

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES PUZOLÁNICAS DE MATERIALES DE ORIGEN VOLCÁNICO UBICADOS EN LA ZONA SURESTE DE ESPAÑA

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela Por el Br.
Estévez Fernández, Esteban para
Optar al título de Ingeniero de Minas

Caracas, Julio de 2005

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES PUZOLÁNICAS DE MATERIALES DE ORIGEN VOLCÁNICO UBICADOS EN LA ZONA SURESTE DE ESPAÑA

Tutor Académico: Prof. Isidoro Moyano Encinas

Tutor Industrial: Dr. Benjamín Calvo Pérez

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela Por el Br.
Estévez Fernández, Esteban para
Optar al título de Ingeniero de Minas

Caracas, Julio de 2005

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer especialmente a la profesora Mónica Martiz, directora de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela por su valiosa y desinteresada colaboración hacia mi persona, al profesor Don Benjamín Calvo Pérez por toda la ayuda prestada y por dirigir este Proyecto Fin de Carrera, al Ingeniero geólogo Don Jorge Luis Costafreda Mustelier por su amistad y colaboración para la realización de esta investigación y a todo el personal del Laboratorio Oficial para Ensayo de Materiales de Construcción (LOEMCO).

A Maria Alejandra Estévez.

Estévez F, Esteban

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES PUZOLÁNICAS DE MATERIALES DE ORIGEN VOLCÁNICO UBICADOS EN LA ZONA SURESTE DE ESPAÑA

**Tutor académico: Prof. Isidoro Moyano. Tutor Industrial: Dr. Benjamín Calvo
Pérez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología,
Minas y Geofísica. Departamento de Minas. 2005, 147 páginas.**

Palabras claves: Roca calizas, propiedades puzolanicas, Índice de Keil modificado, cementos.

Resumen: Este trabajo de investigación tiene por objeto el determinar las propiedades puzolánicas de materiales de origen volcánico ubicados en la zona sureste de España. Se han realizado estudios de las características composicionales de los materiales en cuestión y ensayos mecánicos y químicos de puzolanidad a nueve muestras de distintas litologías tomadas en la zona de estudio, para determinar su comportamiento puzolánico. Para realizar el estudio se emplearon los ensayos del Índice de Keil modificado, ensayos de resistencia a la compresión según la norma española UNE-EN 196-1 y ensayos químicos de puzolanidad según la norma española UNE-EN 196-5; que se estimó los más adecuados para determinar las propiedades puzolánicas de éstas rocas.

Los ensayos realizados demostraron que varias de las muestras estudiadas poseen buenas propiedades puzolánicas y que cumplen con las exigencias mecánicas y químicas de puzolanidad para la fabricación de cementos tipo CEM II, CEM IV y en algunos casos sus correspondientes resistentes a los sulfatos (SR) y resistentes al agua de mar (MR). De los resultados obtenidos puede concluirse que los materiales de origen volcánico estudiados son de suma importancia, ya que demostraron poseer las propiedades puzolánicas aptas para la fabricación de cementos con características puzolánicas.

Es muy importante tener en cuenta que para que realmente se puedan fabricar cementos con estos materiales, las muestras ensayadas deben cumplir todas las exigencias de la norma española UNE EN 197-1, por lo que se recomienda realizar todos los ensayos mecánicos, físicos, químicos y de durabilidad a las muestras que demostraron tener unas mejores propiedades puzolánicas, para comprobar si

efectivamente se pueden fabricar cementos con características puzolánicas que cumplan con las normativas vigentes.

ÍNDICE GENERAL

	pp.
LISTA DE TABLAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
CAPITULO I	
EL PROBLEMA	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Objetivos y alcance	2
CAPITULO II	
ANTECEDENTES	4
CAPITULO III	
PUZOLANAS	7
3.1 Definición	7
3.2 Tipos de puzolanas	7
3.3 Clasificación de las puzolanas naturales	8
3.4 Composición química típica de las puzolanas naturales	10
3.5 Propiedades de las puzolanas	11
3.6 Principales usos de las puzolanas	11
CAPITULO IV	
CEMENTOS	13
4.1 Definición	14
4.2 Composición	15
4.3 Tipos de cementos	21
4.4 Cementos con características adicionales	24
4.5 Exigencias mecánicas para los cementos comunes	30
4.6 Influencia del cemento en las propiedades del hormigón	30
4.7 Índice de Keil modificado	32

CAPITULO V	
MARCO GEOLOGICO	34
5.1 Introducción	34
5.2 Zonas Externas o Dominio Sudibérico	36
5.3 Zonas Internas o Dominio de Alborán	38
CAPITULO VI	
REGIÓN VOLCÁNICA NEÓGENA DEL SURESTE DE ESPAÑA	41
6.1 Introducción	41
6.2 Mineralogía y petrología	44
6.3 Geoquímica	46
CAPITULO VII	
MARCO METODOLOGICO	49
7.1 Selección de los puntos de muestreo	49
7.2 Trabajo de campo	50
7.3 Tipo de muestreo	51
7.4 Trabajo de laboratorio	52
CAPITULO VIII	
RESULTADOS	67
ANÁLISIS DE RESULTADOS	77
CONCLUSIONES	86
RECOMENDACIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXOS	95

LISTA DE TABLAS

	pp.
1 Composición química típica de las puzolanas volcánicas	10
2 Composición química típica de las puzolanas sedimentarias orgánicas	11
3 Familia de cementos comunes	22
4 Cementos resistentes a los sulfatos	26
5 Cementos resistentes al agua de mar	29
6 Exigencias mecánicas de compresión para los cementos comunes	30
7 Evaluación de calidad de un material como puzolana según el ensayo de Índice de Keil modificado a los 7 días de edad de los morteros	33
8 Evaluación de calidad de un material como puzolana según el ensayo de Índice de Keil modificado a los 28 días de edad de los morteros	33
9 Composición química media de las muestras analizadas	67
10 Resistencia a la compresión a los 28 días	68
11 Resistencia a la flexión a los 28 días	70
12 Índice de actividad resistente (IAR)	72
13 Resultados del ensayo del Índice de Keil modificado	74
14 Ensayo químico de puzolanidad a 7 días	75
15 Tipos de cemento que se pueden fabricar con una relación 70% CR, 30% P	80
16 Tipos de cemento que se pueden fabricar con una relación 75% CR, 25% P	81

LISTA DE FIGURAS

	pp.	
1	Mapa de ubicación geográfica de la zona de estudio	6
2	Mapa geológico de la región	36
3	Localización de la región volcánica neógena del sureste de España	43
4	Machacadora de mandíbulas marca Alas	54
5	Machacadora de mandíbulas marca Controls	55
6	Molino vibratorio marca Siebtechnik	56
7	Aspecto de la granulometría del material luego de la molienda y el tamizado	57
8	Amasadora marca Suzpecar	59
9	Compactadora de sacudidas marca Bonfiglioli	59
10	Probetas desmoldadas e identificadas	60
11	Flexímetro marca Ibertest	60
12	Máquina para realizar los ensayos a compresión	61
13	Equipo de vacío para el filtrado	62
14	Tonalidad amarilla luego de agregar el indicativo de naranja de metilo	63
15	Tonalidad rosado claro luego de valorar con ácido clorhídrico	64
16	Tonalidad púrpura luego de agregar el indicador de murexida	65
17	Tonalidad morada luego de valorar con la disolución de EDTA	65
18	Diagrama para la determinación de la puzolanidad	66
19	Gráfica de los resultados de resistencia a la compresión	69
20	Gráfica de los resultados de resistencia a la flexión	71
21	Gráfica comparativa del índice de actividad resistente	73
22	Diagrama para la determinación de la puzolanidad (resultados)	76

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

La industria del cemento es particularmente susceptible a las materias primas, pues de ellas depende el tipo y características del cemento producido y la posibilidad de optimización del proceso de fabricación. La tendencia mundial de esta industria está fuertemente orientada a la intensiva utilización de los aditivos. Las ventajas para el consumidor final se resumen en una mayor diversificación de la oferta en términos de calidad y precio.

La diversidad de aplicaciones que tiene el cemento en la actualidad hace que sea necesario elaborar productos de diferentes características, obedeciendo a las distintas necesidades de resistencia mecánica y química, color, tiempos de fraguado y costes, entre otras. Para lograrlo se requiere utilizar, en su elaboración, sustancias naturales o sintéticas que impriman al cemento las propiedades requeridas. Esta función la cumplen las llamadas adiciones. Dentro de las adiciones están las puzolanas.

Los cementos con adición de puzolanas presentan particularidades distintas con respecto al cemento Pórtland tradicional, lo que los hace muy convenientes para diferentes aplicaciones. El bajo calor de hidratación de estos cementos implica menor utilización de agua para curado. Sus hormigones presentan una excelente resistencia al ataque químico por aguas con acidez mineral; sin embargo, si se desea una mayor protección de las armaduras contra la corrosión metálica deberá emplearse preferentemente cemento Pórtland.

