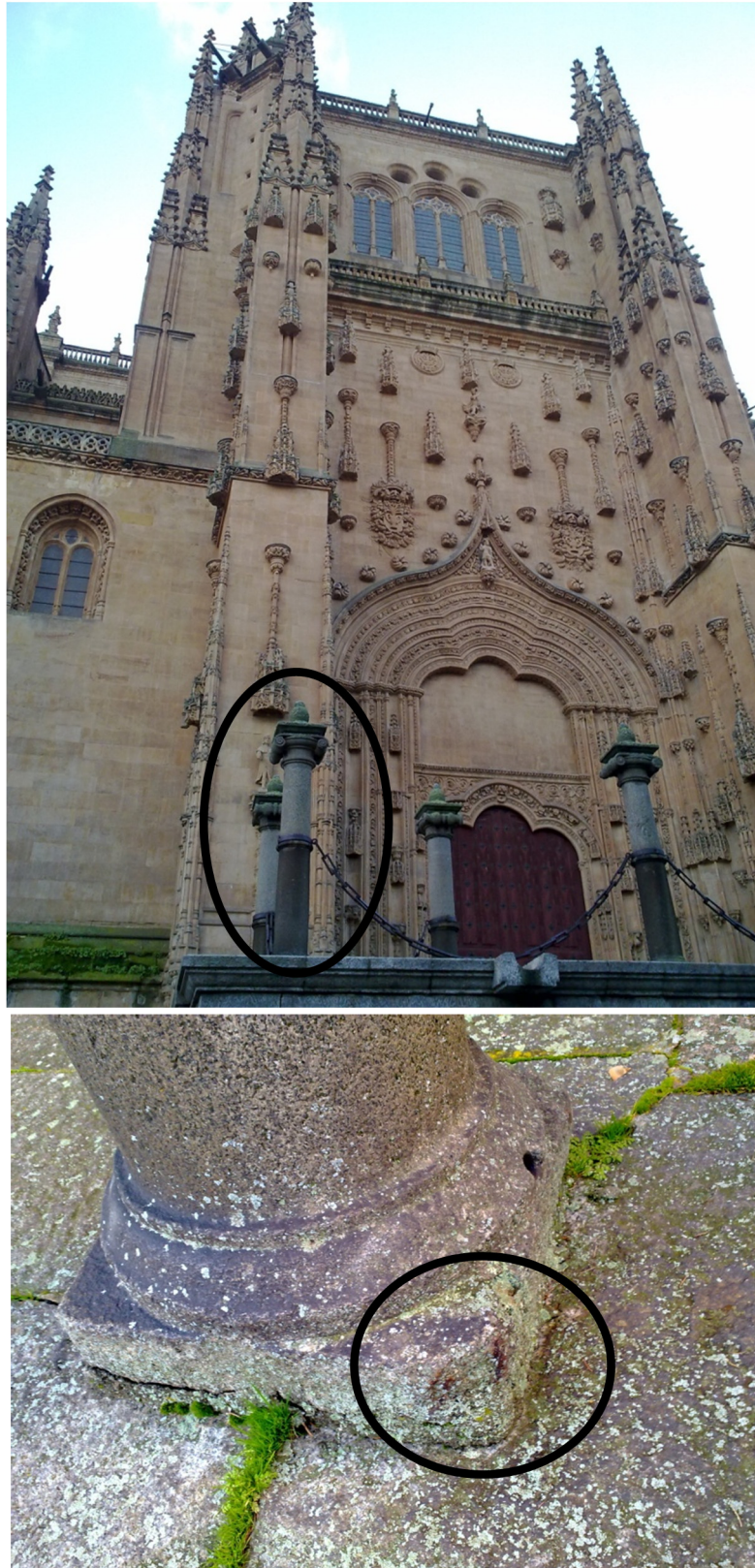


Figura 6.5. Localización de la muestra CG en la Catedral Nueva.

Los grupos CDW y CMW corresponden a muestras de vaugnerita, tomadas a dos alturas (D: abajo < 50 cm y, M: medio = 50-100 cm) en las columnas situadas junto a la puerta de la Portada Principal de la Catedral Vieja (Figura 6.6). Ambas tienen mayor contenido en nitratos que las muestras de cantera, pero sólo el grupo CDW tiene también mayor contenido en sulfatos y cloruros que las muestras de cantera, no existiendo diferencias en estas variables entre el grupo CMW y las muestras de cantera. Como puede observarse claramente, las muestras tomadas más abajo en la columna (CDW) tienen un mayor contenido en sulfatos y cloruros que las tomadas a media altura (CMW), no habiendo diferencias significativas entre los dos grupos en cuanto al contenido en nitratos.

El granito de Los Santos sólo está representado en este muestreo en un alero de la fachada norte de la Catedral Nueva. Se trata de un alero en buen estado, cubierto por vegetación, situado a algo más de 2 m (Figura 6.7). No presenta diferencias significativas con respecto a las muestras de cantera de Los Santos (LC). Es posible que su buen estado de conservación se deba a que es un elemento bastante tardío en la construcción de la Catedral.

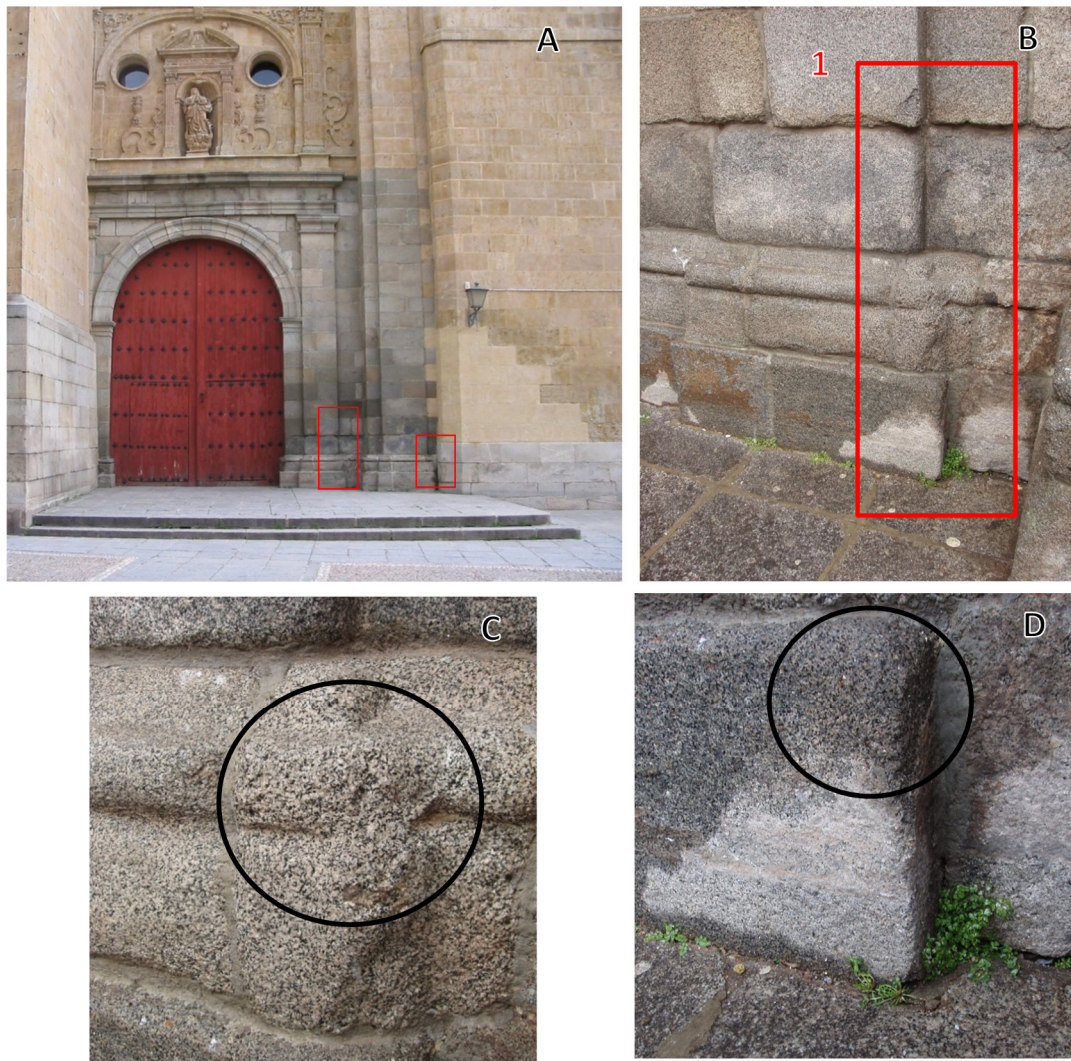


Figura 6.6. Lugar de muestreo de CDW y CMW en la Portada Principal de la Catedral Vieja de Salamanca. A: Vista de la puerta con las dos columnas donde se ha muestreado (1 y 2). B: Detalle de la columna 1. C: Lugar exacto de toma de la muestra CMW en la columna 1. D: Lugar de muestreo de CDW, en la columna 2.



Figura 6.7. A) Localización de la muestra LUN en la Catedral Nueva. B) Detalle de la localización de muestreo.

El leucogranito de Martinamor está representado por siete muestras (reunidas en tres grupos) tomadas en la parte sur de la Catedral Vieja, junto a la Portada de Santa Lucía (Figura 6.8).

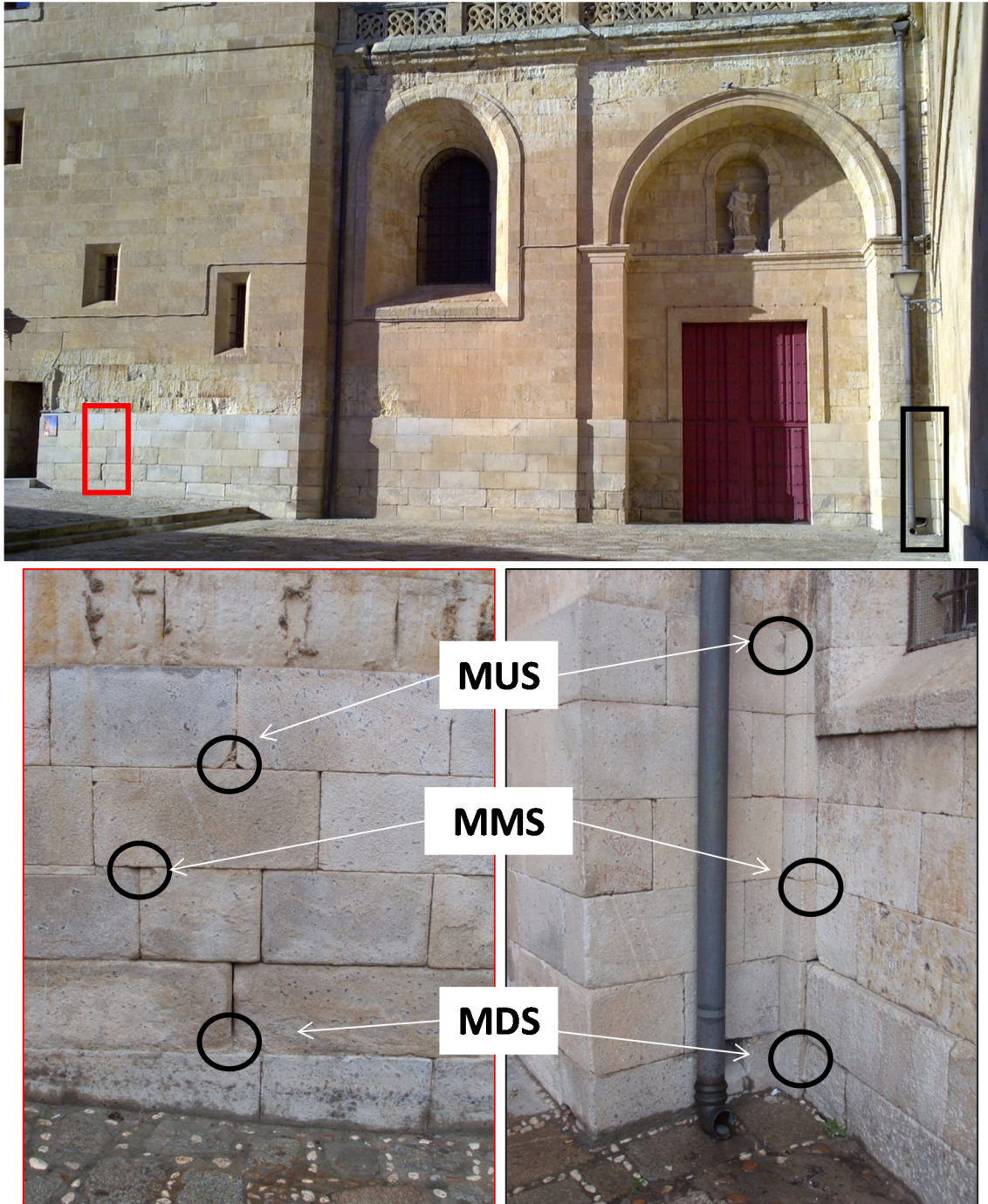


Figura 6.8. Lugar de la toma de las muestras de los grupos MUS, MMS y MDS junto a la Puerta de Santa Lucía de la Catedral Vieja.

Al igual que sucede con las muestras de vaugnerita, los grupos formados por muestras tomadas en la parte baja (MDS) tienen mayores contenidos en cloruros y sulfatos que las tomadas a media altura (MMS) o arriba (MUS), las cuales, además de tener contenidos menores en estos aniones, no presentan variaciones en los valores de cloruros, nitratos y sulfatos, ni con respecto a las muestras de leucogranito tomadas en las canteras, ni entre sí.

En general, se puede concluir que las rocas aquí muestreadas tienen un mayor contenido en cloruros y sulfatos que las rocas en la cantera. Este contenido se hace menor y llega a igualar a las rocas de cantera, a medida que su posición asciende en la vertical. Esto concuerda con las secuencias de cristalización de sales observadas en muros y descritas por Arnold y Zehnder (1989), según el cual, existe una zonación, desarrollada más o menos claramente en un muro, de modo que en la parte baja se acumulan las sales de sulfato, seguidas por los nitratos y por último, y más arriba en la vertical, los cloruros.

Con respecto a la orientación es difícil afirmar algo, pues no todas las variedades están representadas en las distintas orientaciones, y si lo están, como es el caso de las vaugneritas, no hay certeza de que los bloques de piedra empleados se colocaran al mismo tiempo, por lo que la exposición a la alteración no es la misma y no se pueden establecer comparaciones. A este respecto, cabe destacar que la portada actual de la Catedral Vieja es de 1680, momento en el que Juan Setién Güemes era director de obras de la Catedral Nueva [desde 1668, hasta 1703 según Núñez Paz *et al.* (2001) o desde 1667, hasta 1703, según Castro Santamaría (2003)]. De esta misma fecha, y del mismo material son los *postes de piedra pajarilla* hechos para una lonja que completaba las obras de la portada de la Catedral Vieja (Castro Santamaría, 2003). Estos postes de la lonja, pudieran ser las columnas que actualmente se encuentran en el atrio alrededor de la Catedral Nueva, en una de las cuales se ha muestreado. Si las columnas siguiesen en su posición original, podríamos establecer comparaciones del estado de deterioro con respecto a la orientación, pero como no hay conocimiento de si han sido recolocadas hasta el emplazamiento actual, no se puede realizar tal comparación.

Plaza Mayor

El análisis Biplot Canónico da un resultado global con un valor de la λ de Wilks de 19,2258 y un $p\text{-value} < 0,001$ ($7,9873 \cdot 10^{-33}$).

Todos los elementos de la matriz se han proyectado en un gráfico biplot para el análisis de los diferentes grupos (Figura 6.9). A medida que se realicen los estudios

diferenciados por el tipo de roca se emplearan gráficos simplificados (Figura 6.10, Figura 6.13 y Figura 6.16) en los que sólo se proyectará una litología, aunque el análisis estadístico se haya realizado con todas las muestras juntas.

Las muestras de Calzadilla están representadas en cuatro grupos: CDS, CG, CMN y CMS. Todos estos grupos tienen contenidos más altos en cloruros y sulfatos que las muestras de Calzadilla de cantera, como puede verse en la Figura 6.10, que es una simplificación de la Figura 6.9, hecha con el objeto de facilitar su interpretación. En cuanto al contenido en nitratos, también es mayor que el de las muestras de cantera, excepto en el grupo CDS, que no presenta diferencias con las de cantera.

El grupo CG corresponde a una muestra tomada a nivel del suelo en la base de la columna inmediatamente al este en la puerta del Corriño (Figura 6.11) a nivel del suelo. Esta muestra presenta contenidos en cloruros, sulfatos y nitratos más altos con respecto a las muestras de cantera (CC).

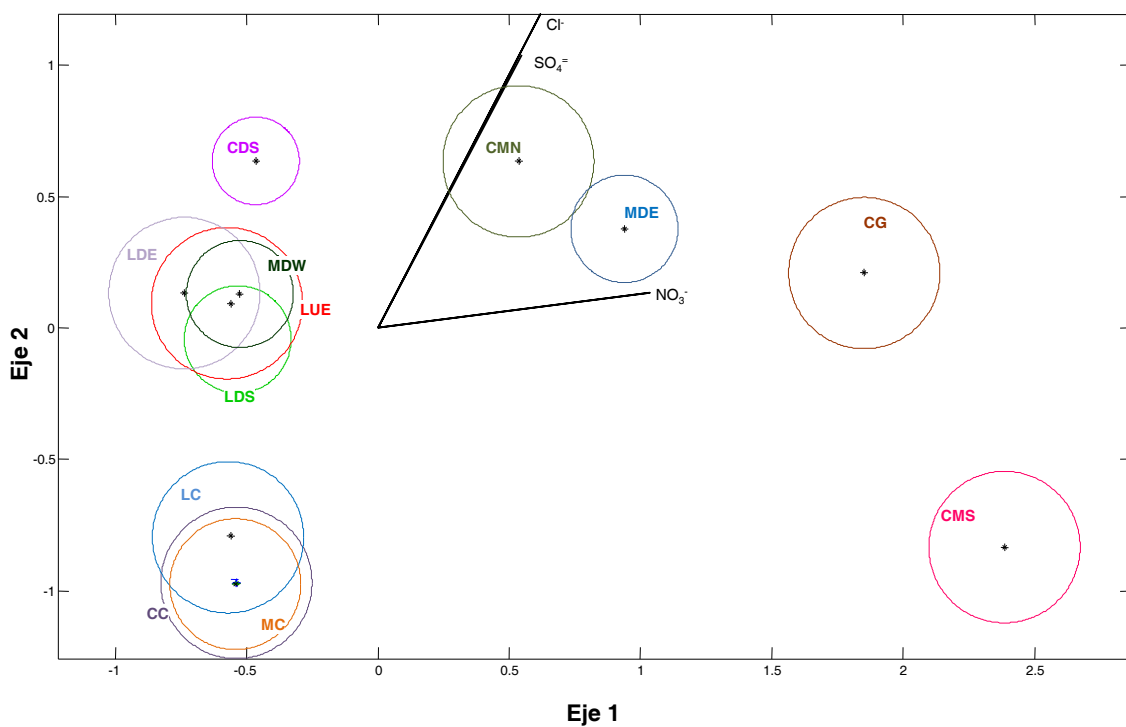


Figura 6.9. Plano 1-2 del biplot canónico de las muestras tomadas en la Plaza Mayor

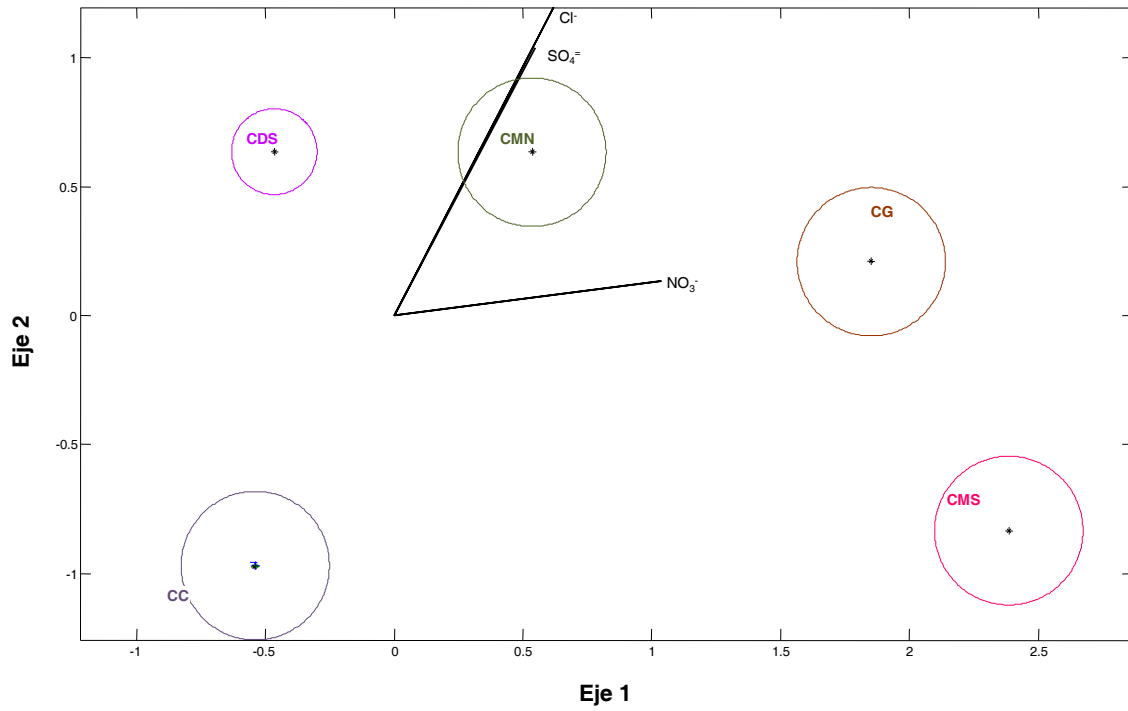


Figura 6.10. Simplificación del plano 1-2 del Bbiplot Canónico de las muestras de vaugnerita tomadas en la Plaza Mayor.

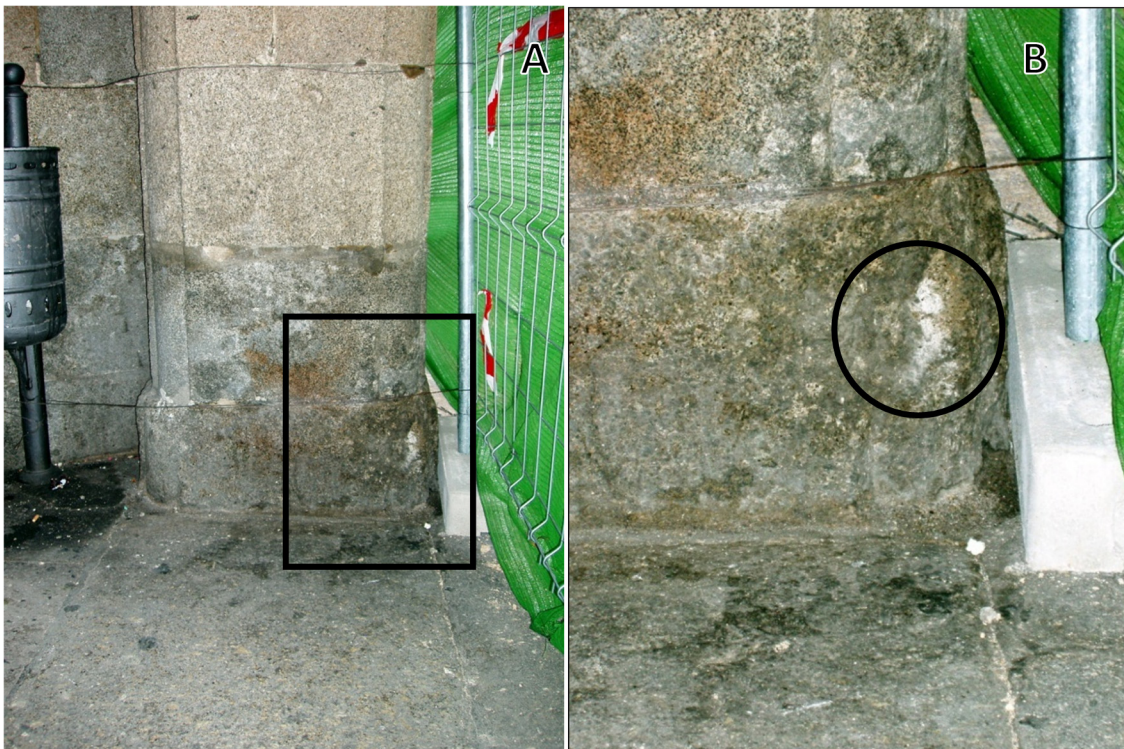


Figura 6.11. Lugar de toma de la muestra CG en la Plaza Mayor

Los grupos CDS y CMS corresponden a muestras orientadas al sur, tomadas en columnas con vaugnerita por debajo de los 50 cm de altura (CDS) y entre los 50 cm y 1 m (CMS). Comparando la proyección de los círculos sobre los vectores, se observa que no hay diferencias en cuanto el contenido en sulfatos y cloruros. Sin embargo, el contenido en nitratos en el grupo CMS es mucho mayor que en CDS, de hecho, es el más alto de los de todos los grupos (Figura 6.10).

Comparando los grupos de muestras tomadas a media altura, pero con diferente orientación (CMS y CMN), observamos que no hay diferencias significativas en cuanto a los contenidos en sulfatos y cloruros, y sí las hay en cuanto a los nitratos, siendo su contenido mayor en el grupo de muestras orientadas al sur (CMS) que las orientadas al norte (CMN).

El grupo CMS corresponde a una muestra tomada en la columna inmediatamente al oeste de la puerta del Ayuntamiento, a 85 cm de altura. Como puede verse en la Figura 6.12, lugar de toma de la muestra, las juntas de la columna se han rellenado con mortero, posible fuente del alto contenido en nitrato de esta muestra.

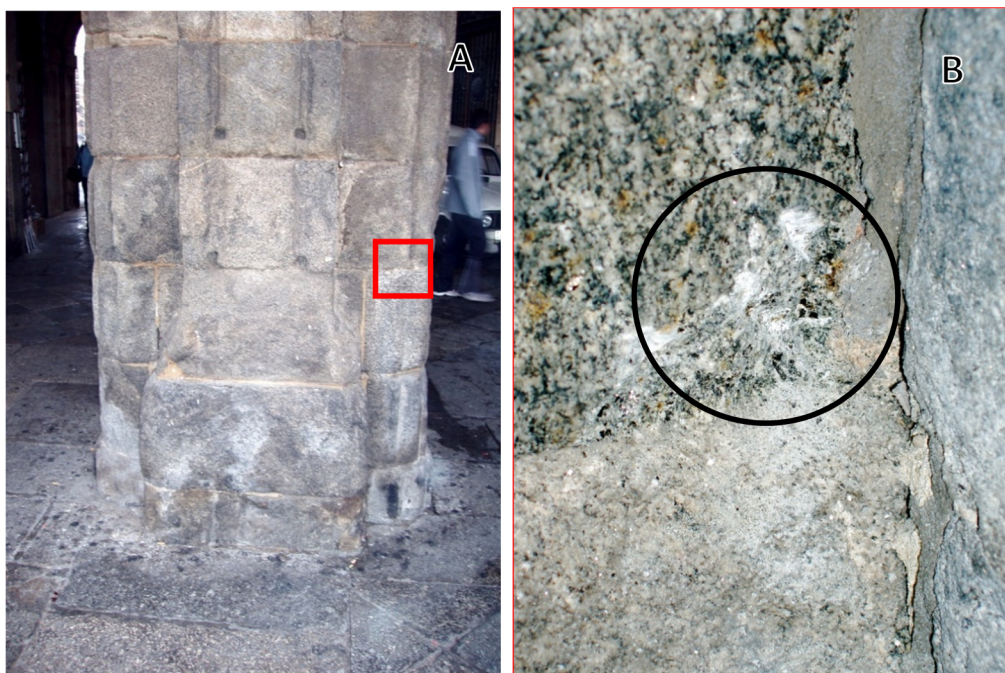


Figura 6.12. Lugar de toma de la muestra CMS en la Plaza Mayor. A: Columna de muestreo. B: localización exacta de la muestra.

Las muestras de Martinamor están representadas por dos grupos: MDE y MDW. Ambos, tienen contenidos más altos en cloruros y sulfatos que las muestras de

Martinamor de cantera (Figura 6.9 y Figura 6.13). En cuanto a los nitratos, sólo el grupo MDE tiene valores superiores a los de las muestras de cantera.

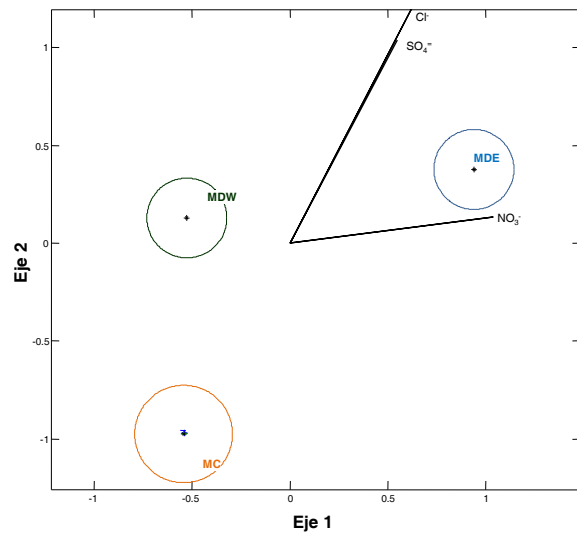


Figura 6.13. Plano 1-2 del Biplot Canónico con la representación de las muestras de leucogranito de Martinamor tomadas en la Plaza Mayor

El grupo MDE corresponde a dos muestras tomadas en la base de la columna, a 20 y 40 cm y aparte de orientadas al este, están hacia el interior de los soportales de la Plaza (Figura 6.14).