1.2 Objetivos y alcance

El siguiente proyecto tiene como objetivo general el estudio, mediante ensayos mecánicos y químicos, de las propiedades puzolánicas de materiales de origen volcánico de la región sureste de España; con la finalidad de demostrar si algunos de estos tipos de rocas son aptas para la fabricación de cementos con propiedades puzolánicas.

Como objetivos específicos pueden establecerse los siguientes:

- Caracterizar geológicamente la zona de estudio.
- Identificar las características mineralógicas, petrológicas y geoquímicas de las rocas que conforman la formación volcánica del sureste de España.
- Recolectar muestras de diferentes litologías en los puntos ubicados para tal fin.
- Someter las muestras seleccionadas al ensayo del Índice de Keil Modificado.
- Someter las muestras seleccionadas a ensayos mecánicos de resistencia a la compresión y ensayos químicos de puzolanidad según normas europeas.
- Determinar las propiedades puzolánicas de las muestras elegidas.
- Determinar qué tipos de cementos pueden fabricarse con estos materiales.
- Proponer acciones subsiguientes para asegurar la disponibilidad y explotabilidad de las rocas seleccionadas, con vistas a su posible aprovechamiento en la fabricación de cementos puzolánicos (tipo IV) y cementos con adición de puzolanas (tipo II).

En la realización de esta investigación se estudiará la determinación de las propiedades puzolánicas de los materiales estudiados así como la factibilidad de su aprovechamiento teniendo en cuenta las principales características de los yacimientos encontrados (reservas, calidad, acceso, distancia a la planta), para la fabricación de distintos tipos de cementos. También se tomarán en cuenta las propiedades

mecánicas y las composiciones geoquímicas, mineralógicas y petrológicas de los materiales estudiados, ya que éstas son determinantes en el comportamiento puzolánico de las muestras.

Las propiedades físicas y químicas de los cementos elaborados con estas muestras no son determinantes en el comportamiento puzolánico de los materiales estudiados; por lo tanto, por motivos de tiempo y de extensión de este proyecto, no se contemplarán entre los ensayos realizados a las diferentes muestras.

CAPITULO II

ANTECEDENTES

Este estudio tiene su origen en la petición de la empresa HOLCIM de realizar pruebas a estos materiales, con el fin de determinar la existencia de posibles yacimientos de rocas que posean propiedades puzolánicas y así poder fabricar cementos tipo IV, o mejorar las características puzolánicas de algunos cementos tipo II, en su fábrica de Carboneras (Almería) o en otras fábricas situadas en el sureste español. La zona de estudio (radio de 200 kilómetros entre las ciudades de Murcia y Almería), se planteó de tal manera que, a priori, la distancia del yacimiento a la planta, las condiciones de extracción, el coste de transporte, etc., permitan pensar en su posible aprovechamiento.

El estudio de los materiales puzolánicos es de suma importancia para las empresas cementeras y la industria de la construcción en general; dichos materiales proporcionan a los cementos unas propiedades muy importantes, tales como: menor calor de hidratación, mayor dureza final, mayor resistencia química; que son muy importantes para la industria de la construcción; y también porque presentan ciertas ventajas con respecto al cemento Pórtland ordinario, entre las cuales se pueden citar: reducción de los gastos de producción, incremento de la capacidad de la planta e inhibición de la reacción nociva álcali/árido.

Fue conocimiento de los antiguos griegos las propiedades cementicias que en mezcla húmeda con la cal poseía la llamada “Tierra de Santorín”. Sin embargo, se debe a los romanos, siglos más tarde, el empleo de modo generalizado de los morteros hechos de cal y cenizas volcánicas del Vesubio. Testigos irrefutables de las propiedades de estos materiales son las obras romanas que han perdurado hasta hoy en excelentes condiciones, resistiendo con éxito el ataque de los agentes meteóricos,

el agua de mar e incluso de los animales litófagos; como ejemplo, citamos las columnas revestidas de cenizas vesubianas en el llamado Templo de Serapis en Puzzuoli, Italia, las cuales permanecieron intactas después de varios siglos sumergidas en el mar. El nombre de esta pequeña ciudad cercana a Nápoles aportó el de estos materiales: puzolanas.

Específicamente en la zona de estudio no se han realizado investigaciones anteriores sobre las propiedades puzolánicas de los materiales de origen volcánico que ahí se encuentran. El trabajo más reciente y de mayor importancia que se ha realizado en la zona se titula “LA REGIÓN VOLCÁNICA NEÓGENA DEL SURESTE DE ESPAÑA” (1980), por J. López Ruiz y E. Rodríguez Badiola, el cual aunque no aporta información sobre las propiedades puzolánicas de los materiales de la zona, sí aporta información muy importante acerca de los tipos de volcanismos ocurridos y sobre la mineralogía, petrología y geoquímica de estos materiales.

Algunos antecedentes de determinación de propiedades puzolánicas de materiales de origen volcánico, aunque no sean de la zona de estudio en particular, son el proyecto fin de carrera de Puente Castillo, Marta Beatriz; titulado “ELABORACIÓN DE MORTEROS CON ZEOLITA” (2004), de la ETSIM, UPM; en este proyecto se realizaban ensayos mecánicos de resistencia a la compresión de mezclas de cemento con zeolita a diferentes proporciones; y el proyecto fin de carrera que dio lugar a una publicación de Alique, O.; Cambroner, L.; Moraño, A.; y Ruiz-Román, J.M.; titulado “ESTUDIO SOBRE LA APLICABILIDAD DE MATERIALES VOLCÁNICOS DE CARÁCTER ÁCIDO PROCEDENTES DE EL SALVADOR COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN”, de la ETSIM, UPM; en este trabajo se realizan ensayos mecánicos y químicos de determinación de puzolanicidad en mezclas de cemento con material de origen volcánico tanto meteorizado como molido.

La zona de estudio se encuentra ubicada en el sureste de España, específicamente en la región comprendida entre las ciudades de Murcia y Almería (ver figura 1); y el acceso se realiza por medio de una red de carreteras del Estado, entre las que se encuentran la A-7, A-334, A-3211, A-3319, A-92N, N-341, N-340, N-332, MU-602; que comunican al área con el resto de las localidades colindantes.



Figura 1: Mapa de ubicación geográfica de la zona de estudio

CAPITULO III

PUZOLANAS

3.1 Definición

La puzolana es un material silíceo o sílico-aluminoso que por sí solo no posee o posee muy pocas propiedades cementantes. Finamente molido y en presencia de agua, el material reacciona químicamente a temperatura ambiente con el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 del clínker del cemento Pórtland para formar compuestos con propiedades cementantes (fuerte desarrollo de minerales de silicatos cálcicos y aluminatos cálcicos).

3.2 Tipos de puzolanas

3.2.1 Puzolanas naturales

- Depósitos piroclásticos, esencialmente vítreos: ignimbrita, obsidiana, piedra pómez, cenizas volcánicas (tobas).
- Rocas volcánicas porfídicas: riolitas, fonolitas, etc.
- Vidrios alterados hidrotermalmente por rocas volcánicas.
- Zeolitas procedentes de transformación de rocas volcánicas.
- Sedimentos clásticos: cherts y pizarras opalinas, diatomitas, lutitas y pizarras ampolíticas.

3.2.2 Puzolanas naturales activadas

- Arcillas calcinadas (burnt clay).
- Rocas volcánicas calcinadas.

- Metacaolines.
- Pizarras y margas calcinadas.

3.2.3 Puzolanas artificiales

- Escoria de alto horno, granulada.
- Cualquier otra escoria enfriada rápidamente.
- Cenizas volantes (cenizas de lignito o antracita de centrales térmicas).
- Cenizas de fondo (cenizas pulverizadas de centrales térmicas).
- Humos de sílice (residuos ricos en SiO_2 de la industria silíceo o ferrosilíceo).
- Cenizas de arroz.
- Barros calcinados.
- Ladrillos de arcilla pulverizados.

3.3 Clasificación de las puzolanas naturales

3.3.1 Cuerpos de roca volcánica calco-alkalina cuaternaria

A) Depósitos de vidrio piroclástico:

- El componente predominante es vidrio inalterado (por ejemplo: ignimbrita, obsidiana, piedra pómez, cenizas volcánicas).
- Vidrio reactivo originado por erupciones explosivas en las que se produce un enfriamiento rápido que impide la cristalización.
- Las partículas vítreas tienen gran superficie interna, que favorece la reactividad.
- La presencia de álcalis favorece una estructura de vidrio más abierta y, en consecuencia, un tipo de puzolana más reactiva.

B) Rocas volcánicas porfídicas:

- Rocas volcánicas con vidrio en las que predominan fenocristales silico-aluminosos (por ejemplo las riolitas).
- Contienen materiales arcillosos debido a la alteración feldespática (principalmente caolinita pero también montmorillonita).
- Los minerales arcillosos tienen un efecto negativo en la actividad hidráulica.

C) Rocas volcánicas alteradas hidrotermalmente:

- Rocas de vítreas con cuarzo microcristalino y fenocristales de cuarzo (por ejemplo: riolita hidrotermalmente alterada).
- Rocas volcánicas con alto contenido de sílice.
- Este grupo abarca el material volcánico alto en sílice que ha sufrido considerables alteraciones químicas debido a la circulación de gases y soluciones acuosas en los depósitos (la lixiviación natural causa la completa desintegración feldespática y genera una gran superficie interna).

D) Rocas volcánicas zeolíticas:

- Rocas volcánicas con zeolitas bien cristalizadas y libres de cuarzo (por ejemplo la fonolita).
- La reactividad se debe principalmente a la inclusión de zeolitas primarias o al vidrio parcialmente zeolitizado, el cual es muy sensible a cualquier tipo de reacción.

3.3.2 Sedimentos

A) Sedimentos ricos en sílice:

- Sedimentos ricos en sílice que contienen principalmente esqueletos de organismos vivientes como las radiolaritas o las diatomitas.
- Estos conducen a una estructura extremadamente porosa.
- Estas rocas son a menudo roca almacén para petróleo y se usan como aditivos hidráulicos después de la extracción del petróleo.
- Un tratamiento térmico a baja temperatura se usa generalmente para incrementar la reactividad.

B) Arcillas de alto contenido en materia orgánica:

- Arcillas negras no consolidadas que contienen material orgánico (por ejemplo la lutita y pizarra ampelítica). La reactividad se debe principalmente a la presencia de pequeñas partículas orgánicas que pueden considerarse como relleno.

3.4 Composición química típica de las puzolanas naturales

A continuación se presentan las tablas 1 y 2, en las cuales se expresan los valores medios de composición química típica de las puzolanas naturales.

Tabla 1: Composición química típica de las puzolanas volcánicas

(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Variación	42-73	10-20	1-14	0-12	0-11	1-5	1-5	0-0,5
Promedio	57,4	15,8	5,5	4,7	2,1	3,2	3,1	-

FUENTE: "Puzolanas en los alrededores de Irra" Tobón, Jorge Iván.

Tabla 2: Composición química típica de las puzolanas sedimentarias orgánicas

(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Variación	42-58	13-19	4-14	1-12	1-11	1-7	1-7	-
Promedio	57,4	15,8	5,5	4,7	2,1	3,2	3,1	-

FUENTE: “Puzolanas en los alrededores de Irra” Tobón, Jorge Iván.

3.5 Propiedades de las puzolanas

Los cambios significativos que las propiedades de las puzolanas aportan a los cementos puzolánicos comparados con el cemento Pórtland ordinario son:

- Menor calor de hidratación.
- Mayor dureza final.
- Endurecimiento más lento.
- Curado más duradero.
- Menor pH.

Los beneficios son:

- Reducción de los gastos de producción.
- Incremento de la capacidad de la planta.
- Prevención de la expansión excesiva, como resultado de la reacción entre ciertos agregados y álcalis en mezclas de cemento Pórtland.

3.6 Principales usos de las puzolanas

Actualmente los principales usos de las puzolanas son los siguientes:

- En vías de comunicación, como áridos antideslizantes, y también como relleno en las capas de rodadura.

- Como elemento o aditivo filtrante-drenante (en caminos, campos de deporte, jardines y otros).
- Como materia prima para prefabricados: bóvedas, bovedillas, tubos de drenaje y otros.
- En suelo-cemento.
- En zonas con problemas de estanqueidad (inyecciones).
- En la preparación de áridos ligeros.
- Como abrasivos.
- Como aislante, evitando la transmisión de humedad.
- Fabricación de cementos puzolánicos.
- Fabricación de hormigones.

CAPITULO IV

CEMENTOS

Las propiedades y el comportamiento del hormigón dependen en gran parte de su componente más activo: el cemento.

Como consecuencia, la elección del cemento más adecuado en cada caso tiene gran repercusión técnica y económica para el hormigón.

Ante una gran variedad de cementos disponibles es preciso distinguir entre los de utilización general y los idóneos para usos específicos, y la distinción se debe hacer en términos de resistencia mecánica, estabilidad de volumen y durabilidad.

Los cementos para usos específicos han de cumplir requisitos que no tienen por qué ser impuestos innecesaria y antieconómicamente a los de utilización general.

En la elección de los cementos se debe evitar la incompatibilidad entre exigencias con respecto a las características antagónicas, o aceptar un compromiso entre ellas, en relación con el hormigón que se pretende obtener.

Es sabido que la durabilidad del hormigón depende ante todo de su compacidad (impermeabilidad, impenetrabilidad a fluidos e iones), y también de la elección del cemento más adecuado para cada circunstancia. Esta segunda dependencia es, en general, de menor peso que la primera, hasta el punto de que un hormigón compacto e impermeable, muy poco poroso, hecho con un cemento que no sea el más adecuado, resiste más y mejor en un determinado medio agresivo que otro hormigón que, hecho con el cemento más idóneo, y a igualdad de todo lo demás, sea más poroso, esto es, menos denso, compacto e impermeable.

4.1 Definición

Según la norma UNE-EN 197-1:2000 [1], el cemento es un aglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.

El cemento, conforme con esta parte de la norma europea, denominado cemento CEM, será capaz, cuando se dosifica y mezcla apropiadamente con agua y áridos, de producir un hormigón o un mortero que conserve su trabajabilidad durante tiempo suficiente y debe alcanzar, al cabo de periodos definidos, los niveles especificados de resistencia y presentar también estabilidad de volumen a largo plazo.

El endurecimiento hidráulico del cemento CEM se debe principalmente a la hidratación de los silicatos de calcio, aunque también pueden participar en el proceso de endurecimiento otros compuestos químicos, como por ejemplo, los aluminatos. La suma de las proporciones de óxido de calcio reactivo (CaO) y de dióxido de silicio reactivo (SiO₂) en el cemento CEM será de al menos del 50 % en masa, cuando las proporciones se determinen conforme con la norma española UNE-EN 196-2:1994.

Los cementos CEM están compuestos por diferentes materiales y son estadísticamente homogéneos en composición como consecuencia de una calidad asegurada durante el proceso de producción y manejo. La relación entre estos procesos de producción y manejo y la conformidad del cemento con esta parte de la norma europea se desarrollan en la norma española UNE-EN 197-2:2000.

4.2 Composición

Las exigencias de los componentes especificadas en los apartados siguientes se determinarán, en principio, siguiendo los métodos de ensayo descritos en las normas europeas EN 196, a menos que se especifique otra cosa.

4.2.1 Componentes principales

4.2.1.1 Clínker de cemento Pórtland (K)

El clínker de cemento Pórtland se obtiene por sinterización de una mezcla de materias primas especificada con precisión (crudo, pasta o harina) conteniendo elementos, expresados normalmente en forma de óxidos, CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y pequeñas cantidades de otras materias. El crudo, pasta o harina, está finamente dividido, íntimamente mezclado, y es, por tanto homogéneo.

El clínker de cemento Pórtland es un material hidráulico que debe estar constituido al menos en dos tercios de su masa por silicatos de calcio 3CaO.SiO₂ y 2CaO.SiO₂, estando constituido el resto por fases del clínker conteniendo aluminio, hierro y otros compuestos. La relación en masa (CaO)/(SiO₂) no será menor de 2. El contenido de óxido de magnesio (MgO) no excederá del 5 % en masa.

4.2.1.2 Escoria granulada de horno alto (S)

La escoria granulada de horno alto se obtiene por enfriamiento rápido de una escoria fundida de composición adecuada, obtenida por la fusión del mineral de hierro en un horno alto y constituida al menos en dos tercios de su masa por escoria vítrea y que posee propiedades hidráulicas cuando se activa de manera adecuada.

La escoria granulada de horno alto debe estar constituida al menos en dos tercios de su masa por la suma de óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y dióxido de silicio (SiO₂). El resto contiene óxido de aluminio (Al₂O₃) junto con pequeñas cantidades de otros compuestos. La relación en masa (CaO + MgO)/SiO₂ será superior a 1.

4.2.1.3 Materiales puzolánicos (P, Q)

Los materiales puzolánicos son sustancias naturales de composición silíceo o silico-aluminosa o combinación de ambas. Aunque las cenizas volantes y el humo de sílice tienen propiedades puzolánicas, estos materiales están especificados en otros apartados.