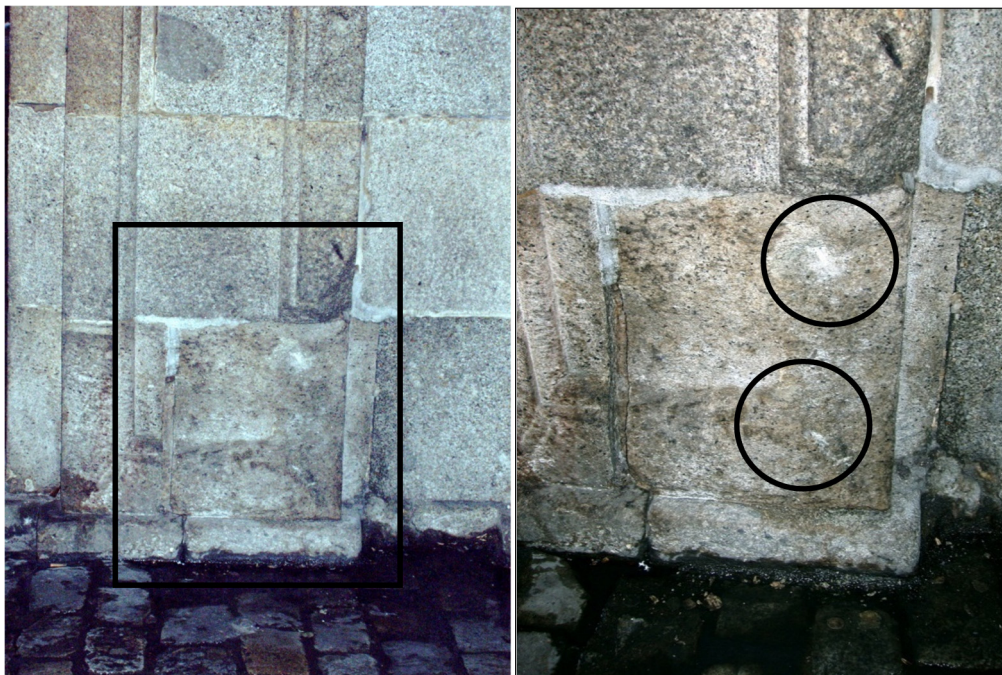


Figura 6.14. Lugar de toma de las muestras de grupo MDE en la Plaza Mayor.

Como puede observarse en la Figura 6.14, los bloques de piedra de esta columna muestran una apariencia más sucia que los de la columna del Pabellón de los Reyes. Además, su ubicación hacia el interior de los soportales hace que sea una zona que no tiene mucha iluminación solar directa, lo que hace que haya más humedad y que las soluciones acuosas permanezcan por más tiempo en contacto directo con la piedra. Todo esto puede explicar el alto contenido en nitratos que presenta este grupo, tanto con respecto a las muestras de cantera, como a las otras muestras tomadas en lugares con iluminación solar directa durante varias horas al día.

El grupo MDW está constituido por dos muestras tomadas en la quinta columna del Pabellón de los Reyes, entre las 15 y 45 cm de altura y orientadas hacia el exterior de la Plaza (Figura 6.15). En comparación con la muestra MDE, presenta menor contenido en todas las variables. De este modo, se observan diferencias significativas en cuanto a la orientación de las muestras, habiendo mayor concentración de aniones al este que al oeste, aunque el origen de tal diferencia puede estar más influenciado por la exposición al interior o exterior del claustro que por la propia orientación este-oeste de las muestras.



Figura 6.15. Lugar de toma de las muestras de grupo MDW en la Plaza Mayor.

Las muestras de granito de Los Santos están concentradas en tres grupos: LDE, LUE y LDS. Todos estos grupos tienen contenidos más altos en cloruros y sulfatos que

las muestras de Los Santos de cantera, no habiendo diferencias significativas en los contenidos en nitratos (Figura 6.16). Pese a que las muestras de estos grupos están tomadas en dos columnas distintas (Figura 6.17 y Figura 6.18), y con orientaciones y alturas variadas, no hay diferencias significativas entre ellas en cuanto al contenido en sulfatos, cloruros o nitratos.

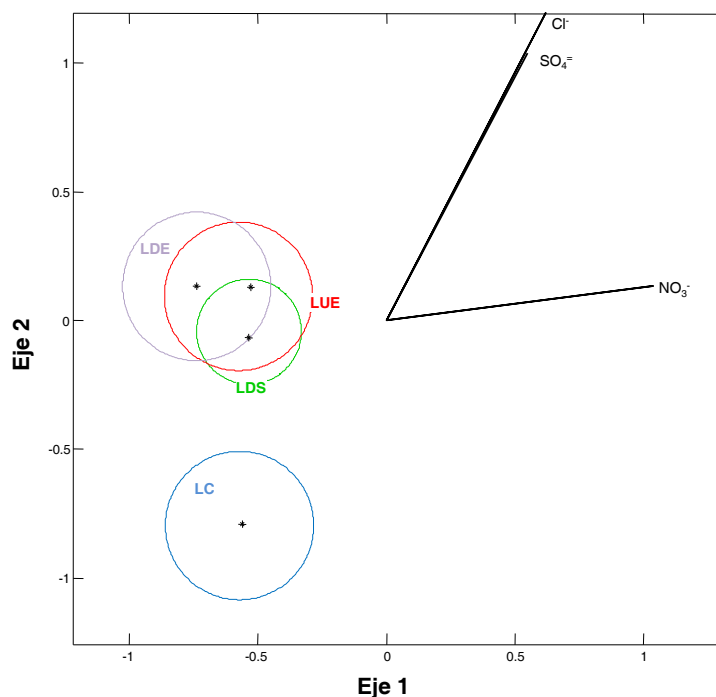


Figura 6.16. Plano 1-2 del Biplot Canónico en el que sólo se representan las muestras de granito de Los Santos tomadas en la Plaza Mayor

En la Plaza Mayor las muestras que mayor contenido en sales tienen son las de vaugneritas, lo que puede deberse a que son las que más tiempo llevan en la Plaza, ya que los soportales del Ayuntamiento originalmente se construyeron con esta roca (de 1750 a 1756), mientras que los granitos de Martinamor y Los Santos, se colocaron hacia 1927-1928, como recalzo de las cuatro primeras filas de las columnas, originalmente construidas en piedra tosca de La Pinilla (Rodríguez G. de Ceballos, 1991). Parece que la orientación en sí tiene influencia relativa, pues las muestras expuestas a ambientes más sombríos (interior del claustro) presentan mayor contenido en aniones.



Figura 6.17. Lugar de toma de las muestras del grupo LDS en la Plaza Mayor

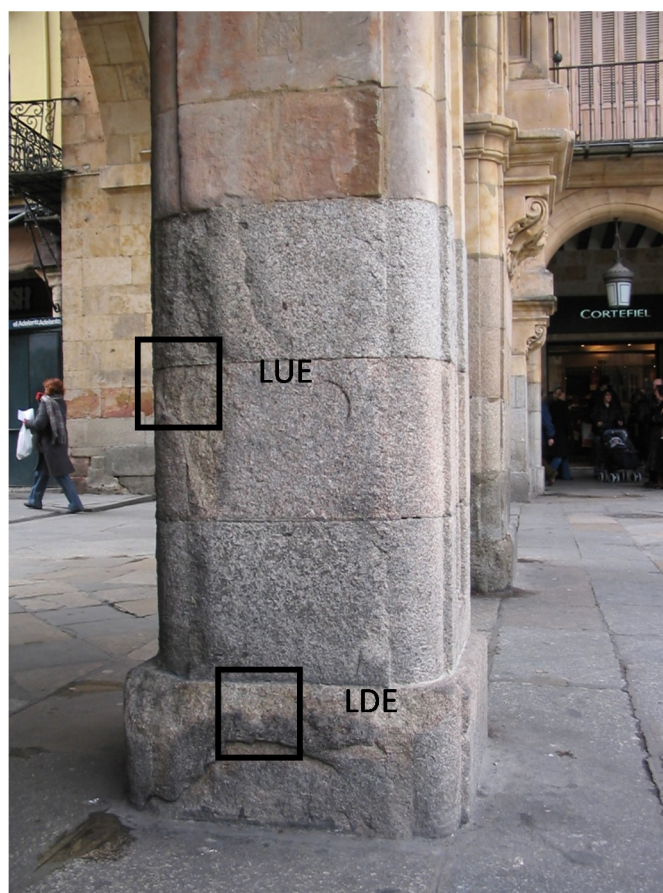


Figura 6.18. Lugar de toma de las muestras de los grupos LDE y LUE en la Plaza Mayor

Puente Romano

El Biplot Canónico sobre los datos de las muestras del puente romano da una λ de Wilks de 20,5728 y un $p\text{-value} < 0,001$ ($3,0913 \cdot 10^{-18}$). Todos los elementos de la matriz se han proyectado en un gráfico para el análisis de las diferentes agrupaciones (Figura 6.19).

Las muestras de Calzadilla están representadas por el grupo CUE, las cuales están tomadas en el entorno del cuarto pilar y sexto arco (Figura 6.20), contando desde el sur, aguas arriba, en una zona reconstruida tras la riada de San Policarpo en 1626 (Núñez Paz *et al.*, 2001). Con respecto a las muestras de cantera, este grupo presenta mayores contenidos en cloruros y sulfatos, mientras que no hay diferencias significativas con respecto al contenido en nitratos (Figura 6.19).

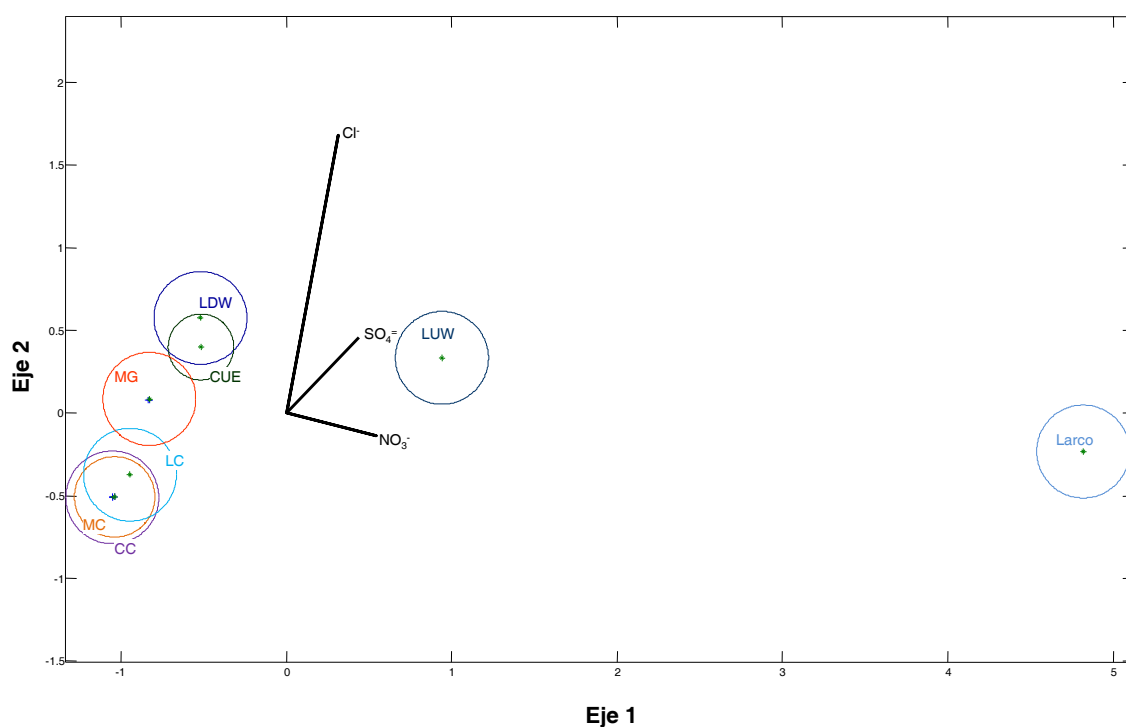


Figura 6.19. Plano 1-2 del Biplot Canónico de las muestras tomadas en el Puente Romano

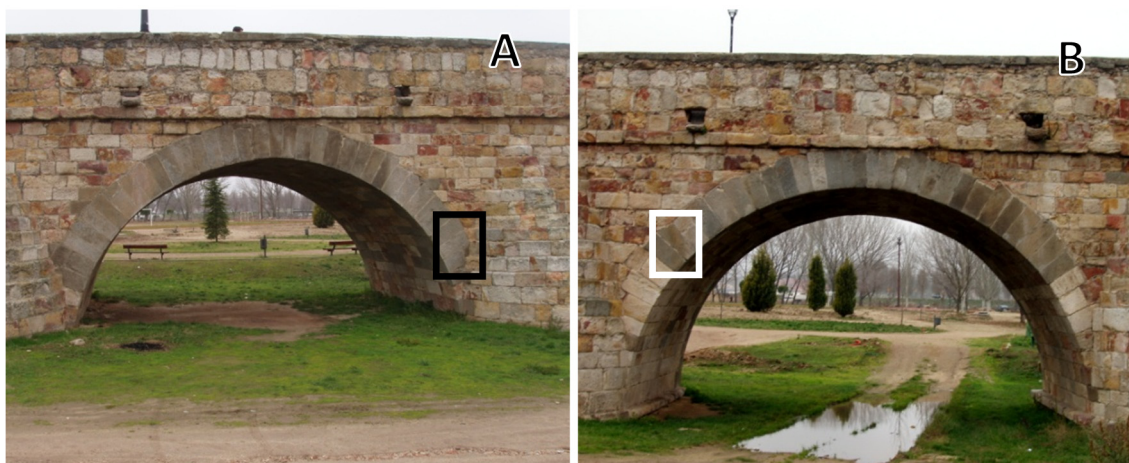


Figura 6.20. Lugar de toma de las muestras del grupo CUE en el puente romano. A: tercer arco y cuarto pilar desde el sur. B: sexto arco, contando desde el sur

El granito de Martinamor muestreado pertenece al pavimento del puente, siendo, por tanto, una piedra de utilización relativamente tardía (s. XVI) (Figura 6.21), y como puede apreciarse en la Figura 6.19, es la que menos dista de las muestras de roca de cantera. Con respecto a estas últimas, el grupo MG presenta contenidos similares en nitratos y valores ligeramente superiores en cloruros y sulfatos.



Figura 6.21. Lugar de toma de las muestras del grupo MG.

Las muestras de granito de Los Santos están recogidas en tres grupos: LDW, LUW y Larco. Todas ellas tienen mayor contenido en sulfatos y cloruros que las

muestras de cantera. Con respecto a los nitratos, sólo las muestras LUW y Larco tienen mayor contenido que las muestras de cantera.

LDW está tomada en el primer pilar del primer arco del puente, contando desde la parte norte, aguas arriba, muy próximo al actual nivel del suelo. LUW está tomada a 1,50 m de altura, antes del primer arco (contando también desde la parte norte). La muestra Larco está tomada en el interior del segundo arco (contando desde la parte norte del puente), a más de 1,70 m de altura. Todas corresponderían con bloques de la fábrica romana original del puente, o por lo menos, no se ha encontrado información referente a una reconstrucción o restauración de estos arcos en la documentación revisada (Figura 6.22).

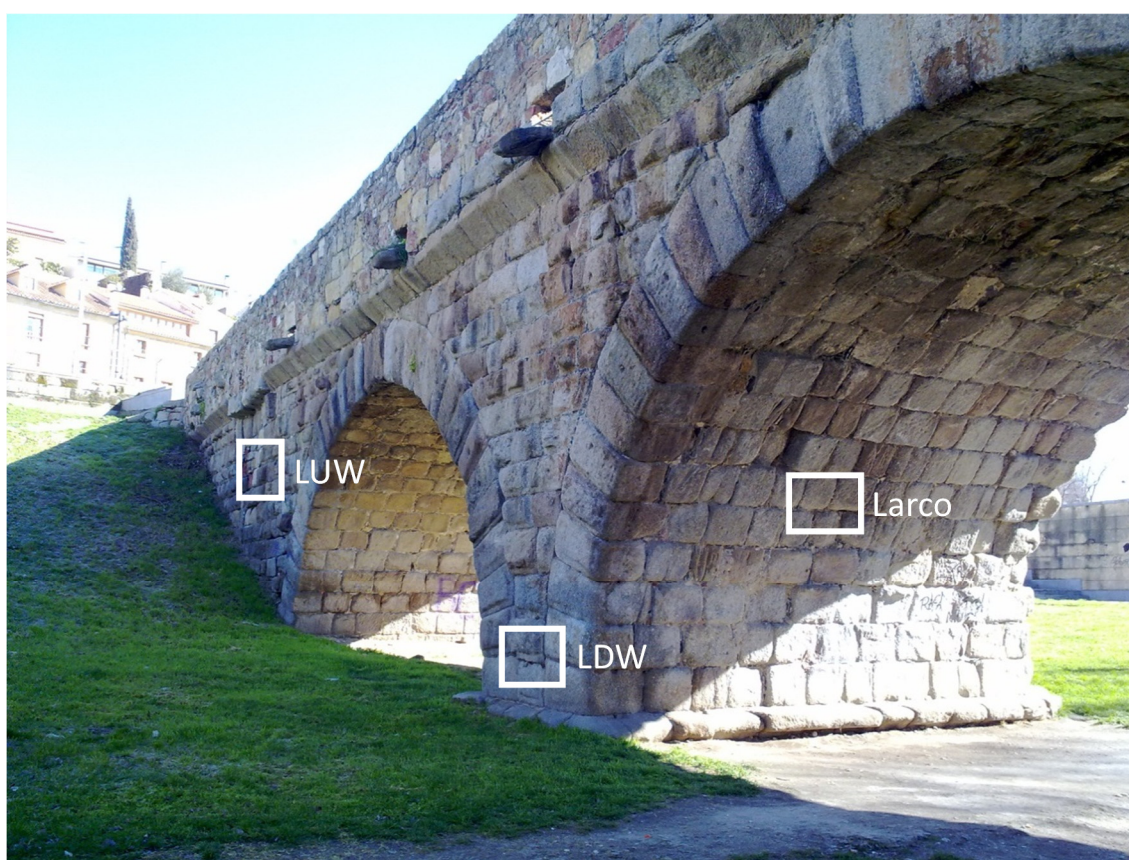


Figura 6.22. Lugar de toma de las muestras de Los Santos en el puente romano

A medida que subimos en altura, en estas tres muestras, aumenta el contenido en nitratos y sulfatos, quedando el contenido en cloruros muy similar en los tres grupos, no existiendo, de hecho, diferencias significativas en cuanto al contenido en estos últimos entre los grupos LDW y LUW.

El alto contenido en nitratos del grupo Larco hace que este grupo se separe claramente del resto. Estos contenidos elevados pueden deberse a la percolación de

aguas cargadas de restos orgánicos de las caballerizas y rebaños que transcurrieron por el puente durante muchos siglos.

Comparativamente, parece que lo que más influye en la presencia de sales es la posición que ocupan las rocas en la estructura del puente, siendo el contenido en aniones más alto en las muestras que están en el interior del arco, seguido de aquellas muestras que están a media altura y por último, las que están en la parte baja. En cualquier caso, y comparando los tres tipos de rocas, queda claro que el mayor contenido en aniones se presenta en las muestras que llevan más tiempo en la edificación (granito de Los Santos), aunque no sean las más porosas (como las vaugneritas), ni las más expuestas por estar en el pavimento (como el leucogranito)

7. CONCLUSIONES

1. Sobre los factores geológicos

1a). *Vaugneritas de Calzadilla del Campo*

- Las distintas facies diferenciadas, cuarzomonzoníticas y monzoníticas, configuran la arquitectura de un plutón de geometría lopolítica.
- Se establece la caracterización geoquímica de las distintas facies mediante los elementos mayores, trazas e isótopos, poniéndose de manifiesto un enriquecimiento en tierras raras con la diferenciación, marcando una evolución opuesta al resto de las series monzoníticas y vaugneríticas de la región.
- La relativa abundancia en minerales máficos (con un rango de índice de color de 23-45) y, sobre todo, la conspicua textura vaugnerítica, definida por los grandes cristales de biotita en el feldespato, justifica el aspecto tan llamativo de las facies gruesas del plutón.
- Sus características litológicas, composicionales y estructurales han condicionado las técnicas extractivas llevadas a cabo en gran parte del plutón. Es destacable el contraste entre la fábrica de las facies finas, con una marcada anisotropía y consecuente lajamiento, y las gruesas o vaugneríticas s.s. con tendencia a la isotropía y más difícil de cortar y labrar.

1b). *Granito de Martinamor*

- Las tres facies definidas de leucogranitos de feldespato alcalino, dos de ellas turmaliníferas y otra de dos micas, establecen una secuencia interna en capas que configuran en su conjunto un sill de escasa potencia.
- La riqueza en sílice (74,4-75,6 %) de las tres facies, junto con la textura panalotriomorfa-hipidiomorfa y su trabazón mineral (“interlocking”) confiere a las rocas una gran dureza, especialmente a la facies turmalinífera gruesa. Además, su homogeneidad textural y extensión relativa de los afloramientos justifica su empleo mayoritario como piedra histórica de este plutón.
- Se establece la caracterización geoquímica de las distintas facies mediante los elementos mayores y trazas, mostrando espectros de normalización de tierras raras, propios de fundidos corticales con pendiente negativa y sin empobrecimiento en pesadas, y destacando también la anomalía positiva de Eu en las tres facies.
- Es posible reconocer algunos procesos de cristalización y movilización del magma mediante la presencia de capas aplo-pegmatíticas y los pequeños diques indicativos de las vías de escape de un magma muy rico en volátiles.

1c). Granito de Los Santos

- Se han distinguido y caracterizado dos facies: una de borde, con cordierita, y la otra, una facies interna más biotítica. Esta caracterización se ha llevado a cabo tanto desde un punto de vista mineralógico como geoquímico, incluyendo elementos mayores y trazas.
- A diferencia de las vaugneritas y del leucogranito de Martinamor, el granito de Los Santos aflora de manera muy masiva en sus dos facies; si bien, existen heterogeneidades atribuibles al flujo interno magmático, a la presencia característica de enclaves ígneos microgranudos, o a la formación de meso-estructuras relacionadas con la separación de los fluidos (diques de aplitas y pegmatitas, bolsadas,...). El carácter masivo de los afloramientos justifica la proliferación de antiguas canteras en el área y la misma explotación actual.

2. Sobre la caracterización petrofísica

- Según los criterios petrofísicos, comparativamente, las rocas de Martinamor con baja capacidad para absorber agua, son las más idóneas para emplearlas como material constructivo, sobre todo para emplearlas en zócalos, seguidas de las rocas de Los Santos y por último las de Calzadilla.

3. Sobre la identificación de las canteras

3a). Por la documentación histórica

- Hay documentación histórica sobre la procedencia de las tres piedras en múltiples documentos relacionados generalmente con los contratos o condiciones de obra.

3b). Por criterios litológicos

- Por criterios texturales y mineralógicos se reconocen las mismas facies de los plutones en los monumentos para los tres tipos de piedra, coexistiendo con frecuencia varias facies en un mismo monumento, como ocurre con las vaugneritas gruesas y finas y el leucogranito turmalínífero de Martinamor grueso y fino. Igualmente, para cada piedra se identifican en los monumentos las heterogeneidades específicas de los plutones.

3c). Por los elementos químicos mayores

- Se establece una clara afinidad entre las muestras de monumento y de cantera, bien sea mediante las clasificaciones basadas en los minerales normativos (clasificación Q'-ANOR), o bien mediante el método estadístico de Inercia basado en una representación HJ-Biplot.

3d). *Por la elaboración de los elementos traza*

- Los diagramas de normalización multi-elementales permiten llegar en muchos casos a identificar la facies utilizada en los monumentos.

Como conclusión general, la identificación segura de las canteras originales se ha de basar en la conjunción, integración y combinación de una pléyade de métodos y técnicas cuyos resultados han de ser siempre perfectamente coherentes.

4. Sobre la durabilidad de los materiales y los ensayos de conservación

4a). A simple vista, los materiales que mayor deterioro sufren frente a los agentes externos, es decir, frente a los envejecimientos acelerados, son las vaugneritas de Calzadilla, seguidas por los granitos de Los Santos y, por último, los leucogranitos de Martinamor, que permanecen muy estables frente a cualquier envejecimiento. Por otra parte, el envejecimiento más agresivo es el combinado HD/CS seguido del de CS y por último el HD. De aquí se deduce que la acción sinérgica de distintos factores de alteración (en este caso, la cristalización de sales unido al hielo/deshielo junto con frío/calor) potencia notablemente el deterioro producido *por cada uno de ellos por separado*.

4b). El proceso de desalación de las probetas mediante el uso de cataplasmas de sepiolita retira la mayoría de las sales presentes en la segunda aplicación de sepiolita.

4c). La aplicación de los productos de conservación altera el aspecto cromático de los materiales, haciendo que el material se oscurezca, amarillee y enrojezca. El producto que mayor cambio genera es el RC80, seguido por el RC70. Igualmente, todos producen un aumento de la velocidad de propagación de los ultrasonidos, siendo el RC80 el que mayor aumento produce, y por tanto el más eficaz a la hora de consolidar las probetas, seguido del RC70. A nivel de propiedades hídricas, los productos de conservación con hidrofugante (bien el hidrofugante solo, H224, o bien acompañado del consolidante, RC80) ofrecen mejores resultados a la hora de cerrar la porosidad conectada con el exterior de las probetas y además, en el caso del RC80, mejoran la cohesión del material.

4d). En general, las probetas a las que se les ha aplicado los tres tratamientos son muy estables frente al deterioro producido por los ciclos de envejecimiento por hielo/deshielo junto con frío/calor que simulan las condiciones propias del clima de la ciudad de Salamanca. De visu el envejecimiento sobre el producto aplicado aumenta la rugosidad de la superficie al tacto y se pierde algo de masa; a nivel microscópico los productos de conservación se agrietan y se abren huecos. No

obstante, no se observan variaciones en las propiedades petrofísicas al agua, y la porosidad total, estudiada con porosimetría de mercurio, en general, aumenta muy poco. La velocidad de propagación de los ultrasonidos disminuye un poco o se mantiene. El ligero descenso nos puede indicar que el envejecimiento ha alterado ligeramente las rocas tratadas, generando una mayor porosidad conectada con la superficie respecto a este tipo de muestras. A nivel cromático el envejecimiento amarillea las muestras, las aclara y hace que pierdan el enrojecimiento.

5. Sobre los aniones solubles en agua en los monumentos

- El contenido en aniones solubles en agua (Cl^- , NO_3^- y $\text{SO}_4^{=}$) en las rocas de cantera de las tres variedades estudiadas es muy bajo. Las muestras de monumentos presentan un mayor contenido de sales solubles que las de cantera, sobre todo en cloruros y sulfatos; este contenido disminuye y llega a igualar al de las rocas de cantera, a medida que la posición de la roca muestreada asciende en la vertical. Las rocas que más tiempo llevan en el monumento son las que mayor contenido en sales tienen. Parece que la orientación en sí tiene una influencia relativa, pues las muestras expuestas a ambientes más sombríos (ej.: interior del claustro de la Plaza Mayor) presentan mayor contenido en aniones. Por otra parte, la posición en la edificación influye en el contenido en aniones; así, en el Puente Romano el mayor contenido en aniones se observa en las muestras que están en el interior del arco, seguido de aquellas muestras que están a media altura, y por último, las que están en la parte baja.

6. Conclusión general

- Se establecen y desarrollan unas pautas metodológicas sobre el estudio de las rocas plutónicas utilizadas en la Ciudad de Salamanca, demostrándose que una vez conocidos todos los factores geológicos y confirmada una segura y detallada correspondencia entre piedra en cantera y en monumento se propicia cualquier análisis sobre las implicaciones históricas, socio-económicas y arquitectónicas que ha entrañado el uso histórico de la piedra en la ciudad. Al mismo tiempo, se demuestra que el conocimiento sobre la respuesta de los materiales pétreos considerados constituye un recurso científico-técnico de vital importancia de cara a la conservación del Patrimonio Monumental de la ciudad.

BIBLIOGRAFÍA

- Accardo, G., Massa, S., Rossi Doria, P., Sammuri, P. y Tabasso, M. (1981). Artificial weathering of Carrara marble. Relationship between the induced variations of some physical properties. En: R. Rossi Manaresi (Ed.), *International Symposium: The Conservation of Stone II*, Bolonia, Italia, 243-373.
- Alcalde, M. y Martín, A. (1990). Macroscopical morphology of accelerated deterioration of some petreous materials in Andalusian-Spain monuments. *Materiales de Construcción* **40**, 5-27.
- Almeida Cuesta, H. (1999). *Martinamor, un pueblo en la tierra de Alba de Tormes*. Ayuntamiento de Martinamor. Salamanca.
- Alonso Gavilán, G., Bragado González, M., Menéndez Bueyes, L.R., Rodríguez Alonso, M.D., Bartolomé, M. y Hernández Fernández, H. (2011). Utilización de los depósitos de la Fm. Areniscas de Salamanca (Cretácico terminal. Paleógeno) en la calzada y sillares del Puente Romano de Salamanca: Análisis gearqueológico. *Studia Geologica Salmanticensis* **47**, 141-174.
- Álvarez Villar, J. (1984). *El palacio de la Salina de Salamanca*. Diputación de Salamanca. Salamanca.
- Álvarez Villar, J. (1998). *Los conventos de San Esteban y Las Dueñas*. La Gaceta Regional (Ed.), Salamanca.
- Álvarez Villar, J. (1999). *La Clerecía de Salamanca*. La Gaceta Regional (Ed.), Salamanca.
- Álvarez Villar, J. (2001). *El Patio de Escuelas*. Universidad de Salamanca (Ed.), Salamanca.
- Álvarez Villar, J. (2002). *La Casa de las Conchas de Salamanca*. Caja Duero (Ed.), Salamanca.
- Álvarez Villar, J. (2003). *Salamanca desconocida*. Caja Duero. Salamanca.
- Álvarez Villar, J. y Sierra Puparelli, V. (2000). *Rincones Salmantinos*. La Gaceta Regional (Ed.), Salamanca.
- Amaro, I.R., Vicente-Villardón, J.L. y Galindo-Villardón, M.P. (2004). Manova Biplot para arreglos de tratamientos con dos factores basado en modelos lineales generales multivariantes. *Interciencia* **29**, 26-32.
- Andrés Ordax, S., Nieto González, J.R., Rivera Blanco, J. y Rodicio Rodríguez, C. (1995). *Catálogo monumental de Castilla y León. Bienes inmuebles declarados*. J. Rivera (Ed.), Junta de Castilla y León.
- Araujo, F. (1984). *La Reina Del Tormes, Guía Histórico-Descriptiva De La Ciudad De Salamanca*. Primera, Salamanca.
- Arenas, R., Gil Iburguchi, J.I., González Lodeiro, F., Klein, E., Martínez Catalán, J.R., Ortega Gironés, E., Pablo Maciá, J.G. y Peinado, M. (1986). Tectonostratigraphic units in the complexes with mafic and related rocks of the NW of the Iberian Massif. *Hercynica* **2**, 23.
- Arnold, A. y Zehnder, K. (1989). Salt weathering on monuments. En: F. Zezas (Ed.), *The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Bari, 31-58.