Los materiales puzolánicos no endurecen por sí mismos cuando se amasan con agua, pero finamente molidos y en presencia de agua reaccionan, a temperatura ambiente, con el hidróxido de calcio disuelto [Ca(OH)₂] para formar compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia. Estos compuestos son similares a los que se forman durante el endurecimiento de los materiales hidráulicos. Las puzolanas están compuestas esencialmente por dióxido de silicio reactivo (SiO₂) y óxido de aluminio (Al₂O₃). El resto contiene óxido de hierro (Fe₂O₃) y otros óxidos. La proporción de óxido de calcio reactivo (CaO) es de poca importancia para el endurecimiento. El contenido de dióxido de silicio reactivo (SiO₂) no será menor del 25 % en masa.

Los materiales puzolánicos se deben preparar correctamente, es decir, deben ser seleccionados, homogeneizados, secados o tratados térmicamente y pulverizados, dependiendo de su estado de producción o de suministro.

- **Puzolana natural (P).** Las puzolanas naturales son normalmente materiales de origen volcánico o rocas sedimentarias con composición

química y mineralógica adecuadas, conformes con definición dada en el apartado anterior.

- **Puzolana natural calcinada (Q).** Las puzolanas naturales calcinadas son materiales de origen volcánico, arcillas, esquistos o rocas sedimentarias activadas por tratamiento térmico, y conformes con la definición dada en el apartado anterior.

4.2.1.4 Cenizas volantes (V, W)

Las cenizas volantes se obtienen por precipitación electrostática o mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por los flujos gaseosos de hornos alimentados con carbón pulverizado. Las cenizas obtenidas por otros métodos no se deberán emplear en los cementos conformes con esta parte de la norma europea.

Las cenizas volantes pueden ser de naturaleza silíceo o calcárea. Las primeras tienen propiedades puzolánicas; las segundas pueden tener, además, propiedades hidráulicas. La pérdida por calcinación de las cenizas volantes determinadas conforme a la norma europea EN 196-2:1994, pero empleando un tiempo de calcinación de 1 h, no excederá del 5 % en masa.

Las cenizas volantes con pérdida por calcinación del 5 % al 7 % en masa también se pueden aceptar con la condición de que cumplan las exigencias particulares de durabilidad, principalmente en lo que concierne a la resistencia al hielo, y la compatibilidad con los aditivos, conforme a las normas o reglamentos en rigor para hormigones o morteros en los lugares de utilización.

4.2.1.5 Esquisto calcinado (T)

El esquisto calcinado, particularmente el bituminoso, se produce en un horno especial a temperaturas de aproximadamente 800 °C. Debido a la composición del material natural y al proceso de producción, el esquisto calcinado contiene fases del clínker, principalmente silicato bicálcico y aluminato monocálcico. También contiene, además de pequeñas cantidades de óxido de calcio libre y de sulfato de calcio, mayores proporciones de óxidos puzolánicamente reactivos, especialmente dióxido de silicio. En consecuencia, en estado finamente molido el esquisto calcinado presenta propiedades hidráulicas pronunciadas, como las del cemento Pórtland, así como propiedades puzolánicas.

4.2.1.6 Caliza (L, LL)

Las calizas cumplirán las siguientes exigencias:

- a) El contenido de carbonato de calcio (CaCO_3), calculado a partir del contenido de óxido de calcio (CaO), no será inferior al 75 % en masa.
- b) El contenido de arcilla, determinado por el método de azul de metileno conforme a la norma europea EN 933-9 será menor de 1,20 g/100 g. Para este ensayo, la caliza estará molida a una finura aproximada de 5 000 cm^2/g , determinada como superficie específica conforme a la norma europea EN 196-6.
- c) El contenido de carbono orgánico total (TOC), determinado conforme a la norma europea prEN 13639:1999, cumplirá uno de los siguientes criterios:
 - LL: inferior al 0,20 % en masa.
 - L: inferior al 0,50 % en masa.

4.2.1.7 Humo de sílice (D)

El humo de sílice se origina por la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos de arco eléctrico utilizados para la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio; consiste en partículas esféricas muy finas que contienen al menos el 85 % en masa de dióxido de silicio amorfo.

El humo de sílice cumplirá las siguientes exigencias:

- a) La pérdida por calcinación no superará el 4 % en masa, determinada conforme a la norma europea EN 196-2 pero empleando un tiempo de calcinación de 1 h.
- b) La superficie específica (BET) del humo de sílice no tratado será al menos de 15 m²/g, determinada conforme a la norma internacional ISO 9277.

Para la molienda conjunta con clínker y yeso, el humo de sílice puede estar en su estado original o compactado o granulado (con agua).

4.2.2 Componentes minoritarios

Según la norma UNE-EN 197-1:2000 [1], los componentes minoritarios son materiales minerales naturales o materiales minerales derivados del proceso de fabricación del clínker, especialmente seleccionados, o componentes especificados en el apartado de los componentes principales, a menos que estén incluidos como componentes principales del cemento.

Los componentes minoritarios, mediante una preparación adecuada y en función de su granulometría, mejoran las propiedades físicas de los cementos (tales como la trabajabilidad o la retención de agua). Pueden ser inertes o poseer propiedades

ligeramente hidráulicas, hidráulicas latentes o puzolánicas. Sin embargo, no se especifican requisitos a este respecto.

Los componentes minoritarios estarán correctamente preparados, es decir, seleccionados, homogeneizados, secados y pulverizados, en función de su estado de producción o suministro. No aumentarán sensiblemente la demanda de agua del cemento, no disminuirán la resistencia al deterioro del hormigón o del mortero en ningún caso, ni reducirán la protección de las armaduras frente a la corrosión.

4.2.3 Sulfato de calcio

El sulfato de calcio se añade a los demás componentes del cemento durante su fabricación, para controlar el fraguado.

El sulfato de calcio puede ser yeso (sulfato de calcio dihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot (1/2)\text{H}_2\text{O}$), o anhidrita (sulfato de calcio anhidro CaSO_4), o cualquier mezcla de ellos. El yeso y la anhidrita se encuentran en la naturaleza. El sulfato de calcio también se puede obtener como subproducto de ciertos procesos industriales.

4.2.4 Aditivos

Los aditivos, son componentes no contemplados en los apartados anteriores, que se añaden para mejorar la fabricación o las propiedades del cemento.

La cantidad total de aditivos no excederá del 1 % en masa del cemento (a excepción de los pigmentos). La cantidad de aditivos orgánicos, determinada sobre residuo seco, no excederá del 0,5 % en masa del cemento.

Estos aditivos no deberán causar la corrosión de las armaduras ni alterar las propiedades del cemento ni de los morteros y hormigones con él fabricados.

4.3 Tipos de cemento

En la tabla 5-1 se presentan los 27 productos de la familia de cementos comunes, descritos por esta norma europea y su designación. Se agrupan en cinco tipos principales como se indica a continuación:

- CEM I Cemento pórtland.
- CEM II Cementos pórtland mixtos.
- CEM III Cementos de alto horno.
- CEM IV Cementos puzolánicos.
- CEM V Cementos compuestos.

La composición de cada uno de los 27 productos de la familia de cementos comunes deberá estar de acuerdo con la tabla 3.

Tipos principales	Designación de los 27 productos (tipos de cementos comunes)		Composición (proporción en masa ¹⁾)										Componentes minoritarios	
			Componentes principales									Componentes minoritarios		
			Clinker (K)	Escoria de horno alto (S)	Humo de sílice (D ²⁾)	Puzolana		Cenizas volantes		Esquistos calcinados (T)	Caliza			
Natural (P)	Natural calcinada (Q)	Silíceas (V)				Calcáreas (W)	(L)	(LL)						
CEM I	Cemento portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Pórtland con escoria	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Pórtland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Pórtland con puzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Pórtland con ceniza volante	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cemento Pórtland con esquistos calcinados	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cemento Pórtland con caliza	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Cemento Pórtland mixto ³⁾	CEM II/A-M	80-94	<-----6-20----->									0-5	
CEM II/B-M		65-79	<-----21-35----->									0-5		
CEM III	Cemento con escorias de horno alto	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cemento	CEM IV/A	65-89	-	<-----11-35----->					-	-	-	0-5	

	puzolánico ³⁾	CEM IV/B	45-64	-	<-----36-55----->	-	-	-	0-5
CEM V	Cemento compuesto ³⁾	CEM V/A	40-64	18-30	-	<-----18-30----->	-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	-	<-----31-50----->	-	-	0-5
<p>1) Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios (núcleo del cemento).</p> <p>2) El porcentaje de humo de sílice está limitado al 10 %.</p> <p>3) En cementos Pórtland mixtos CEM II/A-M y CEM II/B-M, en cementos puzolánicos CEM IV/A y CEM IV/B y en cementos compuestos CEM V/A y CEM V/B los compuestos principales además del clinker deben ser declarados en la designación del cemento.</p>									

Tabla 3: Familia de cementos comunes.
197-1:2000

FUENTE: Norma UNE-EN

4.4 Cementos con características adicionales

4.4.1 Cementos resistentes a los sulfatos (sr), norma española une 80303-1:2001

Esta norma tiene por objeto establecer las condiciones adicionales que han de cumplir los cementos comunes homólogos de los correspondientes de la norma UNE-EN 197-1 para que sean considerados resistentes a los sulfatos, así como los criterios de conformidad. Por otra parte, al tener estos cementos los mismos requisitos que los resistentes al agua de mar MR de la norma UNE 80303-2:2001, si bien más exigentes, se debe entender que todo cemento SR de esta norma es también MR, pero no a la inversa.

Según la norma UNE 80303-1:2001 [2], se consideran cementos resistentes a los sulfatos los cementos incluidos en la tabla 5-1, siempre que su clínker cumpla las condiciones señaladas en la misma, y los componentes puzolánicos satisfagan las especificaciones que se indican más adelante.

Las especificaciones generales en cuanto a composición y a exigencias mecánicas, físicas, químicas y de durabilidad relativas a los cementos comunes resistentes a los sulfatos son todas las correspondientes a los cementos comunes homólogos de la norma UNE-EN 197-1.

Las especificaciones adicionales o requisitos añadidos para los cementos comunes resistentes a los sulfatos son, en cuanto a su clínker, las limitativas de su contenido de aluminato tricálcico (C_3A) y de la suma de sus contenidos de aluminato tricálcico (C_3A) y ferrito-aluminato tetracálcico (C_4AF), señaladas en la tabla 4.

En cuanto a los materiales puzolánicos: cenizas volantes, puzolanas naturales y humo de sílice de los cementos que los contengan, las especificaciones son las siguientes:

- La relación $\text{SiO}_2/(\text{CaO} + \text{MgO})$, en tantos por ciento en masa, debe ser superior a 3,5; siendo CaO el óxido de calcio reactivo definido en la norma UNE-EN 197-1.
- La ceniza volante silíceo (V) o puzolana natural (P) molida a finura Blaine equivalente a la del cemento de referencia ($\pm 200 \text{ cm}^2/\text{g}$) y mezclada con este en proporción cemento/puzolana igual a 75/25 en masa, deberá cumplir el ensayo de puzolanicidad a la edad de 7 días, según el método de la norma UNE-EN 196-5.
- Esta mezcla 75/25 en masa deberá dar una resistencia a compresión a la edad de 28 días igual o superior al 75 % de la resistencia del cemento de referencia a la misma edad (índice de actividad resistente IAR), según el método de ensayo de la norma UNE-EN 196-1.

El cemento de referencia, tanto para el ensayo de puzolanicidad como para el de resistencia, será un I 42,5 R/SR.

Tabla 4: Cementos resistentes a los sulfatos

Tipos	Denominaciones		Subtipos (designaciones)	Especificaciones del clínker de los cementos SR					
				C ₃ A (%)	C ₃ A + C ₄ AF (%)				
I	Cementos Pórtland resistentes a los sulfatos		I	≤ 5	≤ 22				
II	Cementos portland con adiciones, resistentes a los sulfatos	Con escoria de horno alto (S)	II/A-S II/B-S	≤ 6	≤ 22				
		Con humo de sílice (D)	II/A-D						
		Con puzolana natural (P)	II/A-P II/B-P						
			Con ceniza volante			II/A-V II/B-V			
		III	Cementos con adiciones, resistentes a los sulfatos			Con escoria de alto horno (S)	III/A	≤ 8	≤ 25
							III/B	Ninguna ¹⁾	
III/C									
IV	Cementos puzolánicos (D + P + V)	IV/A	≤ 6	≤ 22					
IV/B		≤ 8	≤ 25						
V	Cementos compuestos (S + P + V)			V/A					

Nota – Los tipos y subtipos de los cementos se refieren a los homólogos definidos en la norma UNE-EN 197-1.

1) Los cementos CEM III/B y CEM III/C siempre son resistentes a los sulfatos.

FUENTE: Norma UNE 80303-1:2001.

4.4.2 Cementos resistentes al agua de mar (mr), norma española une 80303-2:2001

Esta norma tiene por objeto establecer las condiciones adicionales que han de cumplir los cementos comunes homólogos de los correspondientes de la norma UNE-EN 197-1 para que sean considerados como resistentes al agua de mar, así como los criterios de conformidad.

Según la norma UNE 80303-2:2001 [3], se consideran cementos resistentes al agua de mar los cementos incluidos en la tabla 5-1, siempre que su clínker cumpla las condiciones señaladas en la misma, y los componentes puzolánicos satisfagan las especificaciones que se indican más adelante.

Las especificaciones generales en cuanto a composición y a exigencias mecánicas, físicas, químicas y de durabilidad relativas a los cementos comunes resistentes a los sulfatos son todas las correspondientes a los cementos comunes homólogos de la norma UNE-EN 197-1.

Las especificaciones adicionales o requisitos añadidos para los cementos comunes resistentes al agua de mar son, en cuanto a su clínker, las limitativas de su contenido de aluminato tricálcico (C_3A) y de la suma de sus contenidos de aluminato tricálcico (C_3A) y ferrito-aluminato tetracálcico (C_4AF), señaladas en la tabla 5.

En cuanto a los materiales puzolánicos: cenizas volantes, puzolanas naturales y humo de sílice de los cementos que los contengan, las especificaciones son las siguientes:

- La relación $SiO_2/(CaO + MgO)$, en tantos por ciento en masa, debe ser superior a 3,5; siendo CaO el óxido de calcio reactivo definido en la norma UNE-EN 197-1.

- La ceniza volante silíceas (V) o puzolana natural (P) molida a finura Blaine equivalente a la del cemento de referencia ($\pm 200 \text{ cm}^2/\text{g}$) y mezclada con este en proporción cemento/puzolana igual a 75/25 en masa, deberá cumplir el ensayo de puzolanidad a la edad de 7 días, según el método de la norma UNE-EN 196-5.
- Esta mezcla 75/25 en masa deberá dar una resistencia a compresión a la edad de 28 días igual o superior al 75 % de la resistencia del cemento de referencia a la misma edad (índice de actividad resistente IAR), según el método de ensayo de la norma UNE-EN 196-1.

El cemento de referencia, tanto para el ensayo de puzolanidad como para el de resistencia, será un I 42,5 R/SR.

Tabla 5: Cementos resistentes al agua de mar

Tipos	Denominaciones		Subtipos (designaciones)	Especificaciones del clínker de los cementos SR					
				C ₃ A (%)	C ₃ A + C ₄ AF (%)				
I	Cementos Pórtland resistentes a los sulfatos		I	≤ 5	≤ 22				
II	Cementos portland con adiciones, resistentes al agua de mar	Con escoria de horno alto (S)	II/A-S II/B-S	≤ 8	≤ 25				
		Con humo de sílice (D)	II/A-D						
		Con puzolana natural (P)	II/A-P II/B-P						
			Con ceniza volante			II/A-V II/B-V			
		III	Cementos con adiciones, resistentes al agua de mar			Con escoria de alto horno (S)	III/A	≤ 10	≤ 25
							III/B	Ninguna ¹⁾	
III/C									
IV	Cementos con adiciones, resistentes al agua de mar	Cementos puzolánicos (D + P + V)	IV/A IV/B	≤ 8	≤ 25				
V		Cementos compuestos (S + P + V)	V/A	≤ 10	≤ 25				

Nota – Los tipos y subtipos de los cementos se refieren a los homólogos definidos en la norma UNE-EN 197-1.

1) Los cementos CEM III/B y CEM III/C siempre son resistentes al agua de mar.

FUENTE: Norma UNE 80303-2:2001

4.5 Exigencias mecánicas para los cementos comunes

Las exigencias mecánicas que deben tener los cementos comunes para cumplir con la norma europea que los rige, norma EN 196-1:1996, son las que vienen representadas en la tabla 6.

Tabla 6: Exigencias mecánicas de compresión para los cementos comunes

Clase de resistencia	Resistencia a compresión (MPa)	
	Resistencia normal	
	28 días	
32,5 N	≥32,5	≤52,5
32,5 R		
42,5 N	≥42,5	≤62,5
42,5 R		
52,5 N	≥52,5	
52,5 R		

FUENTE: Norma EN 197-1:2000

4.6 Influencia del cemento en las propiedades del hormigón

En el comportamiento del cemento en el hormigón influye considerablemente el curado del mismo, es decir, las condiciones de temperatura y humedad ambientales, así como el viento, a los que se ve sometido durante el período inmediato a su fraguado y en su primera etapa de endurecimiento. Esta influencia depende de las características físicas y químicas del cemento; de ahí que existan reglas, métodos y productos para proporcionar al hormigón condiciones adecuadas de curado, de forma que pueda desarrollar debidamente sus propiedades.