- ASTM (1984). *Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry. D 4404-84*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Pa.
- Ávila Jalvo, J.M. (2002). Análisis constructivo del Puente Mayor de Salamanca. *SALAMANCA, Revista de estudios* **48**, 51-79.
- Azofra Agustín, E. (1999). El Arte de la segunda mitad del siglo XVIII. En: E. Azofra Agustín (Ed.), *Libro de oro del arte salmantino*. El Adelanto-Caja Duero, 170-189.
- Barrière, M. (1981). On curved laminae, graded layers, convection currents and dynamic crystal sorting in the Ploumanac'h (brittany) subalkaline granite. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **77**, 214-224.
- Bayliss, P., Erd, D.C., Morse, M.E., Sabina, A.P. y Smith, D.K. (1986a). *Mineral Powder Diffraction File. Data Book*. R. Jenkkis y W. F. McClune (Eds.), JCPDS International Center for Diffraction Data. Swarthmore.
- Bayliss, P., Erd, D.C., Morse, M.E., Sabina, A.P. y Smith, D.K. (1986b). *Mineral Powder Diffraction File. Search Manual*. R. Jenkkis y W. F. McClune (Eds.), JCPDS International Center for Diffraction Data. Swarthmore.
- Benavente, D. (2002). Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. Alicante.
- Benet, N. (1999). El Arte Prehistórico y Antiguo. En: E. Azofra Agustín (Ed.), *Libro de oro del arte salmantino*. El Adelanto-Caja Duero, 8-31.
- Benzecri, J.P. (1973). *L'analyse des Données*. Paris.
- Berriochoa Sánchez-Moreno, V. (1986). La Catedral de Salamanca. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- Berriochoa Sánchez-Moreno, V. (1997-98). Plan director de la Catedral de Salamanca. *Ars Sacra* **4-5**, 113-126.
- BOE (1974). BOE publicado el 23 de enero del año 1974. Madrid.
- Borthwick, J. y Harmon, R.S. (1982). A note regarding ClF_3 as an alternative to BrF_5 for oxygen isotope analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **46**, 1665-1668.
- Bowley, M.J. (1975). Desalination of Stone: a Case Study. *Building Research Establishment Current Paper CP46/75*. Building Research Establishment, Watford, Inglaterra.
- Brindley, G.W. y Brown, G. (1980). *Crystal Structures of Clay Mineral and Their X-ray Identification*. G. W. Brindley y G. Brown (Eds.), Mineralogical Society. Londres.
- Bromblet, P., Labouré, M. y Oriol, G. (2003). Diversity of the cleaning procedures including laser for the restoration of carved portals in France over the last 10 years. *Journal of Cultural Heritage* **4, Supplement 1**, 17-26.
- Bueno Hernández, F. (2002). *Historia de las obras públicas en la provincia de Salamanca*. Diputación de Salamanca (Ed.).

- Camuffo, D. (1996). Limits of stone sensitivity to freezing-thawing cycles. En: M. A. Vicente, J. Delgado Rodrigues y J. Acevedo (Eds.), *Degradation and conservation of granitic rocks in monuments*, Santiago de Compostela, España, 455-462.
- Carmona-Quiroga, P.M., Martínez-Ramírez, S., Sánchez de Rojas, M.I. y Blanco-Varela, M.T. (2010). Surface water repellent-mediated change in lime mortar colour and gloss. *Construction and Building Materials* **24**, 2188-2193.
- Casaseca Casaseca, A. (1988). *Rodrigo Gil de Hontañón*. Junta de Castilla y León (Ed.).
- Casaseca Casaseca, A. (1999). El Arte del siglo XX. En: E. Azofra Agustín (Ed.), *Libro de oro del arte salmantino*. El Adelanto-Caja Duero, Salamanca, 210-225.
- Casaseca Casaseca, A. (2002). Salamanca, conjunto histórico. En: A. Casaseca Casaseca (Ed.), *Jardines, sitios y conjuntos históricos de la provincia de Salamanca*. Diputación de Salamanca, Salamanca, 151-187.
- Castro, A., Corretgé, L.G., De La Rosa, J., Enrique, P., Martínez, F.J., Pascual, E., Lago, M., Arranz, E., Galé, C., Fernández, C., Donaire, T. y López, S. (2002). Palaeozoic Magmatism. En: W. Gibbons y M. T. Moreno (Eds.), *The Geology Of Spain*. Geological Society, Londres, 117-153.
- Castro Santamaría, A. (1999). El Renacimiento. En: E. Azofra Agustín (Ed.), *Libro de oro del arte salmantino*. El Adelanto-Caja Duero, Salamanca, 124-148.
- Castro Santamaría, A. (2002). *Juan de Álava, arquitecto del Renacimiento*. Caja Duero (Ed.).
- Castro Santamaría, A. (2003). La Catedral de Salamanca bajo la maestría de Juan de Setién Güemes (1667-1703). En: G. Ramallo Asensio (Ed.), *Las Catedrales Españolas del barroco a los historicismos*. Universidad de Murcia, Murcia, 467-492.
- Castro Santamaría, A. y Rupérez Almajano, M.N. (1993). *Monumentos salmantinos desaparecidos. El Colegio de Cuenca*. CSIC. Salamanca.
- Chacón Muñoz, H. (2005). Caracterización geoquímica de la fase fluida en magmas de composición intermedia a básica. Aplicación al magmatismo appinitico de Sanabria y casos similares del Macizo Ibérico. Tesis Doctoral. Universidad de Huelva. Huelva.
- Choquette, P.W. y Pray, L.C. (1970). Geologic nomenclature and classification of porosity insedimentary carbonates. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin* **54**, 207-250.
- CIE (1931). *Commission Internationale de l'Eclairage Proceedings*. Cambridge University Press (Ed.), Cambridge.
- CIE (1976). Recommendations on uniform colour spaces, colour difference equations, psychometrics colour terms. En: Commission Internationale de l'Eclairage (Ed.), Paris.
- Clayton, R.N. y Mayeda, T.K. (1963). The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **27**, 43-52.

- Corretgé, L.G., Suárez, O. y Galán, G. (1990). West Asturias-Leonese Zone. Igneous Rocks. En: R. D. Dallmeyer y E. Martínez García (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer-Verlag, Berlin, 115-128.
- Corrochano, A. (1977). Estratigrafía y Sedimentología del Paleógeno en la provincia de Zamora. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca. Salamanca.
- Cortázar Estíbaliz, J. (2002). *Historia y Arte del Colegio Menor de San Pelayo de Salamanca*. Universidad de Salamanca (Ed.).
- De Castro, E. (1979). *Évaluation de l'hygroscopicité des pierres*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.
- De Witte, E., Charola, A.E. y Sherryl, R.P. (1985). Preliminary tests on commercial stone consolidants. En: G. Félix (Ed.), *5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Lausanne, 709-718.
- Debon, F. y Le Fort, P. (1983). A chemical mineralogical classification of common plutonic rocks and association. *Earth Sciences* **73**, 135-149.
- Debon, F. y Le Fort, P. (1988). A cationic classification of common plutonic rocks and their magmatic associations: principles, method, applications. *Bulletin de Mineralogie* **111**, 493-510.
- Delgado Rodrigues, J. (1996). A brief introduction to the degradation and conservation of granitic rocks. En: J. Delgado Rodrigues y D. Costa (Eds.), *Conservation of granitic rocks*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Delgado Rodrigues, J. y Costa, D. (1996). Assessment of the efficacy of consolidants in granites. En: M.A. Vicente, J. Delgado Rodrigues y J. Acevedo (Eds.), *EC Workshop on Degradation and Conservation of Granitic Rocks*, Santiago de Compostela, España, 343-348.
- Díez Balda, M.A. (1986). El Complejo Esquisto Grauváquico, las Series Paleozoicas y la Estructura Hercínica al Sur de Salamanca. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca. Salamanca.
- Díez Balda, M.A., García Casquero, J.L., Monteserin López, V., Nozal Martín, F., Pardo Alonso, M.V. y Robles Casas, R. (1990a). Cizallamientos subverticales posteriores a la segunda fase de deformación hercínica al sur de Salamanca (Zona Centro Ibérica). *Revista de la Sociedad Geológica de España* **3**, 117-125.
- Díez Balda, M.A., Martínez Catalán, J.R. y Ayarza Arribas, P. (1995). Syn-collisional extensional collapse parallel to the orogenic trend in a domain of steep tectonics: the Salamanca Detachment Zone (Central Iberian Zone, Spain). *Journal of Structural Geology* **17**, 163-182.
- Díez Balda, M.A., Vegas, R. y González Rodeiro, F. (1990b). Central Iberian Zone, Autochthonous Sequences. 2: Structure. En: R. D. Dallmeyer y E. Martínez García (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer-Verlag, Berlin, 172-188.
- Díez Elcuaz, J.I. (2003). *Arquitectura y urbanismo en Salamanca: 1890-1939*. Colegio de Arquitectos de León (Ed.).
- Díez Montes, A. (2006). La Geología del Dominio "Ollo de Sapo" en las comarcas de Sanabria y Terra do Bolo. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca. Salamanca.

- Doehne, E. y Price, C.A. (2010). *Stone conservation. An overview of current research. 2*, The Getty Conservation Institute. Los Ángeles, USA.
- DPUS (1983). Síntesis geológica del basamento (zona del centro-oeste español). En: Universidad de Salamanca (Ed.).
- Dullien, F.A.L. (1992). *Porous media fluid transport and pore structure*. Academic Press (Ed.), San Diego.
- Esbert, R.M., Grossi, C., Ordaz, J. y Alonso, F.J. (1991). La conservación de la piedra de la Casa Milá ("La Pedrera" de Gaudí, Barcelona): Pruebas preliminares. *Boletín Geológico y Minero* **102**, 446-454.
- Esbert, R.M., Ordaz, J., Alonso, F.J., Montoto, M., González Limón, T. y Álvarez de Buergo Ballester, M. (1997). Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos. En: Col·legi d'Apparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona (Ed.), Barcelona.
- Escuder Viruete, J., Arenas, R. y Martínez Catalán, J.R. (1994). Tectonothermal evolution associated with Variscan crustal extension in the Tormes Gneiss Dome (NW Salamanca, Iberian Massif, Spain). *Tectonophysics* **238**, 117-138.
- Espinel, J.L. (1995). *San Esteban de Salamanca. Historia y guía (siglos XIII-XX)*. San Esteban (Ed.), 2.
- Falcón, M. (1867). *Salamanca artística y monumental*. J. A. Bonilla Hernández (Ed.), Caja Duero.
- Fitzner, B. (1990). Mapping of natural stone monuments - documentation of lithotypes and weathering forms. En: Veniale y Zezza (Eds.), *Advanced Workshop "Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones"*, Pavia, Italia.
- Fitzner, B. (2004). Documentation and evaluation of stone damage on monuments. En: D. Kwiatkowski y R. Löfvendahl (Eds.), *Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Estocolmo, Suecia, 677-690.
- Fitzner, B. y Heinrichs, K. (2001). Damage diagnosis on stone monuments - weathering forms, damage categories and damage indices. En: R. & Viles Prikryl, H.A. (Ed.), *Stone weathering and atmospheric pollution network (SWAPNET)*, Prachov Rocks - Czech Republic, 12-13.
- Fitzner, B., Heinrichs, K. y Kownatzki, R. (1992). Classification and mapping of weathering forms. En: J. Delgado-Rodriguez, F. Henriques y F. Telmo-Jeremias (Eds.), *7th International Congress on deterioration and conservation of stone*, Lisboa, Portugal, 957-968.
- Fitzner, B., Heinrichs, K. y Kownatzki, R. (1997). Weathering forms at natural stone monuments: Classification, mapping and evaluation. *Restoration of Buildings and Monuments: An International Journal. Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege: Eine internationale Zeitschrift* **3**, 105-124.
- Fournet, J. (1861). *Géologie lyonnaise*. Impr. de Barret. Lyon.

- Friedman, I. y Gleason, J.D. (1973). Notes on the bromine pentafluoride technique of oxygen extraction. *Journal of Research U.S. Geological Survey* **1**, 679-680.
- Furlan, V. y Pancella, R. (1983). Effects of Water on the Properties of a Calcereous Sandstone Consolidated with Synthetic Resins. En: F. H. Wittmann (Ed.), *International Colloquium on Materials Science and Restoration*. Esslingen 325-330.
- Gabriel, K.R. (1971). The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika* **58**, 453-467.
- Gabriel, K.R. (1972). Analysis of Meteorological Data by Means of Canonical Decomposition and Biplots. *Journal of Applied Meteorology* **11**, 1071-1077.
- Gabriel, K.R. (1995). MANOVA Biplots for two-way contingency tables. En: W. Krzanowski (Ed.), *Recent Advances in Descriptive Multivariate Analysis*. Clarendon Press, Oxford, 227-268.
- Gabriel, K.R. y Odoroff, C.L. (1990). Biplots in biomedical research. *Statistics in Medicine* **9**, 469-485.
- Gaceta (1931). Decreto de 3 de Junio de 1931. Madrid.
- Galindo, M.P. (1986). Una alternativa de representación simultánea: HJ-Biplot. *Qüestiió* **10**, 10.
- Galindo, M.P. y Cuadras, C.M. (1986). *Una extensión del método Biplot y su relación con otras técnicas*. Universidad de Barcelona. Barcelona.
- Gallasategui Suárez, G. (2005). *Petrología del Macizo Granodiorítico de Bayo-Vigo (Provincia de Pontevedra, España)*. Universidad de A Coruña (Ed.), Ediciós do Castro. O Castro, Sada, A Coruña.
- García Catalán, E. (2005). *El Monasterio de San Vicente de Salamanca*. Centro de Estudios Salmantinos. Caja Duero (Ed.).
- García de Figuerola, L.C., Franco, M.P. y Castro, A. (1983). Características petrológicas del complejo laminar pegmatoide ("Serie del Álamo") de las provincias de Salamanca y Ávila. *Studia Geologica Salmanticensia* **19**, 33-77.
- García de Figuerola, L.C., Ugidos, J.M., Bea, F., Carnicero, A., Franco, P., Rodríguez, M.D. y López Plaza, M. (1980). Plutonism of central western Spain. A preliminary note. *Estudios Geológicos* **36**, 339-348.
- García de los Ríos Cobo, J.I. (1981). Estudio petrológico-estructural de la región granítica situada al NE de Almeida (Provincia de Zamora). Grado de Salamanca. Universidad de Salamanca. Salamanca.
- García de los Ríos Cobo, J.I. (1991). *Investigación de granito en el municipio de Los Santos*. Ayuntamiento de Los Santos y Consejería de Economía y Hacienda. Junta de Castilla y León (Ed.), Junta de Castilla y León.
- García de los Ríos Cobo, J.I. y Baez Mezquita, J.M. (2002). *La piedra en Castilla y León*. Junta de Castilla y León (Ed.), Segunda, Valladolid.

- García-Talegón, J. (1995). Palealteraciones y alteraciones de rocas silíceas: implicaciones en el paisaje y su comportamiento como materiales de construcción. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca. Salamanca.
- García-Talegón, J., Vicente, M.A., Molina-Ballesteros, E. y Vicente-Tavera, S. (1999). Determination of the origin and evolution of building stones as a function of their chemical composition using the inertia criterion based on an HJ-biplot. *Chemical Geology* **153**, 37-51.
- Gil Ibarguchi, J.I. (1982). *Metamorfismo y plutonismo en la región de Muxia-Finisterre (NO de España)*. Corpus Geologicum Gallaciae, Segunda Serie, Academia de Ciencias Gallega, Laboratorio Geológico de Laxe. A Coruña.
- Gil Ibarguchi, J.I. y Arenas, R. (1990). Metamorphic evolution of the allochthonous complexes from the northwest of the Iberian Peninsula. En: R. D. Dallmeyer y E. Martínez García (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer-Verlag, Berlin, 237-246.
- Gillani, G., Santonja, M. y Macarro, C. (2007). Los miliarios de la Vía de la Plata en la provincia de Salamanca. En: G. Gillani y M. Santonja (Eds.), *Arqueología de la Vía de la Plata en Salamanca*. Fundación Premysa, Béjar, Salamanca, 81-182.
- Gómez de Terreros Guardiola, M.G. y Alcalde Moreno, M. (Eds.) (2000). Metodología de estudio de la alteración y conservación de la piedra monumental. Universidad de Sevilla, Secretariado de Publicaciones Sevilla, España.
- Gonzalo, F.J., Saavedra, J., García Sánchez, A., Pellitero, E., Arribas, A. y Rodríguez, S. (1975). Las rocas graníticas de la antiforra de Martinamor (Salamanca). *Actas II Reunión Iberoamericana de Geología Económica*, 227-246.
- Greenland, D.J. (1977). Soil damage by intensive arable cultivation: Temporary or permanent? *Philosophical Transactions of the Royal Society. Serie B* **281**, 193-208.
- Guitan Ojea, F., Casal Porto, M. y Silva Hermo, B. (1985). Alteración de los monumentos graníticos en la provincia de La Coruña: datos preliminares. *Cuaderno Lab. Xeolóxico de Laxe* **10**, 389-409.
- Gutt, W.H. (1973). *Conservation of Stone. The Next Steps*. Stone Industries. Londres.
- Hempel, K.F.B. y Moncrieff, A. (1976). Report on Work since Last Meeting in Bologna, October 1971. En: R. Rossi-Manaresi (Ed.), *The conservation of stone. I: proceedings of the International symposium*, Boloña, 319-339.
- Herráez Hernández, J.M. (1989). El Puente Romano de Salamanca y la riada de 1499 según el manuscrito de José Iglesias de la Casa. *I Congreso de Historia de Salamanca*. Centro de Estudios Salamantinos, Salamanca, 355-361.
- Herrero Hernández, H. (2007). Idoneidad y durabilidad de la Arenisca de Villamayor (Eoceno medio, Salamanca). Grado de Salamanca. Universidad de Salamanca. Salamanca.
- ICOMOS (2008). *Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns. Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*. V. Vergès-Belmin (Ed.), ICOMOS

- (International Council on Monuments and Sites) and ICS (International Scientific Committee for Stone). Paris.
- Iglesias, M. y Ribeiro, A. (1981). La zone de cisaillement ductile de Juzbado (Salamanca)-Penalva Do Castelo (Viseu): un linéament ancien réactivé pendant l'orogénese hercynienne? *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal* **LXVII**, 89-93.
- Iñigo, A.C. (1995). Respuesta de rocas graníticas a procesos de envejecimiento acelerado y al tratamiento con productos básicos de conservación. Tesis doctoral. Universidad de Salamanca. Salamanca.
- Iñigo, A.C., Alonso, R. y Vicente-Tavera, S. (2001). Dissolution of salts crystallised in building materials using ultrasound: an alternative to the NORMAL (1983) normative. *Ultrasonics Sonochemistry* **8**, 127-130.
- Iñigo, A.C., García-Talegón, J., Vicente-Tavera, S., Martín-González, S., Casado-Marín, S., Vargas-Muñoz, M. y Pérez-Rodríguez, J.L. (2013). Colour and ultrasound propagation speed changes by different ageing of freezing/thawing and cooling/heating in granitic materials. *Cold Regions Science and Technology* **85**, 71-78.
- Iñigo, A.C., López Moro, F.J., Vicente Tavera, S. y Rives, V. (2003). The Roman bridge of Salamanca, Spain. Characterization for a proper restoration. En: J. L. Pérez Rodríguez (Ed.), *Applied study of cultural heritage and clays*. Biblioteca de Ciencias. CSIC, 59-70.
- Iñigo, A.C., López-Moro, F.J., Vicente-Tavera, S. y Rives, V. (2005). Monitoring of origin and evolution of building stones through their major components. *Journal of Materials in Civil Engineering* **17**, 440-446.
- Iñigo, A.C., Rives, V. y Vicente-Tavera, S. (2000a). Reproducción en cámara climática de las formas de alteración más frecuentes detectadas en materiales graníticos, en clima de tendencia continental. *Materiales de Construcción* **50**, 57-60.
- Iñigo, A.C., Vicente, M.A. y Rives, V. (2000b). Weathering and decay of granitic rocks: its relation to their pore network. *Mechanics of Materials* **32**, 555-560.
- Iñigo, A.C. y Vicente-Tavera, S. (2002). Surface-inside (10 cm) thermal gradients in granitic rocks: effect of environmental conditions. *Building and Environment* **37**, 101-108.
- Iñigo, A.C., Vicente-Tavera, S. y Rives, V. (2004). MANOVA-biplot statistical analysis of the effect of artificial ageing (freezing/thawing) on the colour of treated granite stones. *Color Research and application* **29**, 115-120.
- Iñigo, A.C., Vicente-Tavera, S., Rives, V. y Vicente, M.A. (1997). Color changes in the surface of granitic materials by consolidated and/or water repellent treatments. *Color Research and application* **22**, 133-141.
- J.C.P.D.S. (1974). *Mineral Powder diffraction File*.
- Jiménez de Francisco, P.E. (2000). Estudio petrofísico del granito Gris Los Santos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.

- Jiménez Fuentes, E., Corrochano, A. y Alonso-Gavilán, G. (1983). El Paleógeno de la cuenca del Duero. En: J. A. Comba (Ed.), *Geología de España, Libro Jubilar J. M. Ríos*. IGME, Madrid, 489-493.
- Jiménez Fuentes, E. y Martín de Jesús, S. (1992). Sobre el material empleado en la reconstrucción del Puente Romano de Salamanca durante el siglo XVII. En: Universidad de Salamanca (Ed.), *I Congreso Historia de Salamanca*, Salamanca, 363-365.
- Jiménez, M.C., Menéndez, L.R. y Prieto, M. (2000). El Puente Romano de Salamanca en las crónicas, las fuentes históricas y la historiografía. *SALAMANCA, Revista de estudios* **44**, 192-220.
- Jiménez García, J.A. (2003). Alcázar de San Juan. En: L. Martín Sánchez (Ed.), *Inventario de bienes inmuebles de la Provincia de Salamanca*. Diputación de Salamanca, Salamanca, 152-153.
- Jones, B.F. y Galán, E. (1988). Sepiolite and palygorskite. En: S. W. Bailey (Ed.), *Hydrous Phyllosilicates*. Mineralogical Society of America, Washington, DC, 632-674.
- Julivert, M., Fontbote, J.M., Ribeiro, A. y Conde, L. (1972). Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares. En: IGME (Ed.) IGME, Madrid.
- Kretz, R. (1983). Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* **68**, 277-279.
- Kovarikova, P., Siebel, W., Jelínek, E., Štemprok, M., Kachlík, V., Holub, F.V. and Blecha, V. (2010). Dioritic intrusions of the Slavkovsk y les (Kaiserwald), Western Bohemia: their origin and significance in late Variscan granitoid magmatism. *Int. J. Earth Sci.*, **99**, 545–565.
- Lameyre, J. y Bowden, P. (1982). Plutonic rock types series: discrimination of various granitoid series and related rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **14**, 169-186.
- Laurenzi Tabasso, M. y Mecchi, A.M. (1985). Proposal for a methodology to evaluate the possible damage produced in stones by chemical cleanings. En: G. Félix (Ed.), *5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Lausanne, 975-982.
- Lazzarini, L. y Laurenzi Tabasso, M. (1986). *Il Restauro della pietra*. A. Milani (Ed.), CEDAM. Padua.
- Lazzarini, L. y Laurenzi-Tabasso, M. (1990). The restoration of Stone: Cleaning. En: F. Veniale y U. Zezza (Ed.), *Advanced workshop "Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones"*, Pavia, Italia.
- Ley (1985) del Patrimonio Histórico Español. España.
- Ling, D. y Smith, S. (1996). To desalinate or not to desalinate? That is the question. *Le Dessalement des Matériaux Poreux.*, Darantiere, France, 65-74.
- Llambías, E.J. (2001). Geología de los cuerpos ígneos. En: MAGNA publicaciones (Ed.), Serie Correlación Geológica. Instituto Superior de correlación geológica INSUGEO, San Miguel de Tucumán, Argentina.

- López Asenjo, A. (2005). Procesos de restauración de la Plaza. En: A. Estela Goite (Ed.), *La Plaza Mayor de Salamanca*. Caja Duero, Salamanca, 239-265.
- López Moro, F.J. (2000). Las rocas plutónicas calcoalcalinas y shoshoníticas del domo varisco de Tormes (Centro-Oeste Español). Tesis Doctoral. Salamanca. Salamanca.
- López Moro, F.J. y López Plaza, M. (2004). Monzonitic series from the Variscan Tormes Dome (Central Iberian Zone): petrogenetic evolution from monzogabbro to granite magmas. *Lithos* **72**, 19-44.
- López Plaza, M. (1982). Contribución al conocimiento de la dinámica de los cuerpos graníticos en la penillanura salmantino-zamorana. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca. Salamanca.
- López Plaza, M. y Carnicero, A. (1987). El plutonismo hercínico de la penillanura salmantino-zamorana (Centro-Oeste de España). Visión de conjunto en el contexto geológico regional. En: F. Bea, A. Carnicero, J.C. Gonzalo, M. López Plaza y M.D. Rodríguez Alonso (Eds.), *Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico*. Rueda, 53-68.
- López Plaza, M., García de los Ríos Cobo, J.I., López Moro, F.J., González Sánchez, M., Iñigo, A.C., Vicente Tavera, S. y Jiménez Fuentes, E. (2009). La utilización del granito de Los Santos en la Ciudad de Salamanca. *Studia Geologica Salmantica* **45**, 7-40.
- López Plaza, M., González Sánchez, M., García de los Ríos Cobo, J.I., Cortázar Estíbaliz, J., Iñigo, A.C., Vicente Tavera, S. y López-Moro, F.J. (2007a). La utilización de rocas vaugneríticas en los monumentos de Salamanca. *Studia Geologica Salmantica* **43**, 115-142.
- López Plaza, M., González Sánchez, M. y Iñigo, A.C. (2007b). La utilización del leucogranito turmalinífero de Martinamor en los monumentos de Salamanca y Alba de Tormes. *Studia Geologica Salmantica* **43**, 247-280.
- López Plaza, M. y López Moro, F.J. (2003). Eurogranites in western Castilla y León, Spain. Part III: The Tormes dome. *Eurogranites 2003*, Salamanca.
- López Plaza, M. y López Moro, F.J. (2008). *Eurogranites in Western Castilla y León: The Tormes Dome*. M. López Plaza y F.J. López Moro (Eds.), re-edited, Salamanca.
- López Plaza, M., López Moro, F.J., Gonzalo Corral, J.C. y Carnicero, A. (1999). Asociaciones de rocas plutónicas básicas e intermedias de afinidad calcoalcalina y shoshonítica y granitoides relacionados en el Domo Hercínico de Tormes (Salamanca y Zamora). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía* **22**, 211-234.
- López Plaza, M. y Martínez Catalán, J.R. (1987). Síntesis estructural de los granitoides de Macizo Hespérico. En: F. Bea, A. Carnicero, J. C. Gonzalo, M. López Plaza y M. D. Rodríguez Alonso (Eds.), *Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico*. Rueda, Madrid, 195-210.
- M., W.W. (2013). *Geochemistry*. Wiley-Blackwell (Ed.).

- MacKenzie, W.S., Donaldson, C.H. y Guilford, C. (1982). *Atlas of Igneous Rocks and their textures*. Longman (Ed.), Harlow.
- MacKenzie, W.S. y Guilford, C. (1980). *Atlas of rock forming minerals in thin sections*. Longman (Ed.), Londres.
- Madruza Real, A. (1983). *Arquitectura barroca salmantina: Las Agustinas de Monterrey*. Centro de Estudios Salmantinos (Ed.).
- Madruza Real, A. (2005). *Las plazas en torno a la Plaza Mayor*. Ayuntamiento de Salamanca (Ed.).
- Martín Hernández, V. (1992). *Fragmentos de una historia sociourbanística de la ciudad de Salamanca*. Centro de Estudios Salmantinos. CSIC (Ed.).
- Martín Valls, R., Benet, N. y Macarro Alcalde, C. (1991). Arqueología de Salamanca. En: Junta de Castilla y León (Ed.), *Del Paleolítico a la historia. Museo de Salamanca*. 137-167.
- Martínez Catalán, J.R., Arenas, R., Díaz García, F., Rubio Pascual, F.J., Abati, J. y Marquínez, J. (1996). Variscan exhumation of a subducted Paleozoic continental margin: The basal units of the Ordenes Complex, Galicia, NW Spain. *Tectonics* **15**, 106-121.
- Martínez, F.J., Julivert, M., Sebastian, A., Arboleda, M.L. y Gil Ibarra, J.I. (1988). Structural and thermal evolution of high-grade areas in the northwestern parts of the Iberian Massif. *American Journal of Science* **288**, 969-996.
- Martínez Frías, J.M. (1990). *El monasterio de Nuestra Señora de la Victoria, la Orden Jerónima en Salamanca*. Universidad de Salamanca (Ed.), Salamanca.
- Martínez García, E. y Nicolau, J. (1973). Los terrenos infra-ordovícicos de la antiforma de Martinamor (Salamanca). *Boletín Geológico y Minero* **84**, 407-418.
- Massa, S., Naldini, S. y Rorro, A. (1991). A system of classification of the decay of stone monuments. En: N. S. N. S. Baer, Sabbioni C. y A. I. Sors (Eds.), *Science, Technology, and European Cultural Heritage: Proceedings of the European Symposium*, Bolonia, Italia, 859-862.
- Mavrov, G. (1983). Ageing of Silicone Resins. *Studies in Conservation* **28**, 171-178.
- Menéndez Bueyes, L.R. (2000-2001). El puente romano de Salamanca y su contexto histórico. (A propósito del CIL II 4685). *Memorias de Historia Antigua* **XXI-XXII**, 149-183.
- Menéndez Bueyes, L.R. y Jiménez González, M.C. (2007). Arqueología de la Vía de la Plata (Salamanca). En: G. Gillani y M. Santonja (Eds.), *El Puente Romano de Salamanca sobre el Tormes en el Iter ab Emerita Asturicam*. PREMISA, Béjar, 183-212.
- Meng, B. (1993). Characterization of pore structure for the interpretation of moisture transport. En: M. J. Thiel (Ed.), *Proceedings of the international RILEM/UNESCO congress. Conservation of stone and other materials*, Paris.

- Monjo, J.J. y Lasheras, F. (1991). *Curso de patología, conservación y restauración de edificios*. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid (Ed.), Servicio de Publicaciones del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. Madrid.
- Monteserin López, V., Martín-Serrano García, A., Santisteban Navarro, J.I. y Bellido Mulas, F. (1991a). Cartografía y Memoria de la Hoja del mapa Geológico de España, Las Veguillas (Hoja nº 503). En: ITGE (Ed.), MAGNA 50. ITGE, Madrid.
- Monteserin López, V., Martín Serrano-García, A. y Santisteban Navarro, J.I. (1991b). Cartografía y Memoria de la Hoja del mapa Geológico de España, Guijuelo (Hoja nº 528). En: ITGE (Ed.), MAGNA 50. ITGE, Madrid.
- Nakamura, N. (1974). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **38**, 757-775.
- NF (1973a). Mesures de la porosité, de la masse Volumique réelle et de la masse volumique apparente. París.
- NF (1973b). Mesures du Coefficient de Absorption d'eau. Paris.
- Nieto González, J.R. (2003). *La Universidad de Salamanca: Colegios y Casas-Palacio*. La Gaceta Regional (Ed.), Salamanca.
- Nieto González, J.R. (2004). La Universidad de Salamanca, Escuelas Mayores, Menores y Hospital del Estudio. Siglos XIII-XX. En: L. E. Rodríguez-San Pedro Bezares (Ed.), *Historia de la Universidad de Salamanca*. Salamanca, 375.
- NORMAL (1981). Assorbimento d'acqua per immersione totale - capacità d'imbibizione. Roma.
- NORMAL (1983). Dosaggio dei sali solubili. Roma.
- NORMAL (1986a). Assorbimento d'acqua per capillarità, Coefficiente di assorbimento capillare. Romal.
- NORMAL (1986b). Interventi conservative: Progettazione escuzion e valutazione preventiva. Roma.
- Núñez Paz, P., Redero Gómez, P. y Vicente García, J. (2001). *Salamanca. Guía de Arquitectura*.
- Ordaz, J. (1983). Características físicas y alterabilidad de la piedra de Villamayor (Salamanca). *Materiales de Construcción* **190-191**, 85-95.
- Ordaz, J. y Alonso, F.J. (1983). Características del sistema poroso de la arenisca de Villamayor (Salamanca). *Trabajos de Geología* **13**, 83-92.
- Ordaz, J. y Eibert, R.M. (1988). Glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción. *Materiales de Construcción* **38**, 39-45.
- Paliza Monduate, M.T. (1999). El Arte del siglo XIX. En: El Adelanto (Ed.), *Libro de oro del arte salmantino*. 190-209.
- Paliza Monduate, M.T. y Senabre López, D. (2004). Arquitectura y espacios universitarios. En: L. E. Rodríguez-San Pedro Bezares (Ed.), *Historia de la Universidad de Salamanca*. 487-521.