En cuanto a la humedad se refiere, los cementos, como conglomerantes hidráulicos que son, necesitan agua para su hidratación, la cual se suministra como agua del

amasado. Esta es más que suficiente, pero sus pérdidas por evaporación pueden hacer que llegue a no serlo, en cuyo caso la hidratación puede concluir prematuramente en sus primeros períodos, quedando sin terminar. Esta pérdida temprana de agua puede dar lugar a la retracción plástica, así como la pérdida posterior de agua en el hormigón fraguado y endurecido puede dar lugar a la retracción hidráulica o de secado, y en ambos casos a las correspondientes fisuraciones y agrietamiento del material.

Por lo que se refiere a la temperatura, el aumento de ésta incrementa la velocidad de las reacciones de hidratación como, en general, la de toda reacción química, de forma que, grosso modo, dicha velocidad se duplica cada vez que la temperatura aumenta en 10 °C, y se reduce a la mitad cada vez que disminuye en la misma medida. Por debajo de unos 5 °C la hidratación es muy lenta. De aquí que haya que interrumpir el hormigonado cuando la temperatura exterior, actual o previsible, sea suficientemente baja.

A temperaturas normales bajas se producen resistencias finales más altas, pero la velocidad con la que éstas se desarrollan es muy lenta. Por el contrario, a temperaturas más altas, por encima de 35 °C, el fraguado y el endurecimiento se aceleran, si bien las resistencias finales que se alcanzan son más bajas. No obstante, a veces interesa esta aceleración, sobre todo en la obtención industrial de prefabricados de hormigón. Ello se consigue mediante una combinación de acciones de la temperatura y de la humedad, en tratamientos hidrotérmicos, e higrotérmicos, bien con vapor libre, o a presión en autoclaves, o por otros sistemas de calentamiento del hormigón y/o de sus materiales.

En lo que respecta a las características del cemento que más influyen en el desarrollo de las resistencias del hormigón, éstas son la composición química y la finura. En general, cuanto mayor es la finura del cemento mayor es su velocidad de hidratación y de desarrollo de su resistencia a corto plazo (a igualdad de lo demás).

4.7 Índice de Keil modificado

El índice de Keil modificado es un ensayo de determinación de calidad de un material como puzolana, basado en las propiedades hidráulicas de resistencia a la compresión de cemento mezclado con puzolana en una proporción determinada.

Para calcular el índice hidráulico de Keil modificado para un mortero de cemento, se emplea la siguiente fórmula:

$$H_i \text{ mod (\%)} = 100 \bullet (S_b - S_q)/(S_p - S_q)$$

Donde:

S_b = resistencia a la compresión de un mortero de cemento mezclado con puzolana (70% cemento Pórtland, 30% puzolana).

S_q = resistencia a la compresión de un mortero de cemento con cemento mezclado con cuarzo (70% cemento Pórtland, 30% cuarzo (sílice)).

S_p = resistencia a la compresión de un mortero de cemento puro (100% cemento Pórtland).

Para realizar el ensayo se aplican las mismas condiciones de fabricación de morteros de la norma española UNE-EN 196-1:1996 de título “Método de ensayo de cementos”, Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas; calculando la resistencia a la compresión del mortero luego de haber transcurrido 7 y 28 días (algunas veces, también después de haber pasado 1, 2, 3, 7, 28, 90, 180 y 360 días).

La tabla 7 presenta la evaluación de calidad de los materiales ensayados como puzolanas a los 7 días y la tabla 8 a los 28 días del montaje de los morteros.

Tabla 7: Evaluación de calidad de un material como puzolana según el ensayo de Índice de Keil modificado a los 7 días de edad de los morteros

Hi mod (%)	Evaluación aproximada
> 100	Excelente
85 – 100	Muy buena
55 – 85	Buena
40 – 55	Suficiente
15 – 40	Pobre
< 15	Muy pobre

FUENTE: Lista orientativa utilizada por Holcim para la evaluación de un material como puzolana.

Tabla 8: Evaluación de calidad de un material como puzolana según el ensayo de Índice de Keil modificado a los 28 días de edad de los morteros

Hi mod (%)	Evaluación aproximada
> 80	Muy buena
30 - 80	Buena

FUENTE: Lista orientativa utilizada por Holcim para la evaluación de un material como puzolana.

CAPITULO V

MARCO GEOLÓGICO

5.1 Introducción

Se denominan frecuentemente Cordilleras Béticas, en sentido geográfico, el conjunto de montañas que se extienden desde el Golfo de Cádiz hasta las costas meridionales del País Valenciano y Baleares. Al norte está limitada por la cuenca del Guadalquivir y por el borde meridional del Macizo Ibérico y Sistema Ibérico, mientras que en el borde sur se localiza el mar de Alborán. Sin embargo, al igual que ocurre con el Pirineo, en sentido geológico, se extiende más allá de los límites geográficos, prolongándose hacia el sur por debajo del mar de Alborán y hacia el noreste parte de sus estructuras se continúan sin interrupción por el fondo del Mediterráneo y parte del promontorio balear hasta la isla de Mallorca.

La Cordillera Bética, junto con la Cordillera del Rif (norte de África) forman el segmento más occidental del orógeno alpino mediterráneo. Estas dos cordilleras se encuentran actualmente separadas por la cuenca neógena de Alborán y se localizan entre dos zócalos hercínicos, el ibérico al norte y el africano al sur.

Al igual que el Pirineo, esta cadena se formó como consecuencia del régimen compresivo que comenzó a finales del cretácico y que afectó principalmente a los bordes norte y sur de la placa ibérica. Sin embargo, a diferencia del Pirineo, su estructura y evolución posterior es mucho más compleja, ya que esta cadena resulta de la interacción de dos grandes placas y de un bloque continental (microplaca de Alborán, actuales Zonas Internas) que se desplaza hacia el oeste y que finalmente colisiona contra los márgenes mesozoicos de Iberia y noroeste de África, formando la Cordillera Bético-Rifeña.

A nivel cortical, el hecho más destacable es que no se detecta una raíz notable bajo la cordillera como ocurre con otros orógenos alpinos, ya que aunque se observa cierto engrosamiento de la corteza, no se superan en ningún caso los 40 km. La falta de una raíz cortical y litosférica clara puede explicarse si se supone que lo que observamos hoy es sólo una parte de una gran orógeno que se localizaba más al este y que por una serie de procesos geodinámicos fue parcialmente desmembrado, de forma que parte de este orógeno estaría sumergido bajo el mar Mediterráneo. Otro hecho destacable es el rápido adelgazamiento que se observa hacia la zona costera donde el espesor de la corteza se sitúa en torno a los 20-22 km, continuándose el adelgazamiento hacia el interior de la cuenca de Alborán, donde se alcanzan valores mínimos en torno a los 15 km.

Este concepto de dominio cortical, así como los criterios petrológicos y estructurales, ha llevado a distinguir tanto en la Cordillera Bética como en el Rif, cinco zonas o dominios diferenciados:

- **Dominio Sudibérico o Zonas Externas.** Son distintas en ambas cordilleras y están formadas por materiales mesozoicos y cenozoicos cabalgados y plegados sin metamorfizar, que se corresponden con los sedimentos de la cuenca marina que existía.
- **Dominio de Alborán o Zonas Internas.** Compuestas por un apilamiento de mantos de corrimiento con materiales esencialmente metamórficos, cuyo origen está relacionado con la migración de la microplaca apúlica o de Alborán, localizada más al este.
- **Surco de los Flyschs del Campo de Gibraltar.** Al que no se le atribuye la entidad de "dominio" por desconocerse el tipo de corteza sobre la que se sitúa. Es común a ambas cordilleras, continuándose a ambos lados del Estrecho de Gibraltar.

- **Depresiones terciarias postorogénicas.** Están rellenas de materiales neógeno-cuaternarios, producto de la erosión de los relieves circundantes. Se diferencian cuencas marginales a la cordillera (Depresión del Guadalquivir) y otras intramontañas (Depresión de Granada, Guadix-Baza, Almería-Sorbas, Vera-Cuevas de Almanzora y Murcia principalmente).
- **Vulcanismo neógeno-cuaternario.** Está representado en la zona de Cabo de Gata y corresponde a manifestaciones volcánicas postorogénicas relacionadas con la tectónica reciente.

En la figura 2 se representa la geología regional de la zona.