- Pédro, G. (1993). Un phenomene normal de la surface de la planete: l'alteration des roches. En: M. A. Vicente, E. Molina y V. Rives (Eds.), *Alteración de granitos y Rocas afines empleados como materiales de construcción*. CSIC, 17-50.
- Pellerin, F.M. (1980). La porosimétrie au mercure appliquée á l'étude géotechnique des sols et des roches. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées* **106**, 105-116.
- Pellitero, E. (1981). La zona wolframífera centro-oriental de Salamanca. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* **2**, 227-224.
- Pérez Estaún, A., Martínez Catalán, J.R. y Bastida, F. (1991). Cristal thickening and deformation sequence in the footwall to the Variscan belt of NW Spain. *Tectonophysics* **191**, 243-253.
- Pesquera, A., Torres-Ruiz, J., Gil-Crespo, P.P. y Jiang, S.Y. (2005). Petrographic, Chemical and B-Isotopic Insights into the Origin of Tourmaline-Rich Rocks and Boron Recycling in the Martinamor Antiform (Central Iberian Zone, Salamanca, Spain). *Journal of Petrology* **46**, 1013-1044.
- Pinilla González, J. (1978). *El arte de los monasterios y conventos despoblados de la provincia de Salamanca*. Universidad de Salamanca (Ed.), Salamanca.
- Pinto, A.P.F. y Rodrigues, J.D. (2008). Stone consolidation: The role of treatment procedures. *Journal of Cultural Heritage* **9**, 38-53.
- Puche Riart, O. y González Aguado, M.T. (1992). La piedra monumental de Castilla y León: Limpieza. *Roc Máquina* **22**, 18-32.
- Ribeiro, A., Pereira, E. y Dias, R. (1990). Central-Iberian Zone. Allochthonous Sequences. Structure in the Northwest of the Iberian Peninsula. En: R. D. Dallmeyer y E. Martínez García (Eds.), *Pre-Mesozic Geology of Iberian*. Springer-Verlag, Berlin.
- RILEM (1978). Coefficient de conductivité de vapeur d'eau.
- RILEM (1980). Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. *Matériaux et Costructions, Bull. RILEM* **13**, 252-275.
- Rivas, T., Silva, B. y Prieto, B. (1998). Medida de la eficacia de dos hidrofugantes aplicados a rocas graníticas. *Materiales de Construcción* **48**, 5-21.
- Rives, V. y García-Talegón, J. (2006). Decay and conservation of building stones on cultural heritage monuments. *Material Science Forum* **514-516**, 1689-1694.
- RO. (1887). Real Orden de 17 de junio de 1887. Madrid.
- Robert, M., Bernabe, E., Bromblet, P., Jaunet, A.M., Verges Belmin, V. y Penven, M.J. (1996). Identification of two alteration microsystems chemical and physical, causing granite and kersantite degradation in Brittany (France). En: M. A. Vicente, J. Delgado Rodrigues y J. Acevedo (Eds.), *Degradation and conservation of granitic rocks in monuments*, Santiago de Compostela, España, 67-71.
- Robertson, A.R. (1997). The ICE 1976 Color-Diference formulae. *Color Research and application* **2**, 7-11.

- Rodríguez G. de Ceballos, A. (1966). El primitivo colegio de la Compañía de Jesús en Salamanca (1545-1665). *Miscelánea Comillas, Univ. Pontif. Comillas* **46**, 103-168.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (1968a). La arquitectura de Andrés García de Quiñones. *Archivo Español de Arte* **162-163**, 105-130.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (1968b). Noticias sobre el arquitecto Andrés García de Quiñones. *Archivo Español de Arte* **161**, 35-43.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (1975). Urbanismo en Salamanca a finales del siglo XVIII. *Bol. Seminario de Arte y Arqueología. Universidad de Valladolid* **40-41**, 287-296.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (1976). Juan Moreno y la arquitectura protobarroca en Salamanca. *Archivo Español de Arte* **49**, 247-271.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (1977). *La Plaza Mayor de Salamanca*. Centro de Estudios Salmantinos, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (1978). La torre de la Catedral Nueva de Salamanca. *Bol. Seminario de Arte y Arqueología. Universidad de Valladolid* **44**, 245-256.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (1981). Aportaciones a Simón Gavilán Tomé. *Archivo Español de Arte* **213**, 29-60.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (1985a). *El Colegio Real de la Compañía de Jesús*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas Centro de Estudios Salmantinos (Ed.).
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (1985b). Nuevos documentos sobre José de Churriguera (1665-1700). *Archivo Español de Arte* **58**, 10-16.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (1987). *La Iglesia y el Convento de San Esteban. Estudio documentado de su construcción*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas Centro de Estudios Salmantinos (Ed.), Salamanca.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (1991). *La Plaza Mayor de Salamanca*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas Centro de Estudios Salmantinos (Ed.), Centro de estudios Salmantinos, Salamanca.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (1994). Las Catedrales de Salamanca. En: Pedro Navascués Palacio y José Luis Gutiérrez Robledo (Eds.), *Medievalismo y neomedievalismo en la arquitectura española: Las Catedrales de Castilla y León I. Actas de los congresos de Septiembre 1992 y 1993*. Fundación cultural Santa Teresa, Ávila, 147-160.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (2003a). *La Plaza Mayor de Salamanca. II. La Construcción de la Plaza*. 3ª, Caja Duero. Salamanca.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (2003b). Noticias documentales sobre el colegio de San Bartolomé de Salamanca. *Archivo Español de Arte* **302**, 187-205.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (2005a). *Guía artística de Salamanca*.
- Rodríguez G. de Ceballos, A. (2005b). *La Plaza Mayor de Salamanca*. Centro de Estudios Salmantinos (Ed.), Centro de Estudios Salmantinos.

- Rodríguez García, F. y García Ruiz, P. (1995). Porosimetría por intrusión de mercurio: fundamentos de la técnica y aplicación a la caracterización microestructural de hormigones. *Ingeniería Civil* **97**, 21-37.
- Rodríguez Navarro, C. (1998). Causas y mecanismos de alteración de los materiales calcáreos de las catedrales de Granada y Jaén. Universidad de Granada. Granada.
- Rodríguez Navarro, C. (2003). Análisis porosimétrico de rocas ornamentales. En: R. Villegas Sánchez y E. Sebastián Pardo (Eds.), *Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamientos para la conservación de los edificios históricos*. Junta de Andalucía, Consejería de Cultura, Granada, 134–153.
- Rodríguez Navarro, C. y Sebastián, E. (1994). Técnicas de análisis del sistema poroso de materiales pétreos ornamentales: usos y limitaciones. *Ingeniería Civil* **96**, 130-142.
- Rollinson, H.R. (1993). *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Scientific & Technical (Ed.), Longman Scientific & Technical.
- Rupérez Almajano, M.N. (1992). *Urbanismo de Salamanca en el siglo XVIII*. Colegio Oficial de Arquitectos de León (Ed.).
- Rupérez Almajano, M.N. (2003). *El colegio mayor de San Bartolomé o de Anaya*. Universidad de Salamanca (Ed.).
- Rupérez, M.N. (1992). *Urbanismo de Salamanca en el siglo XVIII*. Colegio Oficial de Arquitectos de León (Ed.).
- Saavedra Alonso, J., Pellitero Pascual, E., García-Sánchez, A. y Fernández-Turiel, J.L. (1984). Rasgos petrográficos y geoquímicos de los granitoides y rocas metamórficas del área Morille-Martinamor (Salamanca centro-oeste de España). *Estudios Geológicos* **40**, 15-21.
- Sabatier, H. (1991). Vaugnerites, special lamprophyre-derived mafia enclaves in some Hercynian granites from Western and Central Europe. En: J. Dier y B. Barbarian (Eds.), *Enclaves and Granite Petrology*. Elseviers, Amsterdam, 63-81.
- Sánchez y Sánchez, D. (1991). *La Catedral Vieja de Salamanca*. Cabildo de la Catedral (Ed.), Salamanca.
- Sánchez y Sánchez, D. (1993). *La Catedral Nueva de Salamanca*. Cabildo de la Catedral (Ed.), Salamanca.
- Sanfeliu, T., Ovejero, M., De la Fuente, C., Martín, D.J. y Salamero, M. (2000). Petrología y caracterización del sistema poroso de las calizas aptienses de Xert (Castellón). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* **25**, 349-352.
- Sastre Varas, L. (2001). *Convento de San Esteban. Arte e historia de los Dominicos*. Edilesa (Ed.), León.
- Senabre López, D. (2002). *Desarrollo urbanístico de Salamanca en el siglo XX*. Consejería de Fomento Junta de Castilla y León (Ed.), Salamanca.

- Sendín Calabuig, M. (1977). *El Colegio Mayor del Arzobispo Fonseca en Salamanca*. Universidad de Salamanca (Ed.), Salamanca.
- Sève, R. (1991). New formula for the computation of CIE 1976 Hue Difference. *Color Research and application* **16**, 217-218.
- Shand, S.J. (1943). *Eruptive Rocks. Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Ore-Deposits with a Chapter on Meteorite*. John Wiley & Sons (Ed.), Nueva York.
- SIEMCALSA (1997). Mapa Geológico y minero de Castilla y León. En: SIEMCAL S.A. (Ed.), Valladolid.
- Silva, B., Rivas, T. y Prieto, B. (1997). Evaluation of the efficacy of the treatment of granitic rocks with two silicic consolidants. The conservation of monuments in the Mediterranean. En: Technical chamber of Greece (Ed.), *4th International Symposium*, Rhodas, Grecia, 375-383.
- Silva, B., Rivas, T. y Prieto, B. (2000). Tratamientos de consolidación e hidrofugación aplicados a sustratos graníticos húmedos y contaminados por sales solubles *Materiales de Construcción* **50**, 15-31.
- Simpson, C. (1985). Deformation of granitic rocks across the brittle-ductile transition. *Journal of Structural Geology* **7**, 503-511.
- Sing, K.S.W., Everett, D.H., Haul, R.A.W., Moscou, L., Pierotti, R.A., Rouquérol, J. y Siemieniewska, T. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). *Pure and Applied Chemistry* **57**, 603-619.
- Sramek, J. y Kralova, M. (1981). Stability of some polymers used for the treatment on stone against radiation and SO₂ attack. En: Rossi Manaresi (Ed.), *International Symposium: The Conservation of Stone II*, Bolonia, Italia, 567-576.
- Suárez, F.J. y Alonso Gavilán, G. (2001). *Estratigrafía y sedimentología de los depósitos terciarios en el área de Salamanca*. Universidad de Salamanca (Ed.).
- Sun, S.S. y McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. En: A. D. Saunders y M. J. Norry (Eds.), *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society of London, Londres, 313-345.
- Tabasso, M.L. y Santamaria, U. (1985). Consolidant and protective effects of different products on Lecce limestone. En: G. Félix (Ed.), *5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Lausanne, 697-707.
- Tiano, P. y Pecchioni, E. (1990). Invecchiamento artificiale di materiali lapidei. En: P. Tiano (Ed.), *Giornata di Studio "Camera climatiche od ambientali nella ricerca applicata"*, Firenze (Italia), 37-42.
- Timón, S.M., Mora, M.C., Cembranos, M.L., Fernández, A. y Crespo, J.L. (2007). Contact metamorphism in the Los Santos W skarn (NW Spain). *Mineralogy and Petrology* **90**, 109-140.

- Torraca, G. (1975). *Solubility and solvents for conservation problems 1*, International Centre for the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural Property. Roma.
- Trujillano, R., García-Talegón, J., Iñigo, A.C., Vicente, M.A., Rives, V. y Molina, E. (1995). Removal of salts from granite by sepiolite. *Applied Clay Science* **9**, 459-463.
- TuTiempo.net (2005). http://www.tutiempo.net/clima/Salamanca_Matacan/82020.htm
- Ugidos, J.M. y Recio, C. (1993). Origin of cordierite-bearing granites by assimilation in the Central Iberian Massif (CIM), Spain. *Chemical Geology* **103**, 27-43.
- Ugidos, J.M., Rodríguez Alonso, M.D., Albert Colomer, V. y Martín Herrero, D. (1990). Cartografía y Memoria de la Hoja del mapa Geológico de España, Miranda del Castañar (Hoja nº 552). En: IGME (Ed.), MAGNA 50. IGME, Madrid.
- UNESCO (1988). Report of the World Heritage Committee. En: UNESCO (Ed.), *Convention concerning the protection of the world cultural and natural heritage*, Brasil.
- UNI (2006). UNI 11182 Beni culturali: Materiali lapidei naturali ed artificiali; Descrizione della forma di alterazione; Termini e definizioni. Milan y Roma.
- Urrea, J., Campos Sánchez-Bordona, M.D., Cano de Gardoqui, J.L., Casaseca Casaseca, A., Fernández del Hoyo, M.A., López Fernández, M.T., Martínez, R., Payo Herranz, R.J., Vasallo Toranzo, L. y Zámala, M.A. (2002). *Casas y palacios de Castilla y León*. Junta de Castilla y León.
- Vaca Lorenzo, A. (2002). La vía de la Plata a su paso por Salamanca. *Salamanca: revista de estudios* **48**, 13-50.
- Vaca Lorenzo, A. (2011). *El puente romano de Salamanca. Desde su construcción hasta la riada de San Policarpo de 1626*. Diputación de Salamanca (Ed.), Salamanca.
- Vaca Lorenzo, A., Guadalupe Salas, I. y García Maldonado, J. (2005). El Puente Romano. La puente mayor de Salamanca: sus orígenes. En: J. A. Bonilla Hernández y E. Rodríguez Martín (Eds.), *Puentes singulares de la provincia de Salamanca*. Diputación de Salamanca, Salamanca, 25-55.
- Valdeón, L., Grossi, C.M., Marcos, R.M. y Esbert, R.M. (1992). Effect of conservation treatments on hydric properties of stones. En: Fernando Henriques J. Delgado Rodrigues, F. Telmo Jeremias (Ed.), *7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Lisboa, Portugal, 1073-1081.
- Varas, M.J., Vicente-Tavera, S., Molina, E. y Vicente-Villardón, J.L. (2005). Role of canonical biplot method in the study of building stones: an example from Spanish monumental heritage. *Environmetrics* **16**, 405-419.
- Vera, J.A.E. (2004). *Geología de España*. J. A. Vera (Ed.), SGE-IGME. Madrid.
- Vergès-Belmin, V. (1992). Répartition des sels et cartographie des altérations sur la façade de l'église Notre-Dame-La-Grande à Poitiers, France. En: J. Delgado Rodrigues, F. Henriques y F. Telmo Jeremias (Eds.), *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Lisboa, Portugal, 927-936.

- Vergès-Belmin, V. (1997). Comparison of three cleaning methods-microsandblasting, chemical pads and Q-switched YAG laser-on a portal of the cathedral Notre-Dame in Paris, France. En: LACONA (Ed.), *Lasers in the Conservation of Artworks*, Liverpool, UK, 17-24.
- Vicente, M., A. (1996). Granitic materials and historical monuments: study of the factors and mechanisms of weathering and application to historical heritage conservation. En: M. A. Vicente, J. Delgado-Rodrigues y J. Acevedo (Eds.), *Degradation and conservation of granitic rocks and monuments*, Bruselas, Bélgica, 1-44.
- Vicente, M.A. (1996). The Role of Salt Crystallization in the Degradation Processes of Granite Monuments. En: F. Zezza (Ed.), *European Commission Research Workshop on Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments*, Bari, Italia, 147-154.
- Vicente, M.A., Garcia-Talegón, J., Iñigo, A.C., Rives, V. y Molina, E. (1993). Weathering mechanisms of silicated rocks in continental environments. En: M. J. Ehiel (Ed.), *International RILEM/UNESCO Congress on Conservation of Stone and Other Materials: Research-Industry-Media*, Londres, 320-327.
- Vicente, M.A. y Vicente-Tavera, S. (2001). Clay poultices in salt extraction from ornamental stones: A statistical approach. *Clays and Clay mineralogy* **49**, 227-235.
- Vicente-Tavera, S. (1992). Las técnicas de representación de datos multidimensionales en el estudio del Índice de Producción Industrial en la C.E.E. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca. Salamanca.
- Vicente-Villardón, J.L. (1992). Una alternativa a las técnicas factoriales clásicas basada en una generalización de los métodos B1PLOT. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca. Salamanca.
- Villanueva, L. (1991). Compatibilidad de materiales en la construcción. En: Servicios de publicaciones de Colegio de Arquitectos de Madrid (Ed.), *Curso de Patología, conservación y restauración de edificios*. Madrid, 117-129.
- Villar, P., Díez Montes, A., Mediavilla, R. y Sanz Santos, M.A. (2000). Cartografía y Memoria de la Hoja del mapa Geológico de España, Ledesma (Hoja nº 451). En: IGME (Ed.), *MAGNA 50 (2ª serie)*. IGME, Madrid.
- Villar y Macías, M. (1887). *Historia de Salamanca (reed. 1975)*. Librería Cervantes (Ed.), Primera, Salamanca.
- Villaseca, C., Barbero, L. y Herreros, V. (1998). A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* **89**, 113-119.
- Washburn, E.W. (1921). The Dynamics of Capillary Flow. *Physical Review* **17**, 273-283.
- Webster, R.G.M. (1992). *Stonecleaning and the Nature, Soiling and Decay Mechanisms of Stone*. R. G. M. Webster (Ed.), Donhead Publishing. Edinburgh, Scotland.

- Weimberg, R.F., Sial, A.N. y Pessoa, R.R. (2001). Magma flow within the Tavares pluton, northeastern Brazil: Compositional and thermal convection. *Geological Society of America Bulletin* **113**, 508-520.
- Wihr, R. (1976). Deep-Impregnation for Effective Stone-Protection. En: R. Rossi-Manaresi (Ed.), *The Conservation of Stone*, Boloña, 317-318.
- Winkler, E.M. (1973). Stone: Properties, durability in Man's Environment. En: Springer-Verlag (Ed.), *Applied Mineralogy*. Viena, 230.
- Yenes, M., Álvarez, F. y Gutiérrez-Alonso, G. (1999). Granite emplacement in orogenic compressional conditions: the La Alberca-Béjar granitic area (Spanish Central System, Variscan Iberian Belt). *Journal of Structural Geology* **21**, 1419-1440.
- Zoghiami, K. (2003). *Las Areniscas Miocénicas de la formación fortuna utilizadas en la construcción del acueducto romano de Zaghuan-Cartago: Caracterización petrofísica, alterabilidad y ensayos de control de idoneidad de tratamientos de restauración*. Tesis Doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona.

ANEXO

Tabla I. Valores medios (entre paréntesis el número de muestras) de la diferencia de peso y error típico de la media de las tres variedades, C: Vaugneritas de Calzadilla; L: Granito de Los Santos; M: leucogranito de Martinamor, en muestras envejecidas por hielo/deshielo junto con frío/calor (HD), por cristalización de sulfatos (CS) y por hielo/deshielo junto con frío/calor y cristalización de sulfatos (HD/CS), tratadas con los tres productos de conservación (H224, RC70 y RC80) y tratadas y posteriormente envejecidas por HD (H224+HD, RC70+HD y RC80+HD).

| | <i>Los Santos</i> | | <i>Calzadilla</i> | | <i>Martinamor</i> | |
|-----------------------|----------------------------|--|----------------------------|--|----------------------------|--|
| | <i>Media</i> <i>(g)</i> | <i>Error típico</i> σ/\sqrt{N} | <i>Media</i> <i>(g)</i> | <i>Error típico</i> σ/\sqrt{N} | <i>Media</i> <i>(g)</i> | <i>Error típico</i> σ/\sqrt{N} |
| <i>HD (2)</i> | -0,080 | 0,000 | -0,060 | 0,014 | -0,090 | 0,035 |
| <i>H224 (4)</i> | 0,080 | 0,007 | 0,105 | 0,008 | 0,060 | 0,021 |
| <i>RC70 (4)</i> | 0,285 | 0,015 | 0,265 | 0,008 | 0,170 | 0,023 |
| <i>RC80 (4)</i> | 0,290 | 0,015 | 0,265 | 0,011 | 0,190 | 0,025 |
| <i>H224+HD (2)</i> | -0,150 | 0,007 | -0,150 | 0,007 | 0,010 | 0,007 |
| <i>RC70+HD (2)</i> | -0,170 | 0,021 | -0,170 | 0,021 | -0,120 | 0,085 |
| <i>RC80+HD (2)</i> | -0,140 | 0,028 | -0,140 | 0,014 | -0,070 | 0,007 |
| <i>CS (14)</i> | -1,473 | 0,135 | -3,321 | 2,088 | -0,319 | 0,090 |
| <i>CS+HD (2)</i> | -1,590 | 0,007 | -3,690 | 0,071 | -0,300 | 0,020 |
| <i>CS+H224 (4)</i> | 0,160 | 0,014 | 0,195 | 0,015 | | |
| <i>CS+RC70 (4)</i> | 0,447 | 0,011 | 0,505 | 0,082 | | |
| <i>CS+RC80 (4)</i> | 0,525 | 0,008 | 0,685 | 0,053 | | |
| <i>CS+H224+HD (2)</i> | -0,120 | 0,028 | -0,090 | 0,007 | | |
| <i>CS+RC70+HD (2)</i> | -0,315 | 0,032 | -0,380 | 0,057 | | |
| <i>CS+RC80+HD (2)</i> | -0,230 | 0,007 | -0,280 | 0,042 | | |

Tabla II. Valores de las propiedades petrofísicas determinadas al agua para las tres variedades: C: Vaugneritas de Calzadilla; L: Granito de Los Santos; M: leucogranito de Martinamor, en muestras de cantera, envejecidas por hielo/deshielo junto con frío/calor (HD), tratadas con los tres productos de conservación (H224, RC70 y RC80) y tratadas y posteriormente envejecidas por HD (H224+HD, RC70+HD y RC80+HD). Las propiedades petrofísicas son: PL: porosidad libre (%); PT: porosidad total (%); CA: coeficiente de absorción (%); DR: densidad real (g/cm³); DA: densidad aparente (g/cm³); CI: coeficiente de imbibición (%); CAC: coeficiente de absorción capilar (g/cm²s^{1/2}); y permeabilidad (Kg/m²s).

| <i>Denominación</i> | <i>PL</i> | <i>PT</i> | <i>CA</i> | <i>DR</i> | <i>DA</i> | <i>CI</i> | <i>CAC</i> | <i>PERMEABILIDAD</i> |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|----------------------|
| C | 1,41 | 1,56 | 90,64 | 2,75 | 2,71 | 0,53 | 1,66E-04 | 1,53E-07 |
| C | 1,22 | 1,33 | 92,22 | 2,76 | 2,72 | 0,50 | 1,57E-04 | 1,53E-07 |
| C | 1,50 | 1,65 | 90,82 | 2,76 | 2,71 | 0,54 | 1,52E-04 | 1,53E-07 |
| L | 1,42 | 1,70 | 83,96 | 2,70 | 2,65 | 0,58 | 1,53E-04 | 1,91E-07 |
| L | 1,47 | 1,73 | 85,19 | 2,71 | 2,66 | 0,50 | 1,49E-04 | 1,91E-07 |
| L | 1,34 | 1,54 | 86,87 | 2,70 | 2,66 | 0,58 | 1,80E-04 | 1,91E-07 |
| M | 0,75 | 0,75 | 100,00 | 2,64 | 2,62 | 0,25 | 7,42E-05 | 3,58E-07 |
| M | 0,74 | 0,76 | 97,78 | 2,66 | 2,64 | 0,35 | 7,86E-05 | 3,58E-07 |
| M | 0,72 | 0,83 | 87,38 | 2,66 | 2,64 | 0,28 | 6,68E-05 | 3,58E-07 |
| CHD | 1,24 | 1,32 | 93,83 | 2,75 | 2,72 | 0,55 | 1,42E-04 | 2,42E-07 |
| CHD | 0,92 | 0,92 | 100,00 | 2,75 | 2,73 | 0,53 | 9,63E-05 | 2,42E-07 |
| LHD | 1,35 | 1,52 | 88,44 | 2,70 | 2,66 | 0,51 | 1,46E-04 | 2,13E-07 |
| LHD | 1,17 | 1,67 | 70,00 | 2,70 | 2,66 | 0,68 | 1,56E-04 | 2,13E-07 |
| MHD | 0,78 | 0,83 | 93,87 | 2,66 | 2,64 | 0,29 | 7,22E-05 | 2,54E-07 |
| MHD | 0,78 | 0,80 | 96,80 | 2,65 | 2,63 | 0,30 | 7,77E-05 | 2,54E-07 |
| CH224 | 0,53 | 1,21 | 43,59 | 2,74 | 2,71 | 0,19 | 2,51E-05 | 1,36E-07 |
| CH224 | 0,57 | 1,14 | 50,00 | 2,75 | 2,71 | 0,07 | 2,81E-05 | 1,36E-07 |
| LH224 | 0,27 | 1,17 | 23,29 | 2,69 | 2,65 | 0,10 | 1,18E-05 | 1,58E-07 |
| LH224 | 0,35 | 1,30 | 26,83 | 2,69 | 2,65 | 0,09 | 1,57E-05 | 1,58E-07 |
| MH224 | 0,27 | 0,27 | 100,00 | 2,64 | 2,64 | 0,25 | 1,57E-05 | 2,30E-07 |
| MH224 | 0,20 | 0,24 | 85,71 | 2,65 | 2,64 | 0,08 | 1,37E-05 | 2,30E-07 |
| CRC70 | 0,45 | 1,32 | 33,94 | 2,79 | 2,75 | 0,47 | 7,38E-05 | 1,78E-07 |
| CRC70 | 0,50 | 1,42 | 35,03 | 2,75 | 2,71 | 0,48 | 6,55E-05 | 1,78E-07 |
| LRC70 | 0,36 | 1,47 | 24,60 | 2,70 | 2,66 | 0,49 | 5,45E-05 | 2,54E-07 |
| LRC70 | 0,40 | 1,57 | 25,67 | 2,84 | 2,80 | 0,49 | 1,06E-04 | 2,54E-07 |
| MRC70 | 0,23 | 0,27 | 30,11 | 2,66 | 2,64 | 0,27 | 5,11E-05 | 2,25E-07 |
| MRC70 | 0,24 | 0,72 | 32,94 | 2,66 | 2,64 | 0,31 | 3,97E-05 | 2,25E-07 |
| CRC80 | 0,37 | 1,24 | 29,68 | 2,75 | 2,71 | 0,17 | 2,95E-05 | 1,66E-07 |
| CRC80 | 0,27 | 1,14 | 23,36 | 2,75 | 2,72 | 0,20 | 3,76E-05 | 1,66E-07 |
| LRC80 | 0,23 | 1,16 | 20,29 | 2,68 | 2,65 | 0,44 | 1,71E-05 | 1,31E-07 |
| LRC80 | 0,34 | 1,14 | 30,00 | 2,79 | 2,76 | 0,26 | 1,20E-05 | 1,31E-07 |
| MRC80 | 0,14 | 0,21 | 66,67 | 2,65 | 2,64 | 0,15 | 1,40E-05 | 2,70E-07 |
| MRC80 | 0,15 | 0,27 | 56,25 | 2,65 | 2,64 | 0,11 | 1,60E-05 | 2,70E-07 |

| <i>Denominación</i> | <i>PL</i> | <i>PT</i> | <i>CA</i> | <i>DR</i> | <i>DA</i> | <i>CI</i> | <i>CAC</i> | <i>PERMEABILIDAD</i> |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|----------------------|
| CH224+HD | 0,53 | 1,18 | 44,71 | 2,75 | 2,71 | 0,13 | 2,69E-05 | 1,85E-07 |
| CH224+HD | 0,57 | 0,70 | 81,08 | 2,75 | 2,73 | 0,15 | 2,81E-05 | 1,85E-07 |
| LH224+HD | 0,29 | 1,23 | 23,23 | 2,68 | 2,65 | 0,08 | 7,55E-06 | 9,87E-08 |
| LH224+HD | 0,22 | 1,26 | 17,18 | 2,68 | 2,65 | 0,10 | 1,92E-05 | 9,87E-08 |
| MH224+HD | 0,20 | 0,22 | 92,31 | 2,64 | 2,63 | 0,08 | 1,80E-05 | 1,77E-07 |
| MH224+HD | 0,21 | 0,22 | 96,15 | 2,64 | 2,63 | 0,11 | 1,40E-05 | 1,77E-07 |
| CRC70+HD | 0,76 | 1,40 | 54,34 | 2,75 | 2,71 | 0,53 | 6,52E-05 | 1,68E-07 |
| CRC70+HD | 1,15 | 1,27 | 90,45 | 2,75 | 2,72 | 0,46 | 6,49E-05 | 1,68E-07 |
| LRC70+HD | 0,87 | 1,59 | 54,75 | 2,69 | 2,66 | 0,49 | 5,11E-05 | 1,17E-07 |
| LRC70+HD | 0,53 | 1,45 | 36,56 | 2,71 | 2,67 | 0,49 | 4,26E-05 | 1,17E-07 |
| MRC70+HD | 0,74 | 0,75 | 98,94 | 2,65 | 2,63 | 0,27 | 6,09E-05 | 2,46E-07 |
| MRC70+HD | 0,70 | 0,71 | 97,62 | 2,66 | 2,64 | 0,25 | 4,09E-05 | 2,46E-07 |
| CRC80+HD | 0,38 | 1,12 | 33,80 | 2,75 | 2,71 | 0,20 | 2,70E-05 | 1,13E-07 |
| CRC80+HD | 0,38 | 1,17 | 32,65 | 2,75 | 2,71 | 0,21 | 3,14E-05 | 1,13E-07 |
| LRC80+HD | 0,23 | 1,13 | 20,41 | 2,69 | 2,66 | 0,44 | 1,80E-05 | 1,08E-07 |
| LRC80+HD | 0,28 | 1,09 | 25,90 | 2,69 | 2,66 | 0,26 | 1,54E-05 | 1,08E-07 |
| MRC80+HD | 0,18 | 0,22 | 81,48 | 2,64 | 2,64 | 0,14 | 1,77E-05 | 2,27E-07 |
| MRC80+HD | 0,20 | 0,25 | 80,00 | 2,64 | 2,64 | 0,14 | 1,96E-05 | 2,27E-07 |

Tabla III. Valores de las coordenadas cromáticas (L , a , b) y de las velocidades de propagación de ultrasonidos en las tres direcciones del espacio (V_x , V_y , V_z) (m/s) para las tres variedades: C: Vaugneritas de Calzadilla; L: Granito de Los Santos; M: leucogranito de Martinamor, en muestras de cantera envejecidas por hielo/deshielo junto con frío/calor (HD), envejecidas por cristalización de sulfatos (CS) y con envejecimiento combinado por hielo/deshielo junto con frío/calor y cristalización de sulfatos (HD/CS).