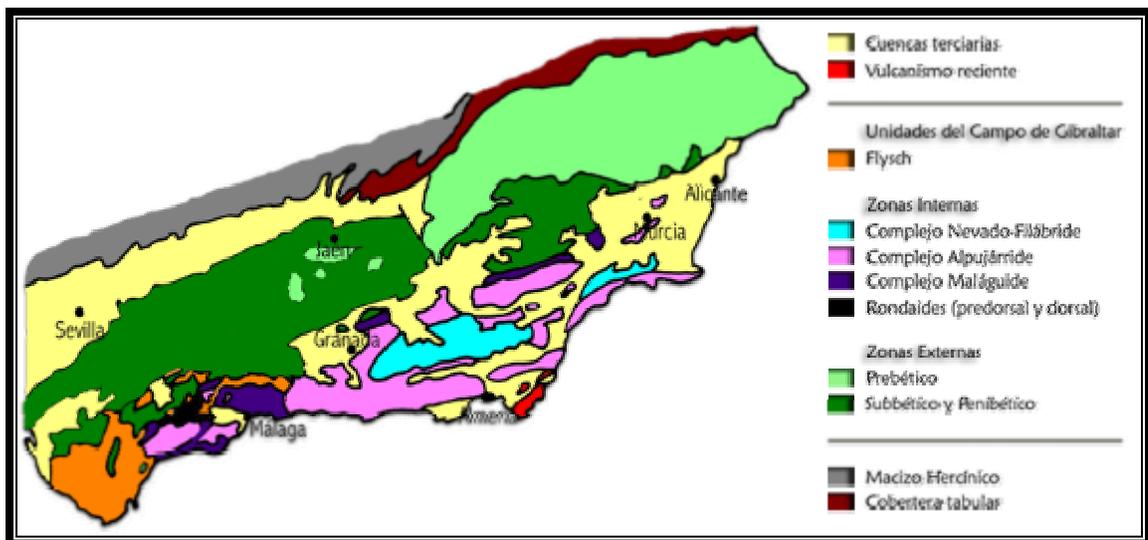


Figura 2: Mapa geológico de la región

5.2 Zonas Externas o Dominio Sudibérico

Son materiales mesozoicos y cenozoicos, en su mayoría de origen marino, depositados en una cuenca sedimentaria en el borde continental del sur de Iberia, con carácter geosinclinal y con sedimentación hasta el plegamiento alpino. Ocupan una

gran extensión en la cordillera y representando un intervalo de tiempo que va desde el triásico hasta el mioceno.

Presentan una estructura caracterizada por un despegue generalizado entre el zócalo (paleozoico hercínico) y la cobertera deformada (pliegues, fallas y mantos de cabalgamiento), en los que el triásico arcilloso-evaporítico actúa como material de despegue y los cabalgamientos tienen vergencia general hacia el norte. El zócalo paleozoico no aflora, permaneciendo a una profundidad de 5-8 km y constituido por materiales análogos al Macizo Ibérico. Reconstruyendo la posición original de las unidades se estima una cuenca origen con una extensión horizontal 2-3 veces mayor que la actual.

Se observan deformaciones de diferente edad. Durante el jurásico se produce una inestabilidad tectónica que produce la compartimentación de la cuenca en zonas morfológicamente diferenciadas. Durante el cretácico se inician los cabalgamientos, que continúan durante el paleógeno. La última y principal etapa de la deformación se produce en el mioceno, dando lugar al levantamiento general de la cordillera.

Según la naturaleza de los materiales y el grado de deformación se diferencian dos zonas bien diferenciadas:

- **Prebético**, con facies depositadas en medios someros, que durante el Mesozoico representaba la zona más cercana al continente, constituido por el Macizo Ibérico.

- **Subbético**, de facies pelágicas a partir del lías medio, que representa la zona de depósito marino más alejada del continente, con materiales de cuenca oceánica y eventualmente rocas volcánicas efusivas durante el Mesozoico.

Entre ambos se reconocen en algunas zonas las Unidades Intermedias, correspondientes a los materiales del talud continental, con facies por lo general de tipo turbidítico, ligadas al depósito en abanicos submarinos y que localmente pueden alcanzar espesores considerables. Tienen características propias con importantes variaciones laterales, cabalgando sobre el prebético y cabalgados por el subbético.

5.3 Zonas Internas o Dominio de Alborán

También denominada Zona Bética. Ocupa la posición más meridional y se extiende desde Estepona (Málaga) por el oeste hasta el cabo de Santa Pola, entre Murcia y Alicante, por el este.

El dominio paleogeográfico origen de las Zonas Internas, se encontraba más al este, formando parte, de forma general, de la microplaca de Alborán. Al irse cerrando el paleotethys, esta microplaca desgajada del noreste de África, fue migrando hacia el este lateralmente gracias a movimientos transformantes.

En las zonas internas aparecen materiales paleozoicos que provienen de la microplaca de Alborán. Dicho paleozoico, plegado inicialmente durante la orogenía hercínica, fue reactivado durante la orogenia alpina, donde formó tres grandes conjuntos, constituidos por materiales fundamentalmente paleozoicos, que se manifiestan en mantos de cabalgamiento superpuestos, pero desarrollados y emplazados en la orogenia alpina: Complejo Nevado-Filábride, Complejo Alpujárride y Complejo Maláguide, algunos autores consideran independientemente a las unidades de la dorsal y predorsal. En algunos casos han sufrido desplazamientos de varios centenares de kilómetros.

Las zonas internas presentan un mesozoico reducido y por lo general corresponden a los materiales sedimentarios depositados alrededor o en la microplaca de Alborán, durante su etapa de migración y emplazamiento. El triásico de esta zona es diferente

al resto de la cordillera ya que su parte basal es detrítica (facies germánica), pero el resto es dolomítica, más parecido a las facies alpinas. El jurásico y cretácico son de facies carbonatadas. En general, faltan sedimentos del paleógeno, a excepción de algunos retazos del eoceno discordantes sobre los mantos. El neógeno (especialmente el mioceno superior) es ya postorogénico y fosiliza los mantos. Se presenta como retazos más o menos extensos en el interior (cuencas interiores), o como una orla costera continua, que en la región del Cabo de Gata está asociada con efusiones volcánicas.

El metamorfismo regional del ciclo alpino afecta a los materiales paleozoicos y en algunos casos al triásico, lo que unido a las importantes deformaciones alpinas, hace que su historia sea difícil de desvelar.

Con base en la posición tectónica y el grado de metamorfismo, se han delimitado tres grandes unidades o complejos que corresponden a tres grandes mantos de cabalgamiento, con frecuentes mantos dentro de ellos. En orden de superposición del más profundo al más superficial, son los siguientes: Complejo Nevado-Filábride, Complejo Alpujarride y Complejo Maláguide.

5.3.1 Complejo nevado-filábride

Aflora en el núcleo de Sierra Nevada y la Sierra de los Filabres y consta de rocas metamórficas (micasquistos grafitosos con cuarcitas intercaladas, anfibolitas, gneises y mármoles) muy deformadas y con esquistosidad generalizada, con varios mantos de corrimiento que producen duplicaciones tectónicas, atribuidas al paleozoico superior y localmente hasta el triásico. Aparecen mineralizaciones de óxidos de hierro (minas de Alquife) en los mármoles y de cobre y plomo.

5.3.2 Complejo alpujárride

Alcanza su mayor desarrollo en las Alpujarras, aunque también está muy desarrollado en la serranía de Ronda (Rondaides), donde presenta intrusiones de rocas ultrabásicas (peridotitas) procedentes de una antigua dorsal oceánica. Por lo general está constituido por filitas y micasquistos que han sufrido varias etapas de metamorfismo. Se ha atribuido al precámbrico y paleozoico, llegando en algunas zonas a desarrollarse un triásico muy potente representado por calizas y dolomías depositadas en medios marinos someros con frecuentes episodios de llanuras de mareas y laggon. Constituye un gran manto de corrimiento que cabalga sobre el Complejo Nevado-Filábride, con una estructura interna muy compleja, con diversas unidades dentro de él, que cabalgan unas sobre otras. Aparecen yacimientos de magnetita y mineralizaciones de cromo y níquel en las peridotitas de Ronda; yacimientos de sulfuros de cinc, plomo, óxidos de hierro, manganeso y fluorita en las dolomías del triásico alpujárride.

5.3.3 Complejo maláguide

Se desarrolla sobre todo en las sierras de Málaga y corresponde a la unidad tectónica superior cabalgante sobre las anteriores. Está integrado por materiales paleozoicos sedimentarios poco o nada metamorfizados, sobre todo arcillosos y detríticos, que incluyen formaciones calcáreas de edad silúrico a devónico inferior. Sobre éstos aparecen conglomerados permo-triásicos y el resto del mesozoico y cenozoico (hasta el mioceno inferior) está representado por niveles calizos y margosos marinos poco potentes.

CAPITULO VI

REGIÓN VOLCÁNICA NEÓGENA DEL SURESTE DE ESPAÑA

6.1 Introducción

La región volcánica neógena del sureste de España está constituida por rocas calco-alcalinas, calco-alcalinas potásicas, shoshoníticas, ultrapotásicas (lamproíticas) y basaltos alcalinos. Este volcanismo se ha desarrollado en dos períodos, el primero de los cuales fue el más importante, tanto por el volumen de materiales arrojados como por la variedad litológica de los mismos.