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>V_x</i> | <i>V_y</i> | <i>V_z</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| C | 61,12 | -0,42 | 2,08 | 2606,38 | 2566,84 | 2418,60 |
| C | 60,89 | -0,47 | 2,38 | 2606,38 | 2566,84 | 2418,60 |
| C | 61,97 | -0,47 | 1,76 | 2606,38 | 2566,84 | 2418,60 |
| C | 59,22 | -0,44 | 1,75 | 2606,38 | 2566,84 | 2418,60 |
| C | 59,74 | -0,49 | 1,54 | 2606,38 | 2566,84 | 2418,60 |
| C | 60,37 | -0,50 | 1,73 | 2976,19 | 2590,67 | 2525,25 |
| C | 59,82 | -0,51 | 1,35 | 2976,19 | 2590,67 | 2525,25 |
| C | 60,15 | -0,38 | 1,87 | 2976,19 | 2590,67 | 2525,25 |
| C | 58,32 | -0,59 | 1,44 | 2976,19 | 2590,67 | 2525,25 |
| C | 61,76 | -0,44 | 1,91 | 2976,19 | 2590,67 | 2525,25 |
| C | 60,96 | -0,52 | 1,95 | 2824,86 | 2702,70 | 2463,05 |
| C | 60,28 | -0,45 | 1,78 | 2824,86 | 2702,70 | 2463,05 |
| C | 59,50 | -0,44 | 1,48 | 2824,86 | 2702,70 | 2463,05 |
| C | 59,14 | -0,48 | 1,77 | 2824,86 | 2702,70 | 2463,05 |
| C | 63,11 | -0,44 | 1,94 | 2824,86 | 2702,70 | 2463,05 |
| C | 61,17 | -0,46 | 1,88 | 2737,43 | 2670,16 | 2538,07 |
| C | 62,24 | -0,48 | 2,32 | 2737,43 | 2670,16 | 2538,07 |
| C | 61,35 | -0,47 | 2,17 | 2737,43 | 2670,16 | 2538,07 |
| C | 61,10 | -0,57 | 1,52 | 2737,43 | 2670,16 | 2538,07 |
| C | 61,69 | -0,48 | 1,56 | 2737,43 | 2670,16 | 2538,07 |
| C | 61,03 | -0,53 | 1,08 | 3062,50 | 2732,24 | 2232,14 |
| C | 60,49 | -0,42 | 3,61 | 3062,50 | 2732,24 | 2232,14 |
| C | 63,23 | -0,60 | 2,53 | 3062,50 | 2732,24 | 2232,14 |
| C | 62,15 | -0,59 | 2,20 | 3062,50 | 2732,24 | 2232,14 |
| C | 62,37 | -0,44 | 1,23 | 3062,50 | 2732,24 | 2232,14 |
| C | 60,67 | -0,52 | 1,42 | 2969,70 | 2727,27 | 2551,02 |
| C | 61,46 | -0,53 | 1,56 | 2969,70 | 2727,27 | 2551,02 |
| C | 62,03 | -0,52 | 1,86 | 2969,70 | 2727,27 | 2551,02 |
| C | 60,96 | -0,45 | 1,62 | 2969,70 | 2727,27 | 2551,02 |
| C | 61,79 | -0,54 | 1,12 | 2969,70 | 2727,27 | 2551,02 |
| C | 59,99 | -0,45 | 1,56 | 2923,98 | 2631,58 | 2463,05 |
| C | 61,70 | -0,55 | 1,44 | 2923,98 | 2631,58 | 2463,05 |
| C | 61,90 | -0,48 | 1,55 | 2923,98 | 2631,58 | 2463,05 |
| C | 62,09 | -0,54 | 1,83 | 2923,98 | 2631,58 | 2463,05 |
| C | 63,24 | -0,41 | 1,33 | 2923,98 | 2631,58 | 2463,05 |
| C | 60,12 | -0,40 | 1,49 | 2768,36 | 2487,56 | 2450,98 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| C | 61,23 | -0,53 | 1,59 | 2768,36 | 2487,56 | 2450,98 |
| C | 62,28 | -0,45 | 1,80 | 2768,36 | 2487,56 | 2450,98 |
| C | 62,73 | -0,50 | 1,72 | 2768,36 | 2487,56 | 2450,98 |
| C | 62,92 | -0,56 | 1,27 | 2768,36 | 2487,56 | 2450,98 |
| C | 61,51 | -0,41 | 1,18 | 2608,70 | 2525,77 | 2380,95 |
| C | 62,07 | -0,53 | 1,53 | 2608,70 | 2525,77 | 2380,95 |
| C | 62,71 | -0,44 | 1,86 | 2608,70 | 2525,77 | 2380,95 |
| C | 61,16 | -0,49 | 1,79 | 2608,70 | 2525,77 | 2380,95 |
| C | 62,77 | -0,56 | 1,85 | 2608,70 | 2525,77 | 2380,95 |
| C | 60,57 | -0,80 | 0,91 | 3245,03 | 3144,65 | 3137,25 |
| C | 57,61 | -0,50 | 1,58 | 3245,03 | 3144,65 | 3137,25 |
| C | 60,36 | -0,75 | 0,62 | 3245,03 | 3144,65 | 3137,25 |
| C | 60,74 | -0,70 | 0,67 | 3245,03 | 3144,65 | 3137,25 |
| C | 60,10 | -0,83 | 0,66 | 3245,03 | 3144,65 | 3137,25 |
| C | 61,69 | -0,52 | 1,57 | 2816,09 | 2512,82 | 2350,23 |
| C | 61,70 | -0,42 | 1,52 | 2816,09 | 2512,82 | 2350,23 |
| C | 60,72 | -0,54 | 1,42 | 2816,09 | 2512,82 | 2350,23 |
| C | 60,34 | -0,51 | 1,57 | 2816,09 | 2512,82 | 2350,23 |
| C | 61,40 | -0,44 | 1,41 | 2816,09 | 2512,82 | 2350,23 |
| C | 60,34 | -0,47 | 1,54 | 3125,00 | 2982,46 | 2777,78 |
| C | 61,38 | -0,39 | 1,51 | 3125,00 | 2982,46 | 2777,78 |
| C | 61,41 | -0,46 | 1,36 | 3125,00 | 2982,46 | 2777,78 |
| C | 59,79 | -0,27 | 2,48 | 3125,00 | 2982,46 | 2777,78 |
| C | 61,79 | -0,42 | 1,34 | 3125,00 | 2982,46 | 2777,78 |
| C | 61,06 | -0,28 | 2,57 | 2909,09 | 2817,68 | 2762,43 |
| C | 60,67 | -0,56 | 1,46 | 2909,09 | 2817,68 | 2762,43 |
| C | 61,01 | -0,37 | 1,71 | 2909,09 | 2817,68 | 2762,43 |
| C | 61,82 | -0,42 | 1,81 | 2909,09 | 2817,68 | 2762,43 |
| C | 61,59 | -0,52 | 1,58 | 2909,09 | 2817,68 | 2762,43 |
| C | 62,13 | -0,57 | 1,92 | 2873,56 | 2817,68 | 2358,49 |
| C | 62,10 | -0,50 | 1,93 | 2873,56 | 2817,68 | 2358,49 |
| C | 62,65 | -0,54 | 1,40 | 2873,56 | 2817,68 | 2358,49 |
| C | 60,97 | -0,50 | 1,62 | 2873,56 | 2817,68 | 2358,49 |
| C | 61,72 | -0,44 | 2,45 | 2873,56 | 2817,68 | 2358,49 |
| C | 61,45 | -0,51 | 1,33 | 2994,01 | 2688,17 | 2551,02 |
| C | 60,14 | -0,48 | 1,35 | 2994,01 | 2688,17 | 2551,02 |
| C | 60,94 | -0,50 | 1,49 | 2994,01 | 2688,17 | 2551,02 |
| C | 61,27 | -0,47 | 1,70 | 2994,01 | 2688,17 | 2551,02 |
| C | 62,01 | -0,53 | 1,06 | 2994,01 | 2688,17 | 2551,02 |
| C | 59,07 | -0,76 | 0,48 | 3096,77 | 2816,09 | 2760,42 |
| C | 59,69 | -0,75 | 0,43 | 3096,77 | 2816,09 | 2760,42 |
| C | 59,66 | -0,75 | 0,30 | 3096,77 | 2816,09 | 2760,42 |
| C | 58,15 | -0,78 | 0,35 | 3096,77 | 2816,09 | 2760,42 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| C | 59,06 | -0,76 | 0,33 | 3096,77 | 2816,09 | 2760,42 |
| CHD | 57,04 | -0,68 | 1,23 | 2673,80 | 2590,67 | 2336,45 |
| CHD | 58,25 | -0,74 | 1,07 | 2673,80 | 2590,67 | 2336,45 |
| CHD | 58,53 | -0,70 | 0,88 | 2673,80 | 2590,67 | 2336,45 |
| CHD | 57,04 | -0,78 | 0,99 | 2673,80 | 2590,67 | 2336,45 |
| CHD | 57,06 | -0,66 | 1,46 | 2673,80 | 2590,67 | 2336,45 |
| CHD | 60,49 | -0,51 | 1,91 | 3000,00 | 2704,08 | 2692,31 |
| CHD | 59,50 | -0,44 | 1,86 | 3000,00 | 2704,08 | 2692,31 |
| CHD | 59,92 | -0,51 | 2,11 | 3000,00 | 2704,08 | 2692,31 |
| CHD | 60,26 | -0,46 | 2,25 | 3000,00 | 2704,08 | 2692,31 |
| CHD | 90,72 | -0,50 | 1,96 | 3000,00 | 2704,08 | 2692,31 |
| CCS | 53,48 | -0,51 | 4,75 | 2914,29 | 2857,14 | 2651,93 |
| CCS | 57,47 | -0,48 | 4,54 | 2914,29 | 2857,14 | 2651,93 |
| CCS | 54,18 | -0,40 | 4,67 | 2914,29 | 2857,14 | 2651,93 |
| CCS | 57,22 | -0,51 | 4,29 | 2914,29 | 2857,14 | 2651,93 |
| CCS | 55,84 | -0,44 | 3,78 | 2914,29 | 2857,14 | 2651,93 |
| CCS | 53,72 | -0,32 | 5,08 | 3184,71 | 3086,42 | 2737,43 |
| CCS | 54,77 | -0,51 | 4,31 | 3184,71 | 3086,42 | 2737,43 |
| CCS | 53,71 | -0,35 | 5,01 | 3184,71 | 3086,42 | 2737,43 |
| CCS | 56,91 | -0,46 | 4,49 | 3184,71 | 3086,42 | 2737,43 |
| CCS | 54,66 | -0,38 | 6,97 | 3184,71 | 3086,42 | 2737,43 |
| CCS | 55,03 | -0,30 | 4,34 | 3200,00 | 2931,03 | 2840,91 |
| CCS | 52,95 | -0,48 | 4,68 | 3200,00 | 2931,03 | 2840,91 |
| CCS | 56,67 | -0,48 | 4,41 | 3200,00 | 2931,03 | 2840,91 |
| CCS | 55,87 | -0,48 | 4,15 | 3200,00 | 2931,03 | 2840,91 |
| CCS | 57,15 | -0,35 | 3,85 | 3200,00 | 2931,03 | 2840,91 |
| CCS | 55,46 | -0,44 | 4,50 | 3067,48 | 2727,27 | 2717,39 |
| CCS | 52,32 | -0,41 | 4,96 | 3067,48 | 2727,27 | 2717,39 |
| CCS | 53,80 | -0,48 | 4,35 | 3067,48 | 2727,27 | 2717,39 |
| CCS | 55,34 | -0,51 | 4,61 | 3067,48 | 2727,27 | 2717,39 |
| CCS | 55,19 | -0,30 | 4,21 | 3067,48 | 2727,27 | 2717,39 |
| CCS | 56,16 | -0,53 | 4,32 | 3184,71 | 2873,56 | 2873,56 |
| CCS | 52,67 | -0,50 | 4,40 | 3184,71 | 2873,56 | 2873,56 |
| CCS | 55,33 | -0,45 | 4,29 | 3184,71 | 2873,56 | 2873,56 |
| CCS | 59,11 | -0,53 | 4,23 | 3184,71 | 2873,56 | 2873,56 |
| CCS | 53,34 | -0,39 | 4,60 | 3184,71 | 2873,56 | 2873,56 |
| CCS | 55,77 | -0,80 | 2,54 | 3576,64 | 3562,50 | 3424,66 |
| CCS | 54,79 | -0,87 | 2,50 | 3576,64 | 3562,50 | 3424,66 |
| CCS | 53,14 | -0,71 | 2,63 | 3576,64 | 3562,50 | 3424,66 |
| CCS | 53,95 | -0,84 | 2,44 | 3576,64 | 3562,50 | 3424,66 |
| CCS | 53,35 | -0,70 | 2,55 | 3576,64 | 3562,50 | 3424,66 |
| CCS | 55,89 | -0,36 | 3,67 | 3043,48 | 2817,68 | 2525,25 |
| CCS | 54,86 | -0,38 | 4,36 | 3043,48 | 2817,68 | 2525,25 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| CCS | 52,82 | -0,45 | 4,06 | 3043,48 | 2817,68 | 2525,25 |
| CCS | 53,76 | -0,32 | 4,01 | 3043,48 | 2817,68 | 2525,25 |
| CCS | 55,16 | -0,43 | 4,33 | 3043,48 | 2817,68 | 2525,25 |
| CCS | 55,44 | -0,31 | 4,72 | 2727,27 | 2592,59 | 2451,92 |
| CCS | 56,63 | -0,50 | 4,33 | 2727,27 | 2592,59 | 2451,92 |
| CCS | 52,90 | -0,37 | 5,00 | 2727,27 | 2592,59 | 2451,92 |
| CCS | 54,47 | -0,35 | 4,82 | 2727,27 | 2592,59 | 2451,92 |
| CCS | 58,41 | -0,40 | 4,24 | 2727,27 | 2592,59 | 2451,92 |
| CCS | 58,39 | -0,38 | 3,72 | 3333,33 | 2931,03 | 2762,43 |
| CCS | 51,90 | -0,14 | 5,41 | 3333,33 | 2931,03 | 2762,43 |
| CCS | 52,17 | -0,41 | 4,37 | 3333,33 | 2931,03 | 2762,43 |
| CCS | 54,00 | -0,37 | 4,38 | 3333,33 | 2931,03 | 2762,43 |
| CCS | 55,93 | -0,41 | 3,69 | 3333,33 | 2931,03 | 2762,43 |
| CCS | 55,42 | -0,78 | 2,76 | 3402,78 | 3289,47 | 3076,92 |
| CCS | 53,58 | -0,75 | 2,75 | 3402,78 | 3289,47 | 3076,92 |
| CCS | 52,61 | -0,85 | 2,85 | 3402,78 | 3289,47 | 3076,92 |
| CCS | 54,86 | -0,73 | 2,99 | 3402,78 | 3289,47 | 3076,92 |
| CCS | 54,00 | -0,78 | 2,54 | 3402,78 | 3289,47 | 3076,92 |
| CCS | 54,22 | -0,41 | 3,82 | 2941,18 | 2881,36 | 2717,39 |
| CCS | 53,34 | -0,48 | 4,28 | 2941,18 | 2881,36 | 2717,39 |
| CCS | 52,68 | -0,43 | 4,45 | 2941,18 | 2881,36 | 2717,39 |
| CCS | 54,29 | -0,42 | 4,43 | 2941,18 | 2881,36 | 2717,39 |
| CCS | 54,90 | -0,35 | 4,24 | 2941,18 | 2881,36 | 2717,39 |
| CCS | 53,31 | -0,37 | 4,52 | 2727,27 | 2708,33 | 2553,19 |
| CCS | 54,32 | -0,47 | 3,92 | 2727,27 | 2708,33 | 2553,19 |
| CCS | 54,72 | -0,34 | 4,37 | 2727,27 | 2708,33 | 2553,19 |
| CCS | 52,14 | -0,35 | 4,80 | 2727,27 | 2708,33 | 2553,19 |
| CCS | 56,76 | -0,35 | 4,24 | 2727,27 | 2708,33 | 2553,19 |
| CCS | 54,34 | -0,44 | 3,81 | 2774,57 | 2771,74 | 2663,32 |
| CCS | 53,48 | -0,52 | 4,69 | 2774,57 | 2771,74 | 2663,32 |
| CCS | 54,63 | -0,43 | 4,78 | 2774,57 | 2771,74 | 2663,32 |
| CCS | 55,16 | -0,48 | 4,94 | 2774,57 | 2771,74 | 2663,32 |
| CCS | 56,96 | -0,39 | 4,16 | 2774,57 | 2771,74 | 2663,32 |
| CCS | 52,83 | -0,39 | 4,05 | 2642,49 | 2617,80 | 2500,00 |
| CCS | 56,31 | -0,44 | 4,26 | 2642,49 | 2617,80 | 2500,00 |
| CCS | 55,00 | -0,38 | 4,50 | 2642,49 | 2617,80 | 2500,00 |
| CCS | 53,86 | -0,42 | 5,11 | 2642,49 | 2617,80 | 2500,00 |
| CCS | 56,37 | -0,40 | 4,49 | 2642,49 | 2617,80 | 2500,00 |
| CCS | 57,08 | -0,48 | 4,19 | 2777,78 | 2702,70 | 2684,21 |
| CCS | 53,11 | -0,39 | 5,08 | 2777,78 | 2702,70 | 2684,21 |
| CCS | 56,70 | -0,43 | 5,46 | 2777,78 | 2702,70 | 2684,21 |
| CCS | 54,77 | -0,38 | 4,97 | 2777,78 | 2702,70 | 2684,21 |
| CCS | 56,11 | -0,39 | 4,46 | 2777,78 | 2702,70 | 2684,21 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| CCS | 54,61 | -0,44 | 4,54 | 2865,50 | 2793,30 | 2525,25 |
| CCS | 54,56 | -0,48 | 4,26 | 2865,50 | 2793,30 | 2525,25 |
| CCS | 55,97 | -0,49 | 4,62 | 2865,50 | 2793,30 | 2525,25 |
| CCS | 53,54 | -0,41 | 5,49 | 2865,50 | 2793,30 | 2525,25 |
| CCS | 57,65 | -0,47 | 4,06 | 2865,50 | 2793,30 | 2525,25 |
| CCS | 53,87 | -0,40 | 4,15 | 3067,48 | 2969,70 | 2784,09 |
| CCS | 50,32 | -0,43 | 4,18 | 3067,48 | 2969,70 | 2784,09 |
| CCS | 53,20 | -0,52 | 4,63 | 3067,48 | 2969,70 | 2784,09 |
| CCS | 53,10 | -0,46 | 4,54 | 3067,48 | 2969,70 | 2784,09 |
| CCS | 56,43 | -0,48 | 4,39 | 3067,48 | 2969,70 | 2784,09 |
| CHD/CS | 55,84 | -0,53 | 4,06 | 2944,79 | 2897,73 | 2645,50 |
| CHD/CS | 56,00 | -0,44 | 3,86 | 2944,79 | 2897,73 | 2645,50 |
| CHD/CS | 55,65 | -0,54 | 3,83 | 2944,79 | 2897,73 | 2645,50 |
| CHD/CS | 54,26 | -0,45 | 4,02 | 2944,79 | 2897,73 | 2645,50 |
| CHD/CS | 56,52 | -0,29 | 3,43 | 2944,79 | 2897,73 | 2645,50 |
| CHD/CS | 54,08 | -0,19 | 4,28 | 3164,56 | 2947,98 | 2941,18 |
| CHD/CS | 54,75 | -0,60 | 3,81 | 3164,56 | 2947,98 | 2941,18 |
| CHD/CS | 57,35 | -0,45 | 3,88 | 3164,56 | 2947,98 | 2941,18 |
| CHD/CS | 58,08 | -0,44 | 3,93 | 3164,56 | 2947,98 | 2941,18 |
| CHD/CS | 55,31 | -0,37 | 3,21 | 3164,56 | 2947,98 | 2941,18 |
| L | 70,08 | -0,26 | 1,34 | 3720,93 | 3164,56 | 2450,98 |
| L | 68,87 | -0,34 | 1,32 | 3720,93 | 3164,56 | 2450,98 |
| L | 68,33 | -0,31 | 1,58 | 3720,93 | 3164,56 | 2450,98 |
| L | 68,23 | -0,14 | 1,60 | 3720,93 | 3164,56 | 2450,98 |
| L | 68,51 | -0,40 | 1,18 | 3720,93 | 3164,56 | 2450,98 |
| L | 68,37 | -0,33 | 0,33 | 3623,19 | 3164,56 | 2158,59 |
| L | 66,61 | -0,21 | 0,77 | 3623,19 | 3164,56 | 2158,59 |
| L | 68,59 | -0,35 | 0,51 | 3623,19 | 3164,56 | 2158,59 |
| L | 68,41 | -0,19 | 0,94 | 3623,19 | 3164,56 | 2158,59 |
| L | 67,90 | -0,34 | 0,79 | 3623,19 | 3164,56 | 2158,59 |
| L | 68,16 | -0,32 | 1,23 | 3684,21 | 3245,03 | 2551,02 |
| L | 68,66 | -0,37 | 1,13 | 3684,21 | 3245,03 | 2551,02 |
| L | 66,41 | -0,27 | 1,41 | 3684,21 | 3245,03 | 2551,02 |
| L | 67,37 | -0,24 | 1,51 | 3684,21 | 3245,03 | 2551,02 |
| L | 67,55 | -0,43 | 1,18 | 3684,21 | 3245,03 | 2551,02 |
| L | 68,70 | -0,24 | 0,88 | 3472,22 | 3164,56 | 2369,67 |
| L | 68,96 | -0,28 | 0,81 | 3472,22 | 3164,56 | 2369,67 |
| L | 68,94 | -0,24 | 1,55 | 3472,22 | 3164,56 | 2369,67 |
| L | 69,81 | -0,22 | 1,57 | 3472,22 | 3164,56 | 2369,67 |
| L | 67,55 | -0,25 | 0,80 | 3472,22 | 3164,56 | 2369,67 |
| L | 67,70 | -0,22 | 0,83 | 3642,86 | 3202,61 | 2606,38 |
| L | 68,71 | -0,30 | 0,84 | 3642,86 | 3202,61 | 2606,38 |
| L | 67,27 | -0,18 | 0,31 | 3642,86 | 3202,61 | 2606,38 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| L | 66,97 | -0,29 | 0,51 | 3642,86 | 3202,61 | 2606,38 |
| L | 68,17 | -0,28 | 0,06 | 3642,86 | 3202,61 | 2606,38 |
| L | 71,42 | -0,35 | 0,52 | 3164,56 | 3005,78 | 2551,02 |
| L | 68,54 | -0,25 | 0,33 | 3164,56 | 3005,78 | 2551,02 |
| L | 68,56 | -0,23 | 1,40 | 3164,56 | 3005,78 | 2551,02 |
| L | 68,90 | -0,11 | 1,24 | 3164,56 | 3005,78 | 2551,02 |
| L | 68,70 | -0,32 | 0,62 | 3164,56 | 3005,78 | 2551,02 |
| L | 69,98 | -0,27 | 1,09 | 3676,47 | 3521,13 | 2524,75 |
| L | 68,60 | -0,40 | 0,80 | 3676,47 | 3521,13 | 2524,75 |
| L | 69,86 | -0,25 | 0,81 | 3676,47 | 3521,13 | 2524,75 |
| L | 68,07 | -0,17 | 0,82 | 3676,47 | 3521,13 | 2524,75 |
| L | 69,48 | -0,31 | 0,93 | 3676,47 | 3521,13 | 2524,75 |
| L | 69,69 | -0,21 | 0,95 | 3669,06 | 3521,13 | 2437,81 |
| L | 69,76 | -0,21 | 1,06 | 3669,06 | 3521,13 | 2437,81 |
| L | 67,61 | -0,15 | 0,41 | 3669,06 | 3521,13 | 2437,81 |
| L | 68,80 | -0,19 | 0,40 | 3669,06 | 3521,13 | 2437,81 |
| L | 68,71 | -0,31 | 0,34 | 3669,06 | 3521,13 | 2437,81 |
| L | 69,15 | -0,37 | 0,48 | 3722,63 | 3521,13 | 2304,15 |
| L | 68,73 | -0,33 | 0,64 | 3722,63 | 3521,13 | 2304,15 |
| L | 69,68 | -0,36 | 0,55 | 3722,63 | 3521,13 | 2304,15 |
| L | 68,44 | -0,23 | 0,58 | 3722,63 | 3521,13 | 2304,15 |
| L | 70,14 | -0,26 | 1,46 | 3722,63 | 3521,13 | 2304,15 |
| L | 67,67 | -0,34 | 1,32 | 4032,26 | 3311,26 | 2463,77 |
| L | 68,89 | -0,34 | 1,38 | 4032,26 | 3311,26 | 2463,77 |
| L | 68,99 | -0,16 | 1,99 | 4032,26 | 3311,26 | 2463,77 |
| L | 68,63 | -0,26 | 1,32 | 4032,26 | 3311,26 | 2463,77 |
| L | 69,32 | -0,29 | 0,95 | 4032,26 | 3311,26 | 2463,77 |
| L | 71,05 | -0,25 | 1,20 | 3445,95 | 3205,13 | 2283,11 |
| L | 66,47 | -0,12 | 0,70 | 3445,95 | 3205,13 | 2283,11 |
| L | 68,87 | -0,35 | 1,11 | 3445,95 | 3205,13 | 2283,11 |
| L | 69,20 | -0,22 | 1,51 | 3445,95 | 3205,13 | 2283,11 |
| L | 69,44 | -0,35 | 0,54 | 3445,95 | 3205,13 | 2283,11 |
| L | 69,67 | -0,27 | 0,60 | 3521,13 | 3311,26 | 2538,86 |
| L | 68,59 | -0,28 | 0,83 | 3521,13 | 3311,26 | 2538,86 |
| L | 69,52 | -0,32 | 0,39 | 3521,13 | 3311,26 | 2538,86 |
| L | 66,33 | -0,28 | 0,57 | 3521,13 | 3311,26 | 2538,86 |
| L | 69,10 | -0,22 | 0,11 | 3521,13 | 3311,26 | 2538,86 |
| L | 70,13 | -0,32 | 0,56 | 2969,70 | 2762,43 | 2702,70 |
| L | 68,54 | -0,25 | 0,52 | 2969,70 | 2762,43 | 2702,70 |
| L | 66,15 | -0,33 | 0,93 | 2969,70 | 2762,43 | 2702,70 |
| L | 69,44 | -0,40 | 1,04 | 2969,70 | 2762,43 | 2702,70 |
| L | 68,95 | -0,30 | 1,25 | 2969,70 | 2762,43 | 2702,70 |
| L | 70,59 | -0,30 | 1,55 | 2931,03 | 2762,43 | 2358,49 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| L | 68,10 | -0,12 | 1,78 | 2931,03 | 2762,43 | 2358,49 |
| L | 69,03 | -0,37 | 0,94 | 2931,03 | 2762,43 | 2358,49 |
| L | 70,45 | -0,21 | 1,10 | 2931,03 | 2762,43 | 2358,49 |
| L | 69,02 | -0,32 | 0,99 | 2931,03 | 2762,43 | 2358,49 |
| L | 68,50 | -0,34 | 0,32 | 3546,10 | 2833,33 | 2096,07 |
| L | 67,78 | -0,27 | 0,42 | 3546,10 | 2833,33 | 2096,07 |
| L | 69,05 | -0,17 | 0,69 | 3546,10 | 2833,33 | 2096,07 |
| L | 69,42 | -0,20 | 0,72 | 3546,10 | 2833,33 | 2096,07 |
| L | 68,26 | -0,18 | 1,19 | 3546,10 | 2833,33 | 2096,07 |
| L | 69,78 | -0,18 | 1,37 | 3529,41 | 3144,65 | 2268,52 |
| L | 68,08 | -0,21 | 1,12 | 3529,41 | 3144,65 | 2268,52 |
| L | 70,77 | -0,23 | 1,01 | 3529,41 | 3144,65 | 2268,52 |
| L | 66,53 | -0,29 | 0,77 | 3529,41 | 3144,65 | 2268,52 |
| L | 68,82 | -0,28 | 1,10 | 3529,41 | 3144,65 | 2268,52 |
| LHD | 67,84 | -0,40 | 1,16 | 3355,70 | 2786,89 | 1983,47 |
| LHD | 67,13 | -0,33 | 1,40 | 3355,70 | 2786,89 | 1983,47 |
| LHD | 68,16 | -0,21 | 1,50 | 3355,70 | 2786,89 | 1983,47 |
| LHD | 68,58 | -0,28 | 1,50 | 3355,70 | 2786,89 | 1983,47 |
| LHD | 67,18 | -0,31 | 2,33 | 3355,70 | 2786,89 | 1983,47 |
| LHD | 69,21 | -0,23 | 2,23 | 3582,09 | 2786,89 | 2076,27 |
| LHD | 67,29 | -0,23 | 2,09 | 3582,09 | 2786,89 | 2076,27 |
| LHD | 69,55 | -0,25 | 1,85 | 3582,09 | 2786,89 | 2076,27 |
| LHD | 65,75 | -0,30 | 1,67 | 3582,09 | 2786,89 | 2076,27 |
| LHD | 67,38 | -0,31 | 2,30 | 3582,09 | 2786,89 | 2076,27 |
| LCS | 60,08 | -0,19 | 2,92 | 3144,65 | 3000,00 | 2262,44 |
| LCS | 60,35 | -0,21 | 2,86 | 3144,65 | 3000,00 | 2262,44 |
| LCS | 61,11 | -0,36 | 2,86 | 3144,65 | 3000,00 | 2262,44 |
| LCS | 60,33 | -0,24 | 3,08 | 3144,65 | 3000,00 | 2262,44 |
| LCS | 64,69 | -0,26 | 3,74 | 3144,65 | 3000,00 | 2262,44 |
| LCS | 62,21 | -0,16 | 2,45 | 3148,15 | 2762,43 | 2293,58 |
| LCS | 61,29 | -0,25 | 3,01 | 3148,15 | 2762,43 | 2293,58 |
| LCS | 60,56 | -0,21 | 2,73 | 3148,15 | 2762,43 | 2293,58 |
| LCS | 62,23 | -0,23 | 3,95 | 3148,15 | 2762,43 | 2293,58 |
| LCS | 63,16 | -0,13 | 3,05 | 3148,15 | 2762,43 | 2293,58 |
| LCS | 66,48 | -0,50 | 3,00 | 2914,29 | 2890,17 | 2173,91 |
| LCS | 62,73 | -0,16 | 2,77 | 2914,29 | 2890,17 | 2173,91 |
| LCS | 61,83 | -0,26 | 2,94 | 2914,29 | 2890,17 | 2173,91 |
| LCS | 64,36 | -0,16 | 3,01 | 2914,29 | 2890,17 | 2173,91 |
| LCS | 63,57 | -0,39 | 2,26 | 2914,29 | 2890,17 | 2173,91 |
| LCS | 64,42 | -0,08 | 4,12 | 3291,93 | 2840,91 | 2050,21 |
| LCS | 65,81 | -0,57 | 3,26 | 3291,93 | 2840,91 | 2050,21 |
| LCS | 63,37 | -0,23 | 3,13 | 3291,93 | 2840,91 | 2050,21 |
| LCS | 60,50 | -0,17 | 3,35 | 3291,93 | 2840,91 | 2050,21 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| LCS | 63,27 | -0,21 | 3,22 | 3291,93 | 2840,91 | 2050,21 |
| LCS | 62,00 | -0,31 | 2,97 | 3167,70 | 2941,18 | 2300,88 |
| LCS | 62,00 | -0,27 | 2,30 | 3167,70 | 2941,18 | 2300,88 |
| LCS | 63,24 | -0,23 | 3,24 | 3167,70 | 2941,18 | 2300,88 |
| LCS | 64,31 | -0,23 | 3,21 | 3167,70 | 2941,18 | 2300,88 |
| LCS | 61,96 | -0,14 | 3,59 | 3167,70 | 2941,18 | 2300,88 |
| LCS | 63,46 | -0,16 | 2,94 | 3378,38 | 3048,78 | 2500,00 |
| LCS | 65,27 | -0,37 | 2,83 | 3378,38 | 3048,78 | 2500,00 |
| LCS | 61,60 | -0,27 | 3,23 | 3378,38 | 3048,78 | 2500,00 |
| LCS | 61,18 | -0,07 | 3,62 | 3378,38 | 3048,78 | 2500,00 |
| LCS | 63,45 | -0,18 | 2,72 | 3378,38 | 3048,78 | 2500,00 |
| LCS | 63,52 | -0,21 | 2,99 | 3269,23 | 2873,56 | 2577,32 |
| LCS | 60,52 | -0,23 | 3,28 | 3269,23 | 2873,56 | 2577,32 |
| LCS | 65,20 | -0,35 | 3,47 | 3269,23 | 2873,56 | 2577,32 |
| LCS | 63,03 | -0,14 | 3,84 | 3269,23 | 2873,56 | 2577,32 |
| LCS | 63,14 | -0,13 | 3,36 | 3269,23 | 2873,56 | 2577,32 |
| LCS | 59,65 | -0,22 | 2,83 | 3377,48 | 3012,05 | 2074,69 |
| LCS | 63,51 | -0,17 | 2,68 | 3377,48 | 3012,05 | 2074,69 |
| LCS | 65,45 | -0,26 | 4,15 | 3377,48 | 3012,05 | 2074,69 |
| LCS | 63,29 | -0,15 | 3,82 | 3377,48 | 3012,05 | 2074,69 |
| LCS | 63,30 | -0,25 | 2,90 | 3377,48 | 3012,05 | 2074,69 |
| LCS | 66,08 | -0,24 | 2,31 | 3355,70 | 3227,85 | 2645,50 |
| LCS | 63,46 | -0,09 | 3,43 | 3355,70 | 3227,85 | 2645,50 |
| LCS | 62,61 | -0,23 | 3,17 | 3355,70 | 3227,85 | 2645,50 |
| LCS | 60,51 | -0,16 | 2,83 | 3355,70 | 3227,85 | 2645,50 |
| LCS | 62,78 | -0,28 | 2,59 | 3355,70 | 3227,85 | 2645,50 |
| LCS | 61,03 | -0,17 | 2,66 | 3424,66 | 3144,65 | 2575,76 |
| LCS | 60,61 | -0,15 | 2,57 | 3424,66 | 3144,65 | 2575,76 |
| LCS | 61,75 | -0,13 | 3,17 | 3424,66 | 3144,65 | 2575,76 |
| LCS | 60,93 | -0,19 | 3,04 | 3424,66 | 3144,65 | 2575,76 |
| LCS | 65,35 | -0,22 | 2,57 | 3424,66 | 3144,65 | 2575,76 |
| LCS | 59,82 | -0,25 | 2,20 | 3290,32 | 3267,97 | 2552,08 |
| LCS | 60,87 | -0,08 | 2,95 | 3290,32 | 3267,97 | 2552,08 |
| LCS | 63,13 | -0,15 | 3,68 | 3290,32 | 3267,97 | 2552,08 |
| LCS | 65,84 | -0,23 | 3,33 | 3290,32 | 3267,97 | 2552,08 |
| LCS | 63,73 | -0,19 | 2,60 | 3290,32 | 3267,97 | 2552,08 |
| LCS | 62,32 | -0,10 | 2,65 | 3472,22 | 2994,01 | 2670,16 |
| LCS | 64,21 | -0,19 | 2,45 | 3472,22 | 2994,01 | 2670,16 |
| LCS | 61,02 | -0,28 | 2,76 | 3472,22 | 2994,01 | 2670,16 |
| LCS | 61,94 | -0,20 | 2,85 | 3472,22 | 2994,01 | 2670,16 |
| LCS | 62,48 | -0,21 | 2,41 | 3472,22 | 2994,01 | 2670,16 |
| LCS | 62,54 | -0,13 | 1,93 | 3424,66 | 2659,57 | 2487,31 |
| LCS | 62,02 | -0,24 | 2,70 | 3424,66 | 2659,57 | 2487,31 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| LCS | 64,82 | -0,18 | 3,31 | 3424,66 | 2659,57 | 2487,31 |
| LCS | 63,08 | -0,09 | 3,30 | 3424,66 | 2659,57 | 2487,31 |
| LCS | 61,30 | -0,14 | 2,28 | 3424,66 | 2659,57 | 2487,31 |
| LCS | 61,82 | -0,17 | 2,51 | 3472,22 | 3472,22 | 2369,67 |
| LCS | 63,11 | -0,18 | 2,18 | 3472,22 | 3472,22 | 2369,67 |
| LCS | 62,10 | -0,18 | 2,93 | 3472,22 | 3472,22 | 2369,67 |
| LCS | 61,40 | -0,30 | 2,97 | 3472,22 | 3472,22 | 2369,67 |
| LCS | 63,04 | -0,30 | 2,39 | 3472,22 | 3472,22 | 2369,67 |
| LCS | 60,58 | -0,21 | 2,15 | 3291,14 | 3105,59 | 2344,50 |
| LCS | 62,33 | -0,20 | 3,59 | 3291,14 | 3105,59 | 2344,50 |
| LCS | 63,07 | -0,11 | 3,75 | 3291,14 | 3105,59 | 2344,50 |
| LCS | 63,42 | -0,19 | 3,15 | 3291,14 | 3105,59 | 2344,50 |
| LCS | 62,30 | -0,21 | 3,48 | 3291,14 | 3105,59 | 2344,50 |
| LCS | 64,37 | -0,19 | 2,74 | 3289,47 | 3012,05 | 2355,77 |
| LCS | 65,89 | -0,20 | 2,65 | 3289,47 | 3012,05 | 2355,77 |
| LCS | 64,28 | -0,34 | 2,96 | 3289,47 | 3012,05 | 2355,77 |
| LCS | 60,35 | -0,14 | 3,28 | 3289,47 | 3012,05 | 2355,77 |
| LCS | 63,69 | -0,30 | 2,30 | 3289,47 | 3012,05 | 2355,77 |
| LCS | 65,64 | -0,46 | 3,08 | 3248,41 | 3125,00 | 2272,73 |
| LCS | 63,71 | -0,10 | 4,01 | 3248,41 | 3125,00 | 2272,73 |
| LCS | 62,80 | -0,24 | 3,44 | 3248,41 | 3125,00 | 2272,73 |
| LCS | 61,83 | -0,07 | 3,52 | 3248,41 | 3125,00 | 2272,73 |
| LCS | 63,95 | -0,28 | 3,19 | 3248,41 | 3125,00 | 2272,73 |
| LHD/CS | 63,75 | -0,31 | 2,11 | 3269,23 | 3246,75 | 2538,07 |
| LHD/CS | 62,84 | -0,27 | 2,09 | 3269,23 | 3246,75 | 2538,07 |
| LHD/CS | 62,35 | -0,27 | 2,43 | 3269,23 | 3246,75 | 2538,07 |
| LHD/CS | 65,39 | -0,36 | 2,31 | 3269,23 | 3246,75 | 2538,07 |
| LHD/CS | 64,83 | -0,25 | 2,62 | 3269,23 | 3246,75 | 2538,07 |
| LHD/CS | 65,82 | -0,25 | 2,63 | 3546,10 | 3246,75 | 2628,87 |
| LHD/CS | 63,82 | -0,14 | 3,24 | 3546,10 | 3246,75 | 2628,87 |
| LHD/CS | 62,72 | -0,43 | 2,38 | 3546,10 | 3246,75 | 2628,87 |
| LHD/CS | 64,18 | -0,20 | 2,92 | 3546,10 | 3246,75 | 2628,87 |
| LHD/CS | 64,50 | -0,23 | 3,22 | 3546,10 | 3246,75 | 2628,87 |
| M | 66,29 | -0,23 | 0,40 | 3809,52 | 3500,00 | 3475,18 |
| M | 67,97 | -0,12 | 0,55 | 3809,52 | 3500,00 | 3475,18 |
| M | 66,27 | -0,16 | 0,43 | 3809,52 | 3500,00 | 3475,18 |
| M | 65,61 | -0,18 | 0,31 | 3809,52 | 3500,00 | 3475,18 |
| M | 65,32 | -0,18 | 0,26 | 3809,52 | 3500,00 | 3475,18 |
| M | 66,43 | -0,23 | 0,17 | 3951,61 | 3750,00 | 2987,80 |
| M | 66,03 | -0,18 | 0,00 | 3951,61 | 3750,00 | 2987,80 |
| M | 66,81 | -0,14 | 0,22 | 3951,61 | 3750,00 | 2987,80 |
| M | 67,95 | -0,18 | 0,39 | 3951,61 | 3750,00 | 2987,80 |
| M | 66,53 | -0,27 | -0,18 | 3951,61 | 3750,00 | 2987,80 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| M | 66,76 | -0,11 | 0,80 | 3983,74 | 3649,64 | 3521,13 |
| M | 66,69 | -0,12 | 0,50 | 3983,74 | 3649,64 | 3521,13 |
| M | 68,07 | 0,00 | 0,66 | 3983,74 | 3649,64 | 3521,13 |
| M | 66,73 | -0,16 | 1,31 | 3983,74 | 3649,64 | 3521,13 |
| M | 65,95 | -0,11 | 0,80 | 3983,74 | 3649,64 | 3521,13 |
| M | 67,86 | -0,07 | 0,78 | 3712,12 | 3676,47 | 3496,50 |
| M | 67,66 | -0,17 | 0,51 | 3712,12 | 3676,47 | 3496,50 |
| M | 65,09 | -0,12 | 0,66 | 3712,12 | 3676,47 | 3496,50 |
| M | 66,27 | -0,18 | 0,51 | 3712,12 | 3676,47 | 3496,50 |
| M | 66,18 | -0,19 | 0,56 | 3712,12 | 3676,47 | 3496,50 |
| M | 68,12 | -0,09 | 0,05 | 3684,21 | 3550,72 | 3311,26 |
| M | 66,31 | -0,12 | -0,43 | 3684,21 | 3550,72 | 3311,26 |
| M | 66,75 | -0,14 | 0,11 | 3684,21 | 3550,72 | 3311,26 |
| M | 65,48 | -0,17 | 0,18 | 3684,21 | 3550,72 | 3311,26 |
| M | 67,67 | -0,13 | 0,23 | 3684,21 | 3550,72 | 3311,26 |
| M | 66,04 | -0,06 | 0,63 | 3870,97 | 3636,36 | 3623,19 |
| M | 65,82 | -0,11 | 0,44 | 3870,97 | 3636,36 | 3623,19 |
| M | 65,58 | -0,12 | 0,52 | 3870,97 | 3636,36 | 3623,19 |
| M | 63,02 | -0,33 | 0,44 | 3870,97 | 3636,36 | 3623,19 |
| M | 68,57 | -0,13 | 0,54 | 3870,97 | 3636,36 | 3623,19 |
| M | 66,60 | -0,20 | 0,28 | 3712,12 | 3496,50 | 3356,64 |
| M | 67,44 | -0,11 | 0,48 | 3712,12 | 3496,50 | 3356,64 |
| M | 65,85 | -0,17 | 0,31 | 3712,12 | 3496,50 | 3356,64 |
| M | 67,29 | -0,20 | 0,07 | 3712,12 | 3496,50 | 3356,64 |
| M | 69,10 | -0,23 | 0,01 | 3712,12 | 3496,50 | 3356,64 |
| M | 67,36 | -0,10 | 0,70 | 4000,00 | 3566,43 | 3404,26 |
| M | 65,80 | -0,09 | 1,05 | 4000,00 | 3566,43 | 3404,26 |
| M | 66,75 | -0,20 | 0,24 | 4000,00 | 3566,43 | 3404,26 |
| M | 65,90 | -0,17 | 0,09 | 4000,00 | 3566,43 | 3404,26 |
| M | 67,59 | -0,18 | 0,08 | 4000,00 | 3566,43 | 3404,26 |
| M | 67,35 | -0,17 | 0,30 | 4000,00 | 3712,12 | 3525,18 |
| M | 68,05 | -0,14 | 0,47 | 4000,00 | 3712,12 | 3525,18 |
| M | 65,57 | -0,16 | 0,51 | 4000,00 | 3712,12 | 3525,18 |
| M | 66,90 | -0,24 | 0,11 | 4000,00 | 3712,12 | 3525,18 |
| M | 66,22 | -0,25 | 0,11 | 4000,00 | 3712,12 | 3525,18 |
| M | 65,38 | -0,19 | 0,20 | 3809,52 | 3550,72 | 3496,50 |
| M | 66,28 | -0,13 | 0,19 | 3809,52 | 3550,72 | 3496,50 |
| M | 66,26 | -0,28 | 0,04 | 3809,52 | 3550,72 | 3496,50 |
| M | 66,89 | -0,20 | 0,22 | 3809,52 | 3550,72 | 3496,50 |
| M | 68,14 | -0,15 | 0,36 | 3809,52 | 3550,72 | 3496,50 |
| M | 66,92 | -0,18 | 0,34 | 3902,44 | 3769,23 | 3664,12 |
| M | 67,28 | -0,15 | 0,41 | 3902,44 | 3769,23 | 3664,12 |
| M | 66,47 | -0,14 | 0,98 | 3902,44 | 3769,23 | 3664,12 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| M | 69,17 | -0,10 | 1,34 | 3902,44 | 3769,23 | 3664,12 |
| M | 66,72 | -0,09 | 0,88 | 3902,44 | 3769,23 | 3664,12 |
| M | 67,47 | -0,12 | 0,64 | 3840,00 | 3525,18 | 3333,33 |
| M | 65,52 | 0,01 | 0,68 | 3840,00 | 3525,18 | 3333,33 |
| M | 65,83 | -0,19 | 0,38 | 3840,00 | 3525,18 | 3333,33 |
| M | 66,32 | -0,22 | 0,18 | 3840,00 | 3525,18 | 3333,33 |
| M | 66,70 | -0,15 | 0,19 | 3840,00 | 3525,18 | 3333,33 |
| M | 66,99 | -0,20 | 0,14 | 3858,27 | 3602,94 | 3448,28 |
| M | 66,49 | -0,20 | -0,19 | 3858,27 | 3602,94 | 3448,28 |
| M | 66,82 | -0,24 | -0,12 | 3858,27 | 3602,94 | 3448,28 |
| M | 66,53 | -0,23 | -0,22 | 3858,27 | 3602,94 | 3448,28 |
| M | 68,20 | -0,13 | 0,29 | 3858,27 | 3602,94 | 3448,28 |
| M | 67,00 | -0,23 | 0,05 | 3740,46 | 3550,72 | 3453,24 |
| M | 66,37 | -0,22 | -0,15 | 3740,46 | 3550,72 | 3453,24 |
| M | 66,41 | -0,10 | 1,02 | 3740,46 | 3550,72 | 3453,24 |
| M | 69,13 | -0,11 | 0,66 | 3740,46 | 3550,72 | 3453,24 |
| M | 66,02 | -0,18 | -0,01 | 3740,46 | 3550,72 | 3453,24 |
| M | 67,56 | -0,19 | -0,16 | 3664,12 | 3602,94 | 3424,66 |
| M | 65,76 | -0,24 | -0,03 | 3664,12 | 3602,94 | 3424,66 |
| M | 66,78 | -0,19 | 0,52 | 3664,12 | 3602,94 | 3424,66 |
| M | 67,40 | -0,16 | 0,83 | 3664,12 | 3602,94 | 3424,66 |
| M | 66,22 | -0,20 | 0,27 | 3664,12 | 3602,94 | 3424,66 |
| M | 68,15 | -0,08 | 0,36 | 3951,61 | 3684,21 | 3550,72 |
| M | 66,72 | -0,14 | 0,21 | 3951,61 | 3684,21 | 3550,72 |
| M | 66,00 | -0,11 | -0,18 | 3951,61 | 3684,21 | 3550,72 |
| M | 67,07 | -0,16 | -0,04 | 3951,61 | 3684,21 | 3550,72 |
| M | 65,88 | -0,20 | 0,05 | 3951,61 | 3684,21 | 3550,72 |
| M | 66,77 | -0,14 | -0,13 | 3902,44 | 3571,43 | 3469,39 |
| M | 65,39 | -0,15 | -0,09 | 3902,44 | 3571,43 | 3469,39 |
| M | 67,44 | -0,16 | 0,81 | 3902,44 | 3571,43 | 3469,39 |
| M | 64,21 | -0,12 | 0,53 | 3902,44 | 3571,43 | 3469,39 |
| M | 66,67 | -0,20 | -0,03 | 3902,44 | 3571,43 | 3469,39 |
| M | 65,98 | -0,10 | 0,57 | 3983,74 | 3720,93 | 3602,94 |
| M | 66,41 | -0,13 | 0,58 | 3983,74 | 3720,93 | 3602,94 |
| M | 67,44 | -0,16 | 0,22 | 3983,74 | 3720,93 | 3602,94 |
| M | 65,97 | -0,13 | 0,35 | 3983,74 | 3720,93 | 3602,94 |
| M | 66,93 | -0,05 | 1,11 | 3983,74 | 3720,93 | 3602,94 |
| M | 67,50 | -0,16 | 0,52 | 3779,53 | 3684,21 | 3576,64 |
| M | 66,32 | -0,21 | 0,91 | 3779,53 | 3684,21 | 3576,64 |
| M | 67,45 | -0,13 | 1,52 | 3779,53 | 3684,21 | 3576,64 |
| M | 67,52 | -0,19 | 1,38 | 3779,53 | 3684,21 | 3576,64 |
| M | 66,06 | -0,25 | 1,17 | 3779,53 | 3684,21 | 3576,64 |
| M | 66,09 | -0,13 | -0,07 | 3920,00 | 3703,70 | 3597,12 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| M | 66,53 | -0,21 | 0,25 | 3920,00 | 3703,70 | 3597,12 |
| M | 65,55 | -0,14 | 0,55 | 3920,00 | 3703,70 | 3597,12 |
| M | 67,48 | -0,16 | 0,61 | 3920,00 | 3703,70 | 3597,12 |
| M | 66,91 | -0,19 | 0,41 | 3920,00 | 3703,70 | 3597,12 |
| M | 65,48 | -0,15 | 0,14 | 3828,13 | 3623,19 | 3402,78 |
| M | 67,19 | -0,17 | 0,47 | 3828,13 | 3623,19 | 3402,78 |
| M | 66,53 | -0,20 | 0,04 | 3828,13 | 3623,19 | 3402,78 |
| M | 66,76 | -0,17 | 0,17 | 3828,13 | 3623,19 | 3402,78 |
| M | 67,60 | -0,10 | 0,66 | 3828,13 | 3623,19 | 3402,78 |
| M | 66,34 | -0,14 | 0,78 | 3779,53 | 3493,15 | 3205,13 |
| M | 67,00 | -0,09 | 0,67 | 3779,53 | 3493,15 | 3205,13 |
| M | 67,32 | -0,20 | -0,10 | 3779,53 | 3493,15 | 3205,13 |
| M | 37,09 | -0,22 | 0,15 | 3779,53 | 3493,15 | 3205,13 |
| M | 65,31 | -0,20 | 0,19 | 3779,53 | 3493,15 | 3205,13 |
| M | 66,45 | -0,21 | 0,37 | 3934,43 | 3546,10 | 3426,57 |
| M | 65,75 | -0,20 | 0,40 | 3934,43 | 3546,10 | 3426,57 |
| M | 67,41 | -0,12 | 0,83 | 3934,43 | 3546,10 | 3426,57 |
| M | 66,95 | -0,14 | 0,62 | 3934,43 | 3546,10 | 3426,57 |
| M | 65,69 | -0,20 | 0,42 | 3934,43 | 3546,10 | 3426,57 |
| M | 67,32 | -0,19 | 1,01 | 3870,97 | 3550,72 | 3402,78 |
| M | 66,94 | -0,09 | 0,60 | 3870,97 | 3550,72 | 3402,78 |
| M | 66,66 | -0,20 | -0,01 | 3870,97 | 3550,72 | 3402,78 |
| M | 66,17 | -0,26 | 0,46 | 3870,97 | 3550,72 | 3402,78 |
| M | 65,38 | -0,20 | 0,76 | 3870,97 | 3550,72 | 3402,78 |
| M | 66,16 | -0,12 | 1,06 | 3759,40 | 3649,64 | 3378,38 |
| M | 67,50 | -0,15 | 0,42 | 3759,40 | 3649,64 | 3378,38 |
| M | 67,73 | -0,21 | 0,34 | 3759,40 | 3649,64 | 3378,38 |
| M | 65,50 | -0,08 | 0,63 | 3759,40 | 3649,64 | 3378,38 |
| M | 67,77 | -0,10 | 1,09 | 3759,40 | 3649,64 | 3378,38 |
| M | 67,05 | -0,18 | 0,19 | 3787,88 | 3424,66 | 2875,00 |
| M | 65,41 | -0,13 | 0,71 | 3787,88 | 3424,66 | 2875,00 |
| M | 66,43 | -0,12 | 0,91 | 3787,88 | 3424,66 | 2875,00 |
| M | 67,71 | -0,09 | 0,91 | 3787,88 | 3424,66 | 2875,00 |
| M | 66,16 | -0,22 | 0,62 | 3787,88 | 3424,66 | 2875,00 |
| M | 66,83 | -0,21 | 0,24 | 3828,13 | 3428,57 | 3401,36 |
| M | 67,96 | -0,16 | 0,11 | 3828,13 | 3428,57 | 3401,36 |
| M | 67,10 | -0,15 | 0,95 | 3828,13 | 3428,57 | 3401,36 |
| M | 66,32 | -0,13 | 0,94 | 3828,13 | 3428,57 | 3401,36 |
| M | 64,63 | -0,15 | 0,49 | 3828,13 | 3428,57 | 3401,36 |
| M | 66,05 | -0,21 | 0,31 | 3809,52 | 3629,63 | 3500,00 |
| M | 67,16 | -0,09 | 1,06 | 3809,52 | 3629,63 | 3500,00 |
| M | 66,28 | -0,22 | 0,18 | 3809,52 | 3629,63 | 3500,00 |
| M | 67,78 | -0,22 | -0,08 | 3809,52 | 3629,63 | 3500,00 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| M | 67,29 | -0,23 | 0,04 | 3809,52 | 3629,63 | 3500,00 |
| M | 65,94 | -0,24 | 0,28 | 3902,44 | 3378,38 | 3472,22 |
| M | 65,84 | -0,20 | 0,14 | 3902,44 | 3378,38 | 3472,22 |
| M | 65,37 | -0,16 | 0,50 | 3902,44 | 3378,38 | 3472,22 |
| M | 65,80 | -0,23 | 0,43 | 3902,44 | 3378,38 | 3472,22 |
| M | 67,75 | -0,17 | 1,08 | 3902,44 | 3378,38 | 3472,22 |
| M | 66,48 | -0,24 | -0,04 | 3798,45 | 3576,64 | 3550,72 |
| M | 67,44 | -0,26 | -0,23 | 3798,45 | 3576,64 | 3550,72 |
| M | 67,93 | -0,21 | 0,50 | 3798,45 | 3576,64 | 3550,72 |
| M | 67,18 | -0,24 | 0,37 | 3798,45 | 3576,64 | 3550,72 |
| M | 66,90 | -0,23 | 0,09 | 3798,45 | 3576,64 | 3550,72 |
| M | 66,83 | -0,23 | 0,23 | 3692,31 | 3401,36 | 3400,00 |
| M | 65,85 | -0,24 | 0,18 | 3692,31 | 3401,36 | 3400,00 |
| M | 65,07 | -0,25 | 0,44 | 3692,31 | 3401,36 | 3400,00 |
| M | 67,63 | -0,21 | 0,43 | 3692,31 | 3401,36 | 3400,00 |
| M | 67,54 | -0,30 | -0,35 | 3692,31 | 3401,36 | 3400,00 |
| M | 66,19 | -0,25 | 0,12 | 3750,00 | 3576,64 | 3356,16 |
| M | 64,77 | -0,16 | 0,21 | 3750,00 | 3576,64 | 3356,16 |
| M | 66,09 | -0,30 | 0,09 | 3750,00 | 3576,64 | 3356,16 |
| M | 66,97 | -0,27 | -0,08 | 3750,00 | 3576,64 | 3356,16 |
| M | 67,58 | -0,20 | 0,60 | 3750,00 | 3576,64 | 3356,16 |
| M | 66,63 | -0,29 | 0,03 | 3902,44 | 3450,70 | 3178,81 |
| M | 66,67 | -0,28 | 0,08 | 3902,44 | 3450,70 | 3178,81 |
| M | 67,30 | -0,19 | 0,94 | 3902,44 | 3450,70 | 3178,81 |
| M | 65,88 | -0,21 | 0,50 | 3902,44 | 3450,70 | 3178,81 |
| M | 67,37 | -0,28 | -0,22 | 3902,44 | 3450,70 | 3178,81 |
| M | 66,79 | -0,09 | -0,01 | 3870,97 | 3550,72 | 3289,47 |
| M | 66,37 | -0,17 | 0,18 | 3870,97 | 3550,72 | 3289,47 |
| M | 67,37 | -0,16 | 0,64 | 3870,97 | 3550,72 | 3289,47 |
| M | 67,08 | -0,07 | 0,64 | 3870,97 | 3550,72 | 3289,47 |
| M | 66,86 | -0,20 | 0,18 | 3870,97 | 3550,72 | 3289,47 |
| M | 64,37 | -0,25 | 1,48 | 4117,65 | 3650,79 | 3649,64 |
| M | 67,70 | -0,33 | 1,34 | 4117,65 | 3650,79 | 3649,64 |
| M | 65,71 | -0,24 | 0,77 | 4117,65 | 3650,79 | 3649,64 |
| M | 65,41 | -0,27 | 1,07 | 4117,65 | 3650,79 | 3649,64 |
| M | 67,50 | -0,28 | 0,94 | 4117,65 | 3650,79 | 3649,64 |
| M | 66,31 | -0,33 | -0,24 | 3769,23 | 3582,09 | 3402,78 |
| M | 65,56 | -0,30 | 0,54 | 3769,23 | 3582,09 | 3402,78 |
| M | 67,20 | -0,20 | 1,10 | 3769,23 | 3582,09 | 3402,78 |
| M | 65,32 | -0,17 | 1,00 | 3769,23 | 3582,09 | 3402,78 |
| M | 67,03 | -0,24 | 0,19 | 3769,23 | 3582,09 | 3402,78 |
| MHD | 66,01 | -0,17 | 1,00 | 3555,56 | 3424,66 | 3161,29 |
| MHD | 65,42 | -0,18 | 1,07 | 3555,56 | 3424,66 | 3161,29 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| MHD | 66,65 | -0,08 | 1,52 | 3555,56 | 3424,66 | 3161,29 |
| MHD | 66,34 | -0,15 | 1,53 | 3555,56 | 3424,66 | 3161,29 |
| MHD | 64,21 | -0,17 | 1,74 | 3555,56 | 3424,66 | 3161,29 |
| MHD | 66,92 | -0,17 | 1,75 | 3692,31 | 3379,31 | 3310,81 |
| MHD | 66,22 | -0,12 | 1,37 | 3692,31 | 3379,31 | 3310,81 |
| MHD | 66,07 | -0,25 | 0,83 | 3692,31 | 3379,31 | 3310,81 |
| MHD | 65,62 | -0,27 | 1,32 | 3692,31 | 3379,31 | 3310,81 |
| MHD | 63,74 | -0,20 | 2,36 | 3692,31 | 3379,31 | 3310,81 |
| MCS | 63,21 | 0,15 | 3,59 | 4049,587 | 3779,528 | 3629,63 |
| MCS | 66,69 | 0,02 | 2,59 | 4049,587 | 3779,528 | 3629,63 |
| MCS | 61,75 | 0,19 | 3,54 | 4049,587 | 3779,528 | 3629,63 |
| MCS | 66,51 | -0,16 | 1,76 | 4049,587 | 3779,528 | 3629,63 |
| MCS | 63,36 | 0,19 | 3,9 | 4049,587 | 3779,528 | 3629,63 |
| MCS | 63,23 | 0,10 | 3,49 | 3798,45 | 3779,528 | 3656,716 |
| MCS | 67,95 | -0,13 | 3,18 | 3798,45 | 3779,528 | 3656,716 |
| MCS | 67,66 | 0,05 | 3,99 | 3798,45 | 3779,528 | 3656,716 |
| MCS | 63,07 | 0,04 | 4,32 | 3798,45 | 3779,528 | 3656,716 |
| MCS | 65,10 | -0,04 | 3,60 | 3798,45 | 3779,528 | 3656,716 |
| MCS | 65,61 | -0,06 | 2,05 | 3983,74 | 3816,794 | 3703,704 |
| MCS | 60,88 | 0,08 | 3,04 | 3983,74 | 3816,794 | 3703,704 |
| MCS | 62,11 | 0,07 | 3,41 | 3983,74 | 3816,794 | 3703,704 |
| MCS | 68,80 | -0,16 | 2,21 | 3983,74 | 3816,794 | 3703,704 |
| MCS | 63,16 | 0,10 | 3,30 | 3983,74 | 3816,794 | 3703,704 |
| MCS | 62,30 | 0,08 | 3,14 | 3920 | 3759,398 | 3740,458 |
| MCS | 69,23 | -0,11 | 2,62 | 3920 | 3759,398 | 3740,458 |
| MCS | 63,55 | 0,11 | 2,91 | 3920 | 3759,398 | 3740,458 |
| MCS | 67,51 | -0,16 | 1,98 | 3920 | 3759,398 | 3740,458 |
| MCS | 65,76 | 0,05 | 3,14 | 3920 | 3759,398 | 3740,458 |
| MCS | 67,86 | -0,09 | 3,05 | 4000 | 3669,065 | 3623,188 |
| MCS | 63,35 | 0,21 | 3,81 | 4000 | 3669,065 | 3623,188 |
| MCS | 68,91 | -0,10 | 2,29 | 4000 | 3669,065 | 3623,188 |
| MCS | 62,59 | 0,05 | 3,26 | 4000 | 3669,065 | 3623,188 |
| MCS | 61,06 | 0,13 | 2,68 | 4000 | 3669,065 | 3623,188 |
| MCS | 63,07 | 0,25 | 3,74 | 3906,25 | 3846,154 | 3759,398 |
| MCS | 66,70 | 0,03 | 2,51 | 3906,25 | 3846,154 | 3759,398 |
| MCS | 61,91 | 0,07 | 2,78 | 3906,25 | 3846,154 | 3759,398 |
| MCS | 67,59 | -0,09 | 2,35 | 3906,25 | 3846,154 | 3759,398 |
| MCS | 66,57 | 0,06 | 3,03 | 3906,25 | 3846,154 | 3759,398 |
| MCS | 64,60 | 0,09 | 2,73 | 3816,794 | 3731,343 | 3357,664 |
| MCS | 62,99 | 0,10 | 3,87 | 3816,794 | 3731,343 | 3357,664 |
| MCS | 62,64 | 0,09 | 3,43 | 3816,794 | 3731,343 | 3357,664 |
| MCS | 69,26 | -0,01 | 2,84 | 3816,794 | 3731,343 | 3357,664 |
| MCS | 62,74 | 0,04 | 3,21 | 3816,794 | 3731,343 | 3357,664 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| MCS | 65,76 | 0,12 | 2,98 | 3888,889 | 3875,969 | 3529,412 |
| MCS | 68,67 | -0,15 | 1,70 | 3888,889 | 3875,969 | 3529,412 |
| MCS | 67,46 | -0,02 | 2,79 | 3888,889 | 3875,969 | 3529,412 |
| MCS | 63,83 | 0,16 | 4,17 | 3888,889 | 3875,969 | 3529,412 |
| MCS | 64,11 | 0,12 | 3,13 | 3888,889 | 3875,969 | 3529,412 |
| MCS | 62,52 | 0,05 | 2,79 | 3934,426 | 3656,716 | 3576,642 |
| MCS | 69,18 | 0,04 | 3,12 | 3934,426 | 3656,716 | 3576,642 |
| MCS | 60,95 | 0,12 | 3,18 | 3934,426 | 3656,716 | 3576,642 |
| MCS | 67,48 | 0,01 | 2,05 | 3934,426 | 3656,716 | 3576,642 |
| MCS | 64,00 | 0,00 | 2,84 | 3934,426 | 3656,716 | 3576,642 |
| MCS | 61,76 | 0,05 | 3,11 | 3692,308 | 3424,658 | 3333,333 |
| MCS | 67,07 | -0,12 | 1,83 | 3692,308 | 3424,658 | 3333,333 |
| MCS | 63,11 | 0,14 | 3,16 | 3692,308 | 3424,658 | 3333,333 |
| MCS | 62,19 | 0,01 | 3,02 | 3692,308 | 3424,658 | 3333,333 |
| MCS | 63,52 | 0,11 | 3,66 | 3692,308 | 3424,658 | 3333,333 |
| MCS | 66,62 | -0,06 | 2,05 | 3740,458 | 3629,63 | 3525,18 |
| MCS | 62,43 | 0,00 | 3,00 | 3740,458 | 3629,63 | 3525,18 |
| MCS | 63,81 | 0,06 | 3,18 | 3740,458 | 3629,63 | 3525,18 |
| MCS | 68,00 | -0,09 | 2,27 | 3740,458 | 3629,63 | 3525,18 |
| MCS | 66,41 | -0,10 | 2,32 | 3740,458 | 3629,63 | 3525,18 |
| MCS | 67,60 | 0,05 | 2,91 | 3870,968 | 3541,667 | 3472,222 |
| MCS | 62,51 | -0,01 | 3,03 | 3870,968 | 3541,667 | 3472,222 |
| MCS | 66,02 | -0,08 | 2,36 | 3870,968 | 3541,667 | 3472,222 |
| MCS | 64,96 | -0,01 | 3,29 | 3870,968 | 3541,667 | 3472,222 |
| MCS | 65,25 | -0,13 | 1,90 | 3870,968 | 3541,667 | 3472,222 |
| MCS | 64,07 | 0,03 | 3,11 | 4102,564 | 3656,716 | 3602,941 |
| MCS | 66,01 | 0,07 | 2,81 | 4102,564 | 3656,716 | 3602,941 |
| MCS | 67,12 | -0,09 | 2,01 | 4102,564 | 3656,716 | 3602,941 |
| MCS | 63,46 | -0,05 | 2,91 | 4102,564 | 3656,716 | 3602,941 |
| MCS | 66,60 | 0,00 | 2,81 | 4102,564 | 3656,716 | 3602,941 |
| MCS | 66,48 | -0,12 | 2,39 | 3664,122 | 3656,716 | 3356,643 |
| MCS | 62,53 | 0,02 | 2,93 | 3664,122 | 3656,716 | 3356,643 |
| MCS | 62,83 | -0,01 | 3,83 | 3664,122 | 3656,716 | 3356,643 |
| MCS | 67,69 | -0,20 | 2,18 | 3664,122 | 3656,716 | 3356,643 |
| MCS | 62,72 | -0,11 | 2,58 | 3664,122 | 3656,716 | 3356,643 |
| MCS | 61,78 | 0,09 | 2,69 | 3902,439 | 3740,458 | 3623,188 |
| MCS | 67,25 | 0,01 | 2,51 | 3902,439 | 3740,458 | 3623,188 |
| MCS | 67,94 | -0,02 | 2,74 | 3902,439 | 3740,458 | 3623,188 |
| MCS | 63,60 | 0,06 | 3,38 | 3902,439 | 3740,458 | 3623,188 |
| MCS | 65,34 | -0,15 | 2,57 | 3902,439 | 3740,458 | 3623,188 |
| MCS | 64,82 | -0,03 | 3,57 | 3951,613 | 3739,837 | 3676,471 |
| MCS | 64,53 | -0,14 | 3,99 | 3951,613 | 3739,837 | 3676,471 |
| MCS | 61,22 | 0,05 | 3,79 | 3951,613 | 3739,837 | 3676,471 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| MCS | 61,63 | -0,04 | 4,45 | 3951,613 | 3739,837 | 3676,471 |
| MCS | 66,39 | -0,15 | 3,15 | 3951,613 | 3739,837 | 3676,471 |
| MCS | 66,89 | -0,16 | 1,99 | 3951,613 | 3656,716 | 3478,261 |
| MCS | 62,04 | -0,09 | 3,24 | 3951,613 | 3656,716 | 3478,261 |
| MCS | 62,26 | 0,05 | 4,25 | 3951,613 | 3656,716 | 3478,261 |
| MCS | 67,65 | -0,19 | 3,11 | 3951,613 | 3656,716 | 3478,261 |
| MCS | 64,77 | -0,12 | 2,94 | 3951,613 | 3656,716 | 3478,261 |
| MHD/CS | 63,23 | -0,14 | 1,85 | 3951,613 | 3769,231 | 3684,211 |
| MHD/CS | 64,07 | -0,22 | 1,49 | 3951,613 | 3769,231 | 3684,211 |
| MHD/CS | 61,63 | -0,18 | 1,37 | 3951,613 | 3769,231 | 3684,211 |
| MHD/CS | 62,52 | -0,18 | 1,32 | 3951,613 | 3769,231 | 3684,211 |
| MHD/CS | 61,23 | -0,17 | 2,22 | 3951,613 | 3769,231 | 3684,211 |
| MHD/CS | 62,72 | -0,24 | 1,27 | 3934,426 | 3722,628 | 3649,635 |
| MHD/CS | 61,27 | -0,32 | 1,64 | 3934,426 | 3722,628 | 3649,635 |
| MHD/CS | 63,42 | -0,25 | 2,38 | 3934,426 | 3722,628 | 3649,635 |
| MHD/CS | 61,77 | -0,15 | 1,56 | 3934,426 | 3722,628 | 3649,635 |
| MHD/CS | 61,21 | -0,18 | 2,42 | 3934,426 | 3722,628 | 3649,635 |

Tabla IV. Valores de las coordenadas cromáticas (L , a , b) y de las velocidades de propagación de ultrasonidos en las tres direcciones del espacio (V_x , V_y , V_z) (m/s) para las tres variedades: C: Vaugneritas de Calzadilla; L: Granito de Los Santos; M: leucogranito de Martinamor, en muestras de cantera y envejecidas por cristalización de sulfatos (CS) tratadas con los tres productos de conservación testados (H224, RC70 y RC80).

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>V_x</i> | <i>V_y</i> | <i>V_z</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| CH224 | 57,34 | -0,33 | 2,94 | 2592,59 | 2580,65 | 2441,31 |
| CH224 | 56,66 | -0,36 | 3,31 | 2592,59 | 2580,65 | 2441,31 |
| CH224 | 58,69 | -0,40 | 2,56 | 2592,59 | 2580,65 | 2441,31 |
| CH224 | 55,30 | -0,43 | 2,69 | 2592,59 | 2580,65 | 2441,31 |
| CH224 | 51,99 | -0,32 | 3,05 | 2592,59 | 2580,65 | 2441,31 |
| CH224 | 56,65 | -0,35 | 3,02 | 2737,43 | 2575,76 | 2538,07 |
| CH224 | 60,23 | -0,44 | 2,74 | 2737,43 | 2575,76 | 2538,07 |
| CH224 | 55,82 | -0,37 | 3,35 | 2737,43 | 2575,76 | 2538,07 |
| CH224 | 57,04 | -0,49 | 2,69 | 2737,43 | 2575,76 | 2538,07 |
| CH224 | 52,86 | -0,31 | 3,05 | 2737,43 | 2575,76 | 2538,07 |
| CH224 | 54,48 | -0,30 | 3,02 | 2976,19 | 2631,58 | 2617,80 |
| CH224 | 57,32 | -0,48 | 2,40 | 2976,19 | 2631,58 | 2617,80 |
| CH224 | 56,61 | -0,40 | 2,57 | 2976,19 | 2631,58 | 2617,80 |
| CH224 | 57,28 | -0,45 | 2,94 | 2976,19 | 2631,58 | 2617,80 |
| CH224 | 53,79 | -0,26 | 2,94 | 2976,19 | 2631,58 | 2617,80 |
| CH224 | 57,73 | -0,74 | 1,55 | 3246,75 | 3245,03 | 2981,37 |
| CH224 | 51,42 | -0,32 | 2,87 | 3246,75 | 3245,03 | 2981,37 |
| CH224 | 54,33 | -0,63 | 1,68 | 3246,75 | 3245,03 | 2981,37 |
| CH224 | 55,67 | -0,65 | 1,87 | 3246,75 | 3245,03 | 2981,37 |
| CH224 | 46,21 | -0,73 | 2,22 | 3246,75 | 3245,03 | 2981,37 |
| CRC70 | 50,20 | -0,19 | 1,93 | 2976,19 | 2673,80 | 2538,07 |
| CRC70 | 49,44 | -0,36 | 1,79 | 2976,19 | 2673,80 | 2538,07 |
| CRC70 | 49,06 | -0,28 | 1,80 | 2976,19 | 2673,80 | 2538,07 |
| CRC70 | 48,31 | -0,35 | 1,76 | 2976,19 | 2673,80 | 2538,07 |
| CRC70 | 51,06 | -0,37 | 1,91 | 2976,19 | 2673,80 | 2538,07 |
| CRC70 | 50,19 | -0,24 | 2,35 | 2707,18 | 2688,17 | 2551,02 |
| CRC70 | 50,58 | -0,39 | 2,89 | 2707,18 | 2688,17 | 2551,02 |
| CRC70 | 53,88 | -0,39 | 2,66 | 2707,18 | 2688,17 | 2551,02 |
| CRC70 | 51,07 | -0,38 | 2,23 | 2707,18 | 2688,17 | 2551,02 |
| CRC70 | 50,61 | -0,44 | 1,57 | 2707,18 | 2688,17 | 2551,02 |
| CRC70 | 48,47 | -0,22 | 1,69 | 2707,18 | 2551,02 | 2232,14 |
| CRC70 | 48,47 | -0,38 | 1,79 | 2707,18 | 2551,02 | 2232,14 |
| CRC70 | 50,35 | -0,36 | 2,23 | 2707,18 | 2551,02 | 2232,14 |
| CRC70 | 50,13 | -0,35 | 1,66 | 2707,18 | 2551,02 | 2232,14 |
| CRC70 | 49,72 | -0,52 | 1,45 | 2707,18 | 2551,02 | 2232,14 |
| CRC70 | 48,86 | -0,39 | 1,92 | 2692,31 | 2692,31 | 2383,18 |
| CRC70 | 48,26 | -0,30 | 2,01 | 2692,31 | 2692,31 | 2383,18 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| CRC70 | 48,90 | -0,45 | 1,34 | 2692,31 | 2692,31 | 2383,18 |
| CRC70 | 48,83 | -0,36 | 1,94 | 2692,31 | 2692,31 | 2383,18 |
| CRC70 | 50,66 | -0,40 | 1,47 | 2692,31 | 2692,31 | 2383,18 |
| CRC80 | 47,48 | -0,19 | 2,47 | 2840,91 | 2631,58 | 2487,56 |
| CRC80 | 46,67 | -0,31 | 2,45 | 2840,91 | 2631,58 | 2487,56 |
| CRC80 | 45,44 | -0,27 | 2,17 | 2840,91 | 2631,58 | 2487,56 |
| CRC80 | 45,75 | -0,28 | 2,57 | 2840,91 | 2631,58 | 2487,56 |
| CRC80 | 49,99 | -0,42 | 2,77 | 2840,91 | 2631,58 | 2487,56 |
| CRC80 | 46,33 | -0,16 | 2,11 | 2707,18 | 2575,76 | 2564,10 |
| CRC80 | 47,25 | -0,46 | 1,86 | 2707,18 | 2575,76 | 2564,10 |
| CRC80 | 48,09 | -0,28 | 2,24 | 2707,18 | 2575,76 | 2564,10 |
| CRC80 | 47,76 | -0,37 | 2,09 | 2707,18 | 2575,76 | 2564,10 |
| CRC80 | 47,66 | -0,49 | 2,13 | 2707,18 | 2575,76 | 2564,10 |
| CRC80 | 46,32 | -0,24 | 2,04 | 2651,93 | 2648,65 | 2358,49 |
| CRC80 | 47,21 | -0,30 | 2,38 | 2651,93 | 2648,65 | 2358,49 |
| CRC80 | 47,89 | -0,27 | 1,93 | 2651,93 | 2648,65 | 2358,49 |
| CRC80 | 46,90 | -0,23 | 2,55 | 2651,93 | 2648,65 | 2358,49 |
| CRC80 | 48,25 | -0,48 | 2,33 | 2651,93 | 2648,65 | 2358,49 |
| CRC80 | 46,04 | -0,25 | 2,32 | 2976,19 | 2833,33 | 2659,57 |
| CRC80 | 46,57 | -0,26 | 2,29 | 2976,19 | 2833,33 | 2659,57 |
| CRC80 | 46,55 | -0,28 | 1,89 | 2976,19 | 2833,33 | 2659,57 |
| CRC80 | 45,53 | -0,08 | 3,21 | 2976,19 | 2833,33 | 2659,57 |
| CRC80 | 46,08 | -0,38 | 2,11 | 2976,19 | 2833,33 | 2659,57 |
| LH224 | 66,35 | -0,22 | 2,14 | 3720,93 | 3289,47 | 2427,18 |
| LH224 | 66,94 | -0,30 | 1,64 | 3720,93 | 3289,47 | 2427,18 |
| LH224 | 64,69 | -0,27 | 2,50 | 3720,93 | 3289,47 | 2427,18 |
| LH224 | 64,37 | -0,13 | 2,51 | 3720,93 | 3289,47 | 2427,18 |
| LH224 | 61,39 | -0,27 | 2,97 | 3720,93 | 3289,47 | 2427,18 |
| LH224 | 64,92 | -0,23 | 1,86 | 3875,97 | 3267,97 | 2487,56 |
| LH224 | 65,76 | -0,27 | 1,77 | 3875,97 | 3267,97 | 2487,56 |
| LH224 | 65,77 | -0,19 | 2,29 | 3875,97 | 3267,97 | 2487,56 |
| LH224 | 66,94 | -0,25 | 2,28 | 3875,97 | 3267,97 | 2487,56 |
| LH224 | 59,45 | -0,11 | 2,52 | 3875,97 | 3267,97 | 2487,56 |
| LH224 | 65,52 | -0,27 | 1,99 | 3676,47 | 3496,50 | 2463,77 |
| LH224 | 65,45 | -0,36 | 1,58 | 3676,47 | 3496,50 | 2463,77 |
| LH224 | 66,23 | -0,22 | 1,62 | 3676,47 | 3496,50 | 2463,77 |
| LH224 | 65,08 | -0,18 | 1,53 | 3676,47 | 3496,50 | 2463,77 |
| LH224 | 62,59 | -0,24 | 2,19 | 3676,47 | 3496,50 | 2463,77 |
| LH224 | 63,98 | -0,27 | 2,29 | 4065,04 | 3571,43 | 2615,38 |
| LH224 | 65,09 | -0,32 | 2,39 | 4065,04 | 3571,43 | 2615,38 |
| LH224 | 65,54 | -0,14 | 2,75 | 4065,04 | 3571,43 | 2615,38 |
| LH224 | 63,79 | -0,24 | 2,57 | 4065,04 | 3571,43 | 2615,38 |
| LH224 | 63,48 | -0,20 | 2,24 | 4065,04 | 3571,43 | 2615,38 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| LRC70 | 58,81 | -0,36 | 0,95 | 3649,64 | 2994,01 | 2578,95 |
| LRC70 | 57,11 | -0,23 | 1,29 | 3649,64 | 2994,01 | 2578,95 |
| LRC70 | 59,31 | -0,38 | 0,96 | 3649,64 | 2994,01 | 2578,95 |
| LRC70 | 61,02 | -0,23 | 2,29 | 3649,64 | 2994,01 | 2578,95 |
| LRC70 | 61,27 | -0,42 | 1,31 | 3649,64 | 2994,01 | 2578,95 |
| LRC70 | 59,04 | -0,15 | 1,33 | 3695,65 | 3101,27 | 2722,22 |
| LRC70 | 60,28 | -0,28 | 1,43 | 3695,65 | 3101,27 | 2722,22 |
| LRC70 | 56,89 | -0,21 | 0,41 | 3695,65 | 3101,27 | 2722,22 |
| LRC70 | 57,65 | -0,36 | 0,88 | 3695,65 | 3101,27 | 2722,22 |
| LRC70 | 58,94 | -0,35 | 0,42 | 3695,65 | 3101,27 | 2722,22 |
| LRC70 | 61,28 | -0,36 | 1,86 | 3923,08 | 3424,66 | 2462,31 |
| LRC70 | 60,76 | -0,28 | 1,75 | 3923,08 | 3424,66 | 2462,31 |
| LRC70 | 57,65 | -0,25 | 1,13 | 3923,08 | 3424,66 | 2462,31 |
| LRC70 | 58,42 | -0,33 | 1,12 | 3923,08 | 3424,66 | 2462,31 |
| LRC70 | 59,62 | -0,49 | 0,94 | 3923,08 | 3424,66 | 2462,31 |
| LRC70 | 60,21 | 0,25 | 1,89 | 3469,39 | 3246,75 | 2392,34 |
| LRC70 | 54,43 | 0,13 | 0,97 | 3469,39 | 3246,75 | 2392,34 |
| LRC70 | 59,89 | -0,31 | 1,60 | 3469,39 | 3246,75 | 2392,34 |
| LRC70 | 60,86 | -0,06 | 2,05 | 3469,39 | 3246,75 | 2392,34 |
| LRC70 | 59,05 | -0,46 | 1,31 | 3469,39 | 3246,75 | 2392,34 |
| LRC80 | 56,09 | -0,02 | 2,22 | 3550,72 | 3141,03 | 2463,05 |
| LRC80 | 57,49 | -0,37 | 2,19 | 3550,72 | 3141,03 | 2463,05 |
| LRC80 | 56,45 | -0,29 | 2,35 | 3550,72 | 3141,03 | 2463,05 |
| LRC80 | 56,76 | -0,31 | 2,19 | 3550,72 | 3141,03 | 2463,05 |
| LRC80 | 55,95 | -0,53 | 2,19 | 3550,72 | 3141,03 | 2463,05 |
| LRC80 | 58,39 | -0,36 | 1,47 | 3184,71 | 3040,94 | 2538,07 |
| LRC80 | 55,41 | -0,34 | 1,13 | 3184,71 | 3040,94 | 2538,07 |
| LRC80 | 57,55 | -0,23 | 1,89 | 3184,71 | 3040,94 | 2538,07 |
| LRC80 | 58,32 | -0,13 | 2,13 | 3184,71 | 3040,94 | 2538,07 |
| LRC80 | 55,49 | -0,26 | 1,28 | 3184,71 | 3040,94 | 2538,07 |
| LRC80 | 55,72 | -0,45 | 1,47 | 3893,13 | 3546,10 | 2500,00 |
| LRC80 | 56,93 | -0,42 | 1,83 | 3893,13 | 3546,10 | 2500,00 |
| LRC80 | 57,95 | -0,52 | 1,74 | 3893,13 | 3546,10 | 2500,00 |
| LRC80 | 55,73 | -0,33 | 1,53 | 3893,13 | 3546,10 | 2500,00 |
| LRC80 | 59,83 | -0,30 | 2,46 | 3893,13 | 3546,10 | 2500,00 |
| LRC80 | 59,29 | 0,34 | 1,63 | 3740,46 | 3546,10 | 3012,05 |
| LRC80 | 58,30 | -0,18 | 1,54 | 3740,46 | 3546,10 | 3012,05 |
| LRC80 | 57,38 | 0,02 | 1,22 | 3740,46 | 3546,10 | 3012,05 |
| LRC80 | 54,30 | -0,01 | 1,30 | 3740,46 | 3546,10 | 3012,05 |
| LRC80 | 56,44 | -0,20 | 0,93 | 3740,46 | 3546,10 | 3012,05 |
| MH224 | 55,21 | 0,60 | 3,74 | 4000,00 | 3888,89 | 3546,10 |
| MH224 | 62,60 | 0,19 | 1,88 | 4000,00 | 3888,89 | 3546,10 |
| MH224 | 60,59 | 0,16 | 2,09 | 4000,00 | 3888,89 | 3546,10 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| MH224 | 59,68 | 0,20 | 2,28 | 4000,00 | 3888,89 | 3546,10 |
| MH224 | 58,44 | 0,17 | 2,55 | 4000,00 | 3888,89 | 3546,10 |
| MH224 | 54,37 | 0,29 | 3,08 | 3769,23 | 3521,13 | 3404,26 |
| MH224 | 62,52 | 0,13 | 2,21 | 3769,23 | 3521,13 | 3404,26 |
| MH224 | 60,99 | 0,03 | 2,03 | 3769,23 | 3521,13 | 3404,26 |
| MH224 | 60,93 | 0,07 | 1,97 | 3769,23 | 3521,13 | 3404,26 |
| MH224 | 62,78 | 0,12 | 1,69 | 3769,23 | 3521,13 | 3404,26 |
| MH224 | 61,38 | -0,02 | 1,74 | 3840,00 | 3525,18 | 3496,50 |
| MH224 | 61,36 | 0,11 | 2,06 | 3840,00 | 3525,18 | 3496,50 |
| MH224 | 62,32 | -0,03 | 1,43 | 3840,00 | 3525,18 | 3496,50 |
| MH224 | 62,13 | 0,09 | 1,90 | 3840,00 | 3525,18 | 3496,50 |
| MH224 | 53,20 | 0,54 | 3,63 | 3840,00 | 3525,18 | 3496,50 |
| MH224 | 61,99 | 0,06 | 1,76 | 3920,00 | 3602,94 | 3571,43 |
| MH224 | 61,06 | 0,05 | 1,76 | 3920,00 | 3602,94 | 3571,43 |
| MH224 | 62,48 | 0,03 | 1,39 | 3920,00 | 3602,94 | 3571,43 |
| MH224 | 60,47 | 0,16 | 1,56 | 3920,00 | 3602,94 | 3571,43 |
| MH224 | 51,49 | 0,61 | 4,15 | 3920,00 | 3602,94 | 3571,43 |
| MRC70 | 54,85 | 0,40 | 2,10 | 3920,00 | 3525,18 | 3164,56 |
| MRC70 | 53,65 | 0,21 | 1,37 | 3920,00 | 3525,18 | 3164,56 |
| MRC70 | 53,92 | 0,33 | 2,02 | 3920,00 | 3525,18 | 3164,56 |
| MRC70 | 53,36 | 0,25 | 2,04 | 3920,00 | 3525,18 | 3164,56 |
| MRC70 | 55,36 | 0,31 | 2,27 | 3920,00 | 3525,18 | 3164,56 |
| MRC70 | 53,09 | 0,48 | 3,02 | 3937,01 | 3617,02 | 3265,31 |
| MRC70 | 53,19 | 0,47 | 3,71 | 3937,01 | 3617,02 | 3265,31 |
| MRC70 | 50,80 | 0,45 | 2,70 | 3937,01 | 3617,02 | 3265,31 |
| MRC70 | 50,68 | 0,43 | 2,66 | 3937,01 | 3617,02 | 3265,31 |
| MRC70 | 52,62 | 0,40 | 2,44 | 3937,01 | 3617,02 | 3265,31 |
| MRC70 | 51,29 | 0,45 | 3,26 | 3840,00 | 3609,02 | 3576,64 |
| MRC70 | 51,82 | 0,51 | 3,51 | 3840,00 | 3609,02 | 3576,64 |
| MRC70 | 52,80 | 0,45 | 3,52 | 3840,00 | 3609,02 | 3576,64 |
| MRC70 | 55,18 | 0,51 | 4,12 | 3840,00 | 3609,02 | 3576,64 |
| MRC70 | 51,81 | 0,56 | 3,91 | 3840,00 | 3609,02 | 3576,64 |
| MRC70 | 53,51 | 0,23 | 2,59 | 4016,39 | 3525,18 | 3503,65 |
| MRC70 | 52,49 | 0,26 | 2,40 | 4016,39 | 3525,18 | 3503,65 |
| MRC70 | 54,44 | 0,36 | 3,90 | 4016,39 | 3525,18 | 3503,65 |
| MRC70 | 56,32 | 0,41 | 3,33 | 4016,39 | 3525,18 | 3503,65 |
| MRC70 | 53,53 | 0,16 | 2,92 | 4016,39 | 3525,18 | 3503,65 |
| MRC80 | 48,36 | 0,94 | 4,23 | 3934,43 | 3582,09 | 3164,56 |
| MRC80 | 49,61 | 0,84 | 3,74 | 3934,43 | 3582,09 | 3164,56 |
| MRC80 | 47,37 | 0,74 | 3,70 | 3934,43 | 3582,09 | 3164,56 |
| MRC80 | 47,45 | 0,82 | 3,38 | 3934,43 | 3582,09 | 3164,56 |
| MRC80 | 51,42 | 0,71 | 3,35 | 3934,43 | 3582,09 | 3164,56 |
| MRC80 | 51,97 | 0,48 | 3,19 | 4000,00 | 3475,18 | 3333,33 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| MRC80 | 51,64 | 0,64 | 3,52 | 4000,00 | 3475,18 | 3333,33 |
| MRC80 | 48,06 | 0,51 | 3,29 | 4000,00 | 3475,18 | 3333,33 |
| MRC80 | 50,68 | 0,53 | 2,61 | 4000,00 | 3475,18 | 3333,33 |
| MRC80 | 51,45 | 0,32 | 1,97 | 4000,00 | 3475,18 | 3333,33 |
| MRC80 | 53,25 | 0,45 | 2,88 | 4000,00 | 3602,94 | 3288,59 |
| MRC80 | 50,14 | 0,67 | 3,08 | 4000,00 | 3602,94 | 3288,59 |
| MRC80 | 48,91 | 0,41 | 3,22 | 4000,00 | 3602,94 | 3288,59 |
| MRC80 | 49,91 | 0,45 | 2,82 | 4000,00 | 3602,94 | 3288,59 |
| MRC80 | 50,47 | 0,55 | 3,27 | 4000,00 | 3602,94 | 3288,59 |
| MRC80 | 50,62 | 0,49 | 3,01 | 3870,97 | 3740,46 | 3496,50 |
| MRC80 | 50,53 | 0,32 | 3,22 | 3870,97 | 3740,46 | 3496,50 |
| MRC80 | 52,82 | 0,37 | 3,37 | 3870,97 | 3740,46 | 3496,50 |
| MRC80 | 52,27 | 0,45 | 4,24 | 3870,97 | 3740,46 | 3496,50 |
| MRC80 | 51,11 | 0,37 | 3,50 | 3870,97 | 3740,46 | 3496,50 |
| CCSH224 | 51,63 | -0,67 | 2,71 | 3684,21 | 3496,93 | 3649,64 |
| CCSH224 | 51,57 | -0,67 | 2,69 | 3684,21 | 3496,93 | 3649,64 |
| CCSH224 | 52,53 | -0,70 | 3,09 | 3684,21 | 3496,93 | 3649,64 |
| CCSH224 | 49,41 | -0,65 | 2,96 | 3684,21 | 3496,93 | 3649,64 |
| CCSH224 | 47,86 | -0,48 | 3,26 | 3684,21 | 3496,93 | 3649,64 |
| CCSH224 | 58,47 | -0,42 | 3,90 | 2958,58 | 2914,29 | 2717,39 |
| CCSH224 | 54,40 | -0,08 | 5,32 | 2958,58 | 2914,29 | 2717,39 |
| CCSH224 | 54,66 | -0,35 | 4,73 | 2958,58 | 2914,29 | 2717,39 |
| CCSH224 | 53,43 | -0,25 | 4,53 | 2958,58 | 2914,29 | 2717,39 |
| CCSH224 | 53,06 | -0,17 | 4,81 | 2958,58 | 2914,29 | 2717,39 |
| CCSH224 | 55,55 | -0,20 | 5,60 | 2412,06 | 2331,84 | 2236,84 |
| CCSH224 | 56,79 | -0,23 | 5,49 | 2412,06 | 2331,84 | 2236,84 |
| CCSH224 | 57,33 | -0,12 | 5,96 | 2412,06 | 2331,84 | 2236,84 |
| CCSH224 | 52,57 | -0,16 | 4,95 | 2412,06 | 2331,84 | 2236,84 |
| CCSH224 | 53,80 | -0,22 | 5,23 | 2412,06 | 2331,84 | 2236,84 |
| CCSH224 | 57,27 | -0,42 | 4,46 | 2659,57 | 2602,04 | 2118,64 |
| CCSH224 | 53,59 | -0,20 | 5,87 | 2659,57 | 2602,04 | 2118,64 |
| CCSH224 | 55,24 | -0,24 | 5,78 | 2659,57 | 2602,04 | 2118,64 |
| CCSH224 | 54,82 | -0,24 | 5,81 | 2659,57 | 2602,04 | 2118,64 |
| CCSH224 | 53,33 | -0,30 | 5,18 | 2659,57 | 2602,04 | 2118,64 |
| CCSRC70 | 51,72 | -0,39 | 4,20 | 2994,01 | 2512,82 | 2500,00 |
| CCSRC70 | 52,08 | -0,39 | 4,05 | 2994,01 | 2512,82 | 2500,00 |
| CCSRC70 | 52,31 | -0,25 | 4,14 | 2994,01 | 2512,82 | 2500,00 |
| CCSRC70 | 52,62 | -0,40 | 4,96 | 2994,01 | 2512,82 | 2500,00 |
| CCSRC70 | 51,15 | -0,31 | 4,99 | 2994,01 | 2512,82 | 2500,00 |
| CCSRC70 | 51,88 | -0,41 | 3,39 | 2816,09 | 2440,19 | 2283,11 |
| CCSRC70 | 53,55 | -0,41 | 3,99 | 2816,09 | 2440,19 | 2283,11 |
| CCSRC70 | 52,20 | -0,46 | 3,64 | 2816,09 | 2440,19 | 2283,11 |
| CCSRC70 | 51,40 | -0,40 | 3,89 | 2816,09 | 2440,19 | 2283,11 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| CCSRC70 | 50,85 | -0,42 | 4,47 | 2816,09 | 2440,19 | 2283,11 |
| CCSRC70 | 52,59 | -0,82 | 1,72 | 3475,18 | 3105,59 | 2608,70 |
| CCSRC70 | 51,01 | -0,78 | 1,76 | 3475,18 | 3105,59 | 2608,70 |
| CCSRC70 | 52,93 | -0,84 | 1,47 | 3475,18 | 3105,59 | 2608,70 |
| CCSRC70 | 51,51 | -0,81 | 1,65 | 3475,18 | 3105,59 | 2608,70 |
| CCSRC70 | 52,12 | -0,75 | 3,00 | 3475,18 | 3105,59 | 2608,70 |
| CCSRC70 | 49,18 | -0,41 | 3,02 | 2712,77 | 2622,95 | 2511,85 |
| CCSRC70 | 51,84 | -0,51 | 3,37 | 2712,77 | 2622,95 | 2511,85 |
| CCSRC70 | 51,25 | -0,45 | 3,45 | 2712,77 | 2622,95 | 2511,85 |
| CCSRC70 | 51,95 | -0,52 | 3,12 | 2712,77 | 2622,95 | 2511,85 |
| CCSRC70 | 53,93 | -0,40 | 4,29 | 2712,77 | 2622,95 | 2511,85 |
| CCSRC80 | 47,41 | -0,49 | 3,38 | 2897,73 | 2631,58 | 2274,88 |
| CCSRC80 | 47,54 | -0,41 | 3,41 | 2897,73 | 2631,58 | 2274,88 |
| CCSRC80 | 47,49 | -0,41 | 3,59 | 2897,73 | 2631,58 | 2274,88 |
| CCSRC80 | 48,49 | -0,45 | 3,51 | 2897,73 | 2631,58 | 2274,88 |
| CCSRC80 | 49,04 | -0,53 | 3,16 | 2897,73 | 2631,58 | 2274,88 |
| CCSRC80 | 46,92 | -0,26 | 3,62 | 3037,97 | 2897,73 | 2450,98 |
| CCSRC80 | 47,07 | -0,33 | 3,38 | 3037,97 | 2897,73 | 2450,98 |
| CCSRC80 | 47,01 | -0,37 | 3,43 | 3037,97 | 2897,73 | 2450,98 |
| CCSRC80 | 46,46 | -0,53 | 3,20 | 3037,97 | 2897,73 | 2450,98 |
| CCSRC80 | 48,63 | -0,45 | 3,61 | 3037,97 | 2897,73 | 2450,98 |
| CCSRC80 | 49,41 | -0,34 | 2,58 | 2732,24 | 2256,64 | 2242,15 |
| CCSRC80 | 51,35 | -0,44 | 2,41 | 2732,24 | 2256,64 | 2242,15 |
| CCSRC80 | 49,56 | -0,41 | 2,87 | 2732,24 | 2256,64 | 2242,15 |
| CCSRC80 | 49,94 | -0,42 | 3,01 | 2732,24 | 2256,64 | 2242,15 |
| CCSRC80 | 49,65 | -0,41 | 3,22 | 2732,24 | 2256,64 | 2242,15 |
| CCSRC80 | 49,43 | -0,34 | 3,04 | 2606,38 | 2300,47 | 2202,64 |
| CCSRC80 | 47,33 | -0,25 | 3,42 | 2606,38 | 2300,47 | 2202,64 |
| CCSRC80 | 49,65 | -0,26 | 3,88 | 2606,38 | 2300,47 | 2202,64 |
| CCSRC80 | 49,92 | -0,35 | 3,18 | 2606,38 | 2300,47 | 2202,64 |
| CCSRC80 | 50,90 | -0,47 | 3,33 | 2606,38 | 2300,47 | 2202,64 |
| LCSH224 | 64,70 | -0,12 | 3,73 | 3424,66 | 3246,75 | 2350,23 |
| LCSH224 | 65,18 | -0,31 | 3,79 | 3424,66 | 3246,75 | 2350,23 |
| LCSH224 | 62,56 | -0,14 | 3,97 | 3424,66 | 3246,75 | 2350,23 |
| LCSH224 | 62,47 | -0,05 | 4,10 | 3424,66 | 3246,75 | 2350,23 |
| LCSH224 | 60,53 | -0,06 | 4,26 | 3424,66 | 3246,75 | 2350,23 |
| LCSH224 | 64,86 | -0,17 | 3,15 | 3571,43 | 3128,83 | 2604,17 |
| LCSH224 | 62,18 | 0,02 | 3,91 | 3571,43 | 3128,83 | 2604,17 |
| LCSH224 | 63,18 | -0,14 | 3,99 | 3571,43 | 3128,83 | 2604,17 |
| LCSH224 | 61,96 | -0,17 | 3,51 | 3571,43 | 3128,83 | 2604,17 |
| LCSH224 | 60,42 | -0,17 | 3,75 | 3571,43 | 3128,83 | 2604,17 |
| LCSH224 | 63,56 | -0,07 | 3,28 | 3401,36 | 2941,18 | 2428,57 |
| LCSH224 | 64,06 | -0,14 | 3,58 | 3401,36 | 2941,18 | 2428,57 |

ANEXO

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| LCSH224 | 63,21 | -0,22 | 3,72 | 3401,36 | 2941,18 | 2428,57 |
| LCSH224 | 62,47 | -0,14 | 3,98 | 3401,36 | 2941,18 | 2428,57 |
| LCSH224 | 60,28 | -0,09 | 2,89 | 3401,36 | 2941,18 | 2428,57 |
| LCSH224 | 60,58 | -0,23 | 3,24 | 3270,44 | 2958,58 | 1991,87 |
| LCSH224 | 61,87 | -0,15 | 4,66 | 3270,44 | 2958,58 | 1991,87 |
| LCSH224 | 63,06 | -0,05 | 4,24 | 3270,44 | 2958,58 | 1991,87 |
| LCSH224 | 63,88 | -0,17 | 4,04 | 3270,44 | 2958,58 | 1991,87 |
| LCSH224 | 60,11 | -0,05 | 4,71 | 3270,44 | 2958,58 | 1991,87 |
| LCSRC70 | 59,55 | 0,14 | 3,01 | 3290,32 | 2941,18 | 2066,12 |
| LCSRC70 | 58,93 | 0,19 | 4,02 | 3290,32 | 2941,18 | 2066,12 |
| LCSRC70 | 57,87 | 0,28 | 3,84 | 3290,32 | 2941,18 | 2066,12 |
| LCSRC70 | 59,57 | 0,16 | 5,09 | 3290,32 | 2941,18 | 2066,12 |
| LCSRC70 | 61,13 | -0,12 | 4,95 | 3290,32 | 2941,18 | 2066,12 |
| LCSRC70 | 58,88 | 0,09 | 2,91 | 3377,48 | 2857,14 | 2512,56 |
| LCSRC70 | 59,53 | -0,06 | 3,27 | 3377,48 | 2857,14 | 2512,56 |
| LCSRC70 | 62,49 | -0,06 | 2,97 | 3377,48 | 2857,14 | 2512,56 |
| LCSRC70 | 61,64 | 0,18 | 3,30 | 3377,48 | 2857,14 | 2512,56 |
| LCSRC70 | 59,37 | -0,25 | 3,62 | 3377,48 | 2857,14 | 2512,56 |
| LCSRC70 | 58,42 | -0,13 | 2,58 | 3355,70 | 2958,58 | 2602,04 |
| LCSRC70 | 59,83 | -0,09 | 2,93 | 3355,70 | 2958,58 | 2602,04 |
| LCSRC70 | 59,96 | -0,02 | 3,20 | 3355,70 | 2958,58 | 2602,04 |
| LCSRC70 | 59,85 | -0,04 | 4,02 | 3355,70 | 2958,58 | 2602,04 |
| LCSRC70 | 63,23 | -0,28 | 3,49 | 3355,70 | 2958,58 | 2602,04 |
| LCSRC70 | 57,67 | -0,10 | 2,30 | 3521,13 | 2732,24 | 2450,00 |
| LCSRC70 | 60,13 | -0,07 | 2,33 | 3521,13 | 2732,24 | 2450,00 |
| LCSRC70 | 62,94 | -0,06 | 2,98 | 3521,13 | 2732,24 | 2450,00 |
| LCSRC70 | 60,57 | 0,12 | 3,57 | 3521,13 | 2732,24 | 2450,00 |
| LCSRC70 | 59,00 | -0,24 | 2,12 | 3521,13 | 2732,24 | 2450,00 |
| LCSRC80 | 54,16 | 0,47 | 3,06 | 3378,38 | 3017,75 | 2222,22 |
| LCSRC80 | 55,16 | 0,41 | 2,96 | 3378,38 | 3017,75 | 2222,22 |
| LCSRC80 | 55,30 | 0,41 | 3,16 | 3378,38 | 3017,75 | 2222,22 |
| LCSRC80 | 55,37 | 0,53 | 3,84 | 3378,38 | 3017,75 | 2222,22 |
| LCSRC80 | 59,64 | -0,25 | 5,21 | 3378,38 | 3017,75 | 2222,22 |
| LCSRC80 | 54,12 | 0,18 | 2,22 | 3128,83 | 3030,30 | 2293,58 |
| LCSRC80 | 54,30 | 0,45 | 2,93 | 3128,83 | 3030,30 | 2293,58 |
| LCSRC80 | 59,99 | 0,36 | 3,65 | 3128,83 | 3030,30 | 2293,58 |
| LCSRC80 | 58,66 | 0,66 | 3,61 | 3128,83 | 3030,30 | 2293,58 |
| LCSRC80 | 56,68 | -0,32 | 2,95 | 3128,83 | 3030,30 | 2293,58 |
| LCSRC80 | 54,78 | 0,01 | 2,06 | 3246,75 | 3128,83 | 2425,74 |
| LCSRC80 | 55,18 | 0,10 | 2,32 | 3246,75 | 3128,83 | 2425,74 |
| LCSRC80 | 58,78 | 0,20 | 3,14 | 3246,75 | 3128,83 | 2425,74 |
| LCSRC80 | 59,68 | -0,06 | 2,89 | 3246,75 | 3128,83 | 2425,74 |
| LCSRC80 | 57,62 | -0,26 | 2,74 | 3246,75 | 3128,83 | 2425,74 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| LCSRC80 | 61,01 | 0,03 | 5,80 | 3669,06 | 3125,00 | 2427,18 |
| LCSRC80 | 58,40 | 0,25 | 6,05 | 3669,06 | 3125,00 | 2427,18 |
| LCSRC80 | 56,11 | 0,12 | 4,30 | 3669,06 | 3125,00 | 2427,18 |
| LCSRC80 | 56,14 | 0,15 | 5,62 | 3669,06 | 3125,00 | 2427,18 |
| LCSRC80 | 58,00 | -0,29 | 3,49 | 3669,06 | 3125,00 | 2427,18 |

Tabla V. Valores de las coordenadas cromáticas (L , a , b) y de las velocidades de propagación de ultrasonidos en las tres direcciones del espacio (V_x , V_y , V_z) (m/s) para las tres variedades: C: Vaugneritas de Calzadilla; L: Granito de Los Santos; M: leucogranito de Martinamor, en muestras de cantera y envejecidas por cristalización de sulfatos (CS) tratadas con los tres productos de conservación testados (H224, RC70 y RC80) y posteriormente envejecidas por hielo/deshielo junto con frío/calor (HD).

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>V_x</i> | <i>V_y</i> | <i>V_z</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| CH224HD | 57,58 | -0,27 | 3,25 | 2525,77 | 2487,80 | 2092,05 |
| CH224HD | 60,53 | -0,37 | 3,12 | 2525,77 | 2487,80 | 2092,05 |
| CH224HD | 57,26 | -0,26 | 3,33 | 2525,77 | 2487,80 | 2092,05 |
| CH224HD | 57,62 | -0,41 | 2,80 | 2525,77 | 2487,80 | 2092,05 |
| CH224HD | 55,12 | -0,14 | 4,03 | 2525,77 | 2487,80 | 2092,05 |
| CH224HD | 57,52 | -0,53 | 2,05 | 2916,67 | 2857,14 | 2774,57 |
| CH224HD | 53,18 | -0,29 | 2,91 | 2916,67 | 2857,14 | 2774,57 |
| CH224HD | 55,74 | -0,50 | 1,96 | 2916,67 | 2857,14 | 2774,57 |
| CH224HD | 56,47 | -0,54 | 2,03 | 2916,67 | 2857,14 | 2774,57 |
| CH224HD | 50,82 | -0,44 | 2,93 | 2916,67 | 2857,14 | 2774,57 |
| CRC70HD | 54,82 | -0,36 | 3,16 | 2768,36 | 2347,42 | 2272,73 |
| CRC70HD | 56,24 | -0,40 | 3,30 | 2768,36 | 2347,42 | 2272,73 |
| CRC70HD | 59,05 | -0,46 | 3,65 | 2768,36 | 2347,42 | 2272,73 |
| CRC70HD | 56,46 | -0,46 | 3,00 | 2768,36 | 2347,42 | 2272,73 |
| CRC70HD | 55,26 | -0,46 | 3,87 | 2768,36 | 2347,42 | 2272,73 |
| CRC70HD | 55,26 | -0,39 | 2,94 | 2707,18 | 2475,73 | 2474,75 |
| CRC70HD | 54,46 | -0,33 | 2,94 | 2707,18 | 2475,73 | 2474,75 |
| CRC70HD | 55,21 | -0,55 | 2,67 | 2707,18 | 2475,73 | 2474,75 |
| CRC70HD | 54,82 | -0,33 | 2,87 | 2707,18 | 2475,73 | 2474,75 |
| CRC70HD | 54,74 | -0,43 | 3,99 | 2707,18 | 2475,73 | 2474,75 |
| CRC80HD | 50,17 | -0,12 | 2,84 | 2692,31 | 2602,04 | 2325,58 |
| CRC80HD | 52,05 | -0,56 | 2,36 | 2692,31 | 2602,04 | 2325,58 |
| CRC80HD | 52,23 | -0,33 | 2,94 | 2692,31 | 2602,04 | 2325,58 |
| CRC80HD | 51,58 | -0,41 | 2,70 | 2692,31 | 2602,04 | 2325,58 |
| CRC80HD | 51,36 | -0,44 | 3,76 | 2692,31 | 2602,04 | 2325,58 |
| CRC80HD | 50,33 | -0,35 | 2,92 | 2873,56 | 2741,94 | 2512,56 |
| CRC80HD | 51,37 | -0,42 | 2,61 | 2873,56 | 2741,94 | 2512,56 |
| CRC80HD | 51,53 | -0,41 | 2,38 | 2873,56 | 2741,94 | 2512,56 |
| CRC80HD | 50,94 | -0,26 | 3,50 | 2873,56 | 2741,94 | 2512,56 |
| CRC80HD | 50,87 | -0,31 | 3,51 | 2873,56 | 2741,94 | 2512,56 |
| LH224HD | 65,57 | -0,25 | 2,44 | 3496,50 | 2976,19 | 2347,42 |
| LH224HD | 66,20 | -0,34 | 2,45 | 3496,50 | 2976,19 | 2347,42 |
| LH224HD | 66,55 | -0,29 | 2,80 | 3496,50 | 2976,19 | 2347,42 |
| LH224HD | 67,40 | -0,27 | 3,07 | 3496,50 | 2976,19 | 2347,42 |
| LH224HD | 60,97 | -0,11 | 3,83 | 3496,50 | 2976,19 | 2347,42 |
| LH224HD | 64,86 | -0,36 | 2,87 | 3703,70 | 3289,47 | 2383,18 |
| LH224HD | 65,66 | -0,36 | 3,23 | 3703,70 | 3289,47 | 2383,18 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| LH224HD | 66,13 | -0,18 | 3,35 | 3703,70 | 3289,47 | 2383,18 |
| LH224HD | 64,54 | -0,28 | 3,23 | 3703,70 | 3289,47 | 2383,18 |
| LH224HD | 64,22 | -0,20 | 3,78 | 3703,70 | 3289,47 | 2383,18 |
| LRC70HD | 60,73 | -0,22 | 3,76 | 3517,24 | 2578,95 | 2500,00 |
| LRC70HD | 61,54 | -0,37 | 3,46 | 3517,24 | 2578,95 | 2500,00 |
| LRC70HD | 59,52 | -0,35 | 2,80 | 3517,24 | 2578,95 | 2500,00 |
| LRC70HD | 59,75 | -0,41 | 2,75 | 3517,24 | 2578,95 | 2500,00 |
| LRC70HD | 60,44 | -0,42 | 5,36 | 3517,24 | 2578,95 | 2500,00 |
| LRC70HD | 65,13 | -0,12 | 3,77 | 3072,29 | 2958,58 | 2083,33 |
| LRC70HD | 61,10 | -0,15 | 3,29 | 3072,29 | 2958,58 | 2083,33 |
| LRC70HD | 63,96 | -0,46 | 3,60 | 3072,29 | 2958,58 | 2083,33 |
| LRC70HD | 64,42 | -0,16 | 4,19 | 3072,29 | 2958,58 | 2083,33 |
| LRC70HD | 61,99 | -0,47 | 5,18 | 3072,29 | 2958,58 | 2083,33 |
| LRC80HD | 59,40 | -0,46 | 4,44 | 3229,81 | 2958,58 | 2403,85 |
| LRC80HD | 57,04 | -0,48 | 3,44 | 3229,81 | 2958,58 | 2403,85 |
| LRC80HD | 59,14 | -0,27 | 4,14 | 3229,81 | 2958,58 | 2403,85 |
| LRC80HD | 59,50 | -0,34 | 4,10 | 3229,81 | 2958,58 | 2403,85 |
| LRC80HD | 57,33 | -0,26 | 5,37 | 3229,81 | 2958,58 | 2403,85 |
| LRC80HD | 60,78 | 0,09 | 4,16 | 3378,38 | 3144,65 | 2367,15 |
| LRC80HD | 60,41 | -0,38 | 3,37 | 3378,38 | 3144,65 | 2367,15 |
| LRC80HD | 60,19 | -0,26 | 3,20 | 3378,38 | 3144,65 | 2367,15 |
| LRC80HD | 57,01 | -0,22 | 3,04 | 3378,38 | 3144,65 | 2367,15 |
| LRC80HD | 58,59 | -0,36 | 4,22 | 3378,38 | 3144,65 | 2367,15 |
| MH224HD | 55,42 | 0,22 | 3,38 | 3576,64 | 3184,71 | 2891,57 |
| MH224HD | 62,46 | 0,12 | 2,48 | 3576,64 | 3184,71 | 2891,57 |
| MH224HD | 61,00 | -0,01 | 2,40 | 3576,64 | 3184,71 | 2891,57 |
| MH224HD | 61,44 | -0,03 | 2,19 | 3576,64 | 3184,71 | 2891,57 |
| MH224HD | 62,58 | 0,04 | 2,45 | 3576,64 | 3184,71 | 2891,57 |
| MH224HD | 62,42 | 0,02 | 2,15 | 3740,46 | 3246,75 | 3223,68 |
| MH224HD | 61,64 | -0,03 | 2,17 | 3740,46 | 3246,75 | 3223,68 |
| MH224HD | 62,78 | -0,07 | 1,93 | 3740,46 | 3246,75 | 3223,68 |
| MH224HD | 61,26 | 0,02 | 2,02 | 3740,46 | 3246,75 | 3223,68 |
| MH224HD | 63,54 | 0,53 | 4,32 | 3740,46 | 3246,75 | 3223,68 |
| MRC70HD | 63,21 | 0,00 | 0,79 | 3906,25 | 3617,02 | 3137,25 |
| MRC70HD | 62,08 | 0,04 | 1,07 | 3906,25 | 3617,02 | 3137,25 |
| MRC70HD | 61,81 | -0,06 | 0,40 | 3906,25 | 3617,02 | 3137,25 |
| MRC70HD | 61,40 | -0,10 | 0,23 | 3906,25 | 3617,02 | 3137,25 |
| MRC70HD | 60,78 | 0,08 | 0,81 | 3906,25 | 3617,02 | 3137,25 |
| MRC70HD | 60,17 | -0,09 | 0,99 | 3828,13 | 3629,63 | 3529,41 |
| MRC70HD | 59,01 | -0,05 | 0,82 | 3828,13 | 3629,63 | 3529,41 |
| MRC70HD | 59,98 | 0,11 | 2,55 | 3828,13 | 3629,63 | 3529,41 |
| MRC70HD | 62,61 | 0,08 | 1,58 | 3828,13 | 3629,63 | 3529,41 |
| MRC70HD | 55,64 | 0,10 | 3,16 | 3828,13 | 3629,63 | 3529,41 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| MRC80HD | 60,01 | 0,12 | 0,57 | 3676,47 | 3379,31 | 3223,68 |
| MRC80HD | 60,56 | 0,11 | 0,82 | 3676,47 | 3379,31 | 3223,68 |
| MRC80HD | 57,71 | 0,04 | 0,63 | 3676,47 | 3379,31 | 3223,68 |
| MRC80HD | 59,27 | 0,04 | 0,17 | 3676,47 | 3379,31 | 3223,68 |
| MRC80HD | 55,72 | 0,14 | 1,56 | 3676,47 | 3379,31 | 3223,68 |
| MRC80HD | 57,46 | 0,14 | 0,78 | 3529,41 | 3333,33 | 3246,75 |
| MRC80HD | 56,24 | 0,03 | 1,18 | 3529,41 | 3333,33 | 3246,75 |
| MRC80HD | 58,23 | 0,09 | 1,33 | 3529,41 | 3333,33 | 3246,75 |
| MRC80HD | 58,99 | 0,09 | 1,74 | 3529,41 | 3333,33 | 3246,75 |
| MRC80HD | 55,43 | 0,21 | 2,37 | 3529,41 | 3333,33 | 3246,75 |
| CCSH224HD | 57,51 | -0,11 | 5,48 | 2211,98 | 2056,45 | 2047,24 |
| CCSH224HD | 58,15 | -0,2 | 5,51 | 2211,98 | 2056,45 | 2047,24 |
| CCSH224HD | 58,98 | -0,01 | 5,92 | 2211,98 | 2056,45 | 2047,24 |
| CCSH224HD | 55,38 | -0,17 | 4,88 | 2211,98 | 2056,45 | 2047,24 |
| CCSH224HD | 55,23 | 0,07 | 5,61 | 2211,98 | 2056,45 | 2047,24 |
| CCSH224HD | 57,93 | -0,49 | 4,54 | 2066,12 | 2016,13 | 1946,56 |
| CCSH224HD | 55,21 | -0,21 | 4,77 | 2066,12 | 2016,13 | 1946,56 |
| CCSH224HD | 56,93 | -0,29 | 5,7 | 2066,12 | 2016,13 | 1946,56 |
| CCSH224HD | 57,11 | -0,31 | 5,42 | 2066,12 | 2016,13 | 1946,56 |
| CCSH224HD | 54,51 | -0,14 | 5,55 | 2066,12 | 2016,13 | 1946,56 |
| CCSRC70HD | 57,53 | -0,44 | 4,12 | 2906,98 | 2538,86 | 2463,05 |
| CCSRC70HD | 57,55 | -0,47 | 4,08 | 2906,98 | 2538,86 | 2463,05 |
| CCSRC70HD | 57,83 | -0,29 | 4,29 | 2906,98 | 2538,86 | 2463,05 |
| CCSRC70HD | 58,42 | -0,44 | 4,61 | 2906,98 | 2538,86 | 2463,05 |
| CCSRC70HD | 55,55 | -0,27 | 5,09 | 2906,98 | 2538,86 | 2463,05 |
| CCSRC70HD | 55,6 | -0,41 | 2,82 | 1992,19 | 1991,70 | 1760,80 |
| CCSRC70HD | 58,5 | -0,52 | 3,34 | 1992,19 | 1991,70 | 1760,80 |
| CCSRC70HD | 57,68 | -0,48 | 3,51 | 1992,19 | 1991,70 | 1760,80 |
| CCSRC70HD | 57,86 | -0,53 | 3,26 | 1992,19 | 1991,70 | 1760,80 |
| CCSRC70HD | 57,69 | -0,45 | 4,81 | 1992,19 | 1991,70 | 1760,80 |
| CCSRC80HD | 57,49 | -0,52 | 3,2 | 2670,16 | 2380,95 | 2152,47 |
| CCSRC80HD | 57,88 | -0,53 | 3,32 | 2670,16 | 2380,95 | 2152,47 |
| CCSRC80HD | 57,55 | -0,44 | 3,48 | 2670,16 | 2380,95 | 2152,47 |
| CCSRC80HD | 58,78 | -0,49 | 3,45 | 2670,16 | 2380,95 | 2152,47 |
| CCSRC80HD | 56,68 | -0,54 | 3,7 | 2670,16 | 2380,95 | 2152,47 |
| CCSRC80HD | 57,87 | -0,44 | 2,86 | 2462,31 | 2283,11 | 2076,27 |
| CCSRC80HD | 55,91 | -0,29 | 3,32 | 2462,31 | 2283,11 | 2076,27 |
| CCSRC80HD | 55,59 | -0,26 | 4,06 | 2462,31 | 2283,11 | 2076,27 |
| CCSRC80HD | 58,82 | -0,36 | 3,23 | 2462,31 | 2283,11 | 2076,27 |
| CCSRC80HD | 58,4 | -0,51 | 3,6 | 2462,31 | 2283,11 | 2076,27 |
| LCSH224HD | 64,01 | -0,06 | 3,79 | 3086,42 | 2688,17 | 2227,07 |
| LCSH224HD | 64,51 | -0,15 | 4,03 | 3086,42 | 2688,17 | 2227,07 |
| LCSH224HD | 63,59 | -0,25 | 4,17 | 3086,42 | 2688,17 | 2227,07 |

| <i>Denominación</i> | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>Vx</i> | <i>Vy</i> | <i>Vz</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| LCSH224HD | 63,17 | -0,16 | 4,34 | 3086,42 | 2688,17 | 2227,07 |
| LCSH224HD | 60,92 | -0,13 | 3,57 | 3086,42 | 2688,17 | 2227,07 |
| LCSH224HD | 61,51 | -0,19 | 3,67 | 3024,69 | 2824,86 | 2157,68 |
| LCSH224HD | 62,60 | -0,02 | 5,00 | 3024,69 | 2824,86 | 2157,68 |
| LCSH224HD | 63,42 | 0,03 | 4,67 | 3024,69 | 2824,86 | 2157,68 |
| LCSH224HD | 64,59 | -0,10 | 4,50 | 3024,69 | 2824,86 | 2157,68 |
| LCSH224HD | 60,50 | 0,11 | 5,51 | 3024,69 | 2824,86 | 2157,68 |
| LCSRC70HD | 64,38 | -0,01 | 3,04 | 3248,41 | 2857,14 | 1953,13 |
| LCSRC70HD | 64,00 | 0,02 | 3,89 | 3248,41 | 2857,14 | 1953,13 |
| LCSRC70HD | 62,68 | 0,05 | 3,84 | 3248,41 | 2857,14 | 1953,13 |
| LCSRC70HD | 64,70 | -0,02 | 4,67 | 3248,41 | 2857,14 | 1953,13 |
| LCSRC70HD | 63,39 | 0,11 | 5,69 | 3248,41 | 2857,14 | 1953,13 |
| LCSRC70HD | 63,78 | -0,11 | 2,36 | 3184,71 | 2702,70 | 2000,00 |
| LCSRC70HD | 65,08 | -0,10 | 2,58 | 3184,71 | 2702,70 | 2000,00 |
| LCSRC70HD | 67,24 | -0,03 | 3,31 | 3184,71 | 2702,70 | 2000,00 |
| LCSRC70HD | 65,71 | 0,05 | 3,72 | 3184,71 | 2702,70 | 2000,00 |
| LCSRC70HD | 62,17 | -0,11 | 3,42 | 3184,71 | 2702,70 | 2000,00 |
| LCSRC80HD | 61,17 | 0,18 | 3,01 | 3048,78 | 2931,03 | 2136,75 |
| LCSRC80HD | 62,69 | 0,12 | 2,93 | 3048,78 | 2931,03 | 2136,75 |
| LCSRC80HD | 61,84 | 0,13 | 3,27 | 3048,78 | 2931,03 | 2136,75 |
| LCSRC80HD | 62,27 | 0,18 | 3,56 | 3048,78 | 2931,03 | 2136,75 |
| LCSRC80HD | 62,97 | 0,01 | 6,22 | 3048,78 | 2931,03 | 2136,75 |
| LCSRC80HD | 65,74 | -0,06 | 5,51 | 3148,15 | 2824,86 | 2074,69 |
| LCSRC80HD | 64,55 | 0,23 | 6,00 | 3148,15 | 2824,86 | 2074,69 |
| LCSRC80HD | 64,10 | -0,03 | 4,34 | 3148,15 | 2824,86 | 2074,69 |
| LCSRC80HD | 63,64 | 0,10 | 5,46 | 3148,15 | 2824,86 | 2074,69 |
| LCSRC80HD | 62,44 | -0,32 | 4,30 | 3148,15 | 2824,86 | 2074,69 |
| LCSRC80HD | 68,58 | -0,28 | 1,50 | 3148,15 | 2824,86 | 2074,69 |
| LCSRC80HD | 67,18 | -0,31 | 2,33 | 3148,15 | 2824,86 | 2074,69 |