Las rocas del primer período, que comenzó a mediados del Mioceno y terminó a principios del Plioceno (es decir, entre los -17 y los -6 millones de años), presentan un progresivo enriquecimiento en k_2O y en elementos traza incompatibles (Rb, Ba, Pb, Sr, Zr, ...) y ferromagnesianos (Cu, Co, Ni, V, Cr, ...) hacia el norte, y en esta misma dirección disminuye su edad. Así, en el sector más meridional de la región (Cabo de Gata) aparecen las lavas más antiguas, que son de naturaleza calco-alcalina; al norte de éste predominan rocas más potásicas (es decir, de afinidad calco-alcalina potásica y shoshonítica), coetáneas o más recientes que las anteriores, y en el sector más septentrional se encuentran las rocas ultrapotásicas, una buena parte de las cuales son más jóvenes que las ya citadas. Durante el segundo y último período, que se inició a los -4 millones de años y finalizó a los -2 millones de años, se generó un volcanismo basáltico alcalino, poco intenso y restringido a la zona situada al noroeste de Cartagena.

La mineralogía y la geoquímica que presentan las rocas calco-alcalinas, calco-alcalinas potásicas y shoshoníticas, indican que su génesis está relacionada con la subducción de la corteza oceánica que se generó en el mar de Alborán a finales del

Oligoceno. La subducción de esta corteza oceánica produjo líquidos de composición andesítico-basáltica y andesítica, a profundidades del orden de los 100 kilómetros, y de composición calco-alkalina potásica y shoshonítica, a niveles del orden de los 150 kilómetros. Estos líquidos debieron mezclarse durante su ascenso con fluidos cargados de elementos incompatibles y/o asimilaron, en mayor o menor grado, materiales de la corteza continental.

Por lo que respecta a los magmas ultrapotásicos, se supone que proceden de la mezcla de líquidos de tipo kimberlítico (originados a su vez a partir del agua liberada por la placa litosférica subducente a profundidades cercanas a los 300 kilómetros) con los magmas generados en niveles superiores, y más específicamente con los de tipo shoshonítico.

Finalmente, el magmatismo basáltico alcalino, de origen subcrustal, ha estado genéticamente relacionado con la fase distensiva que comenzó a desarrollarse en el tortoniense.

En la figura 3 se muestra la localización de la región volcánica neógena del sureste de España y la ubicación de las muestras estudiadas.

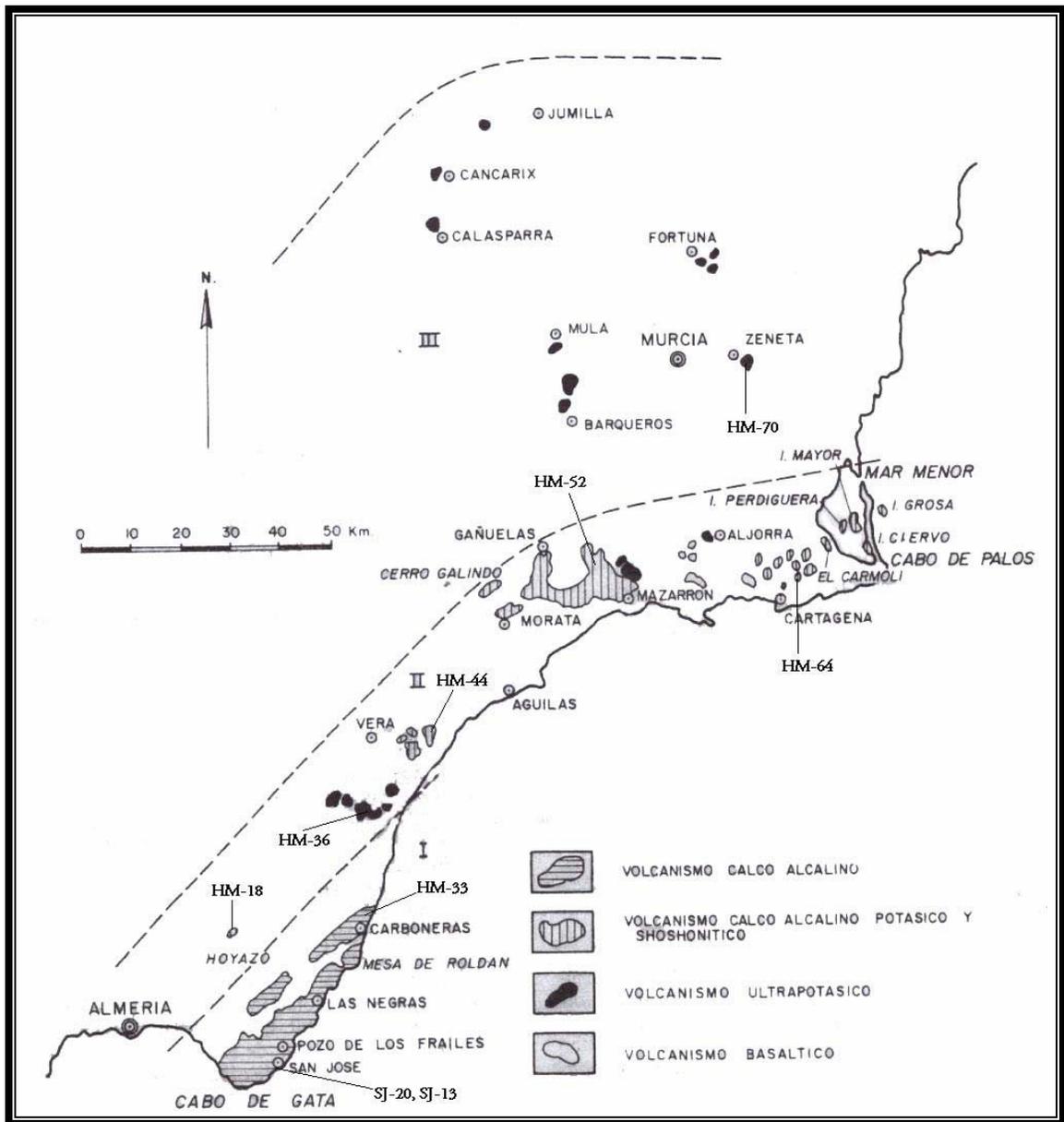


Figura tomada de “LA REGIÓN VOLCÁNICA NEÓGENA DEL SURESTE DE ESPAÑA” por J. López Ruiz y E. Rodríguez Badiola.

Figura 3: Localización de la región volcánica neógena del sureste de España

6.2 Mineralogía y petrología

6.2.1 Rocas calco-alcaldas

Las rocas calco-alcaldas del sureste de España presentan textura porfídica y matriz vítrea o hipocristalina. Las andesitas basálticas y las andesitas están constituidas fundamentalmente por plagioclasa, orto y clinopiroxeno y magnetita, si bien en las más silíceas de estas últimas aparecen también anfíbol y biotita, mientras que las dacitas y riolitas presentan, además de plagioclasa y ortopiroxeno (restringido a las dacitas), proporciones mayores de anfíbol, biotita y cuarzo.

6.2.2 Rocas calco-alcaldas potásicas y shoshoníticas

Las rocas calco-alcaldas potásicas y las shoshoníticas del sureste de España tienen textura porfídica y una matriz que varía de vítrea a hipocristalina. Las andesitas potásicas están constituidas fundamentalmente por plagioclasa y ortopiroxeno, si bien en los tipos más ácidos aparecen además biotita y cuarzo, y las dacitas potásicas lo están por plagioclasa, biotita y cuarzo. Las banaquitas y las toscanitas muestran una mineralogía muy semejante, puesto que, a excepción del clinopiroxeno, presente en las primeras y ausente en las otras, ambas están constituidas por plagioclasa, sanidina, biotita y cuarzo. Además de los minerales citados, en las rocas de ambas series aparecen, más o menos frecuentemente, cordierita, granate, sillimanita y andalucita, cuyo origen, primario o xenolítico, plantea serias dudas.

6.2.3 Rocas ultrapotásicas

Las rocas ultrapotásicas del sureste de España presentan texturas que varían de holocristalinas de grano grueso a porfídicas con matriz esencialmente vítrea, pasando por otras también porfídicas pero con matriz microcristalina. En general, los tipos holocristalinos aparecen en las zonas centrales de los pitones de grandes dimensiones

(Jumilla, Cancarix, Calasparra, Barqueros), los hipocristalinos en las partes periféricas de los mismos y los más o menos vítreos en los diques (Fortuna, Derramadores, Tale).

Desde el punto de vista mineralógico, no existen notables diferencias entre jumillitas, cancalitas, fortunitas y veritas, ya que en todas ellas la abundancia o incluso la ausencia de determinados minerales está condicionada fundamentalmente por el grado de cristalización de la roca. En esencia, estas rocas están constituidas por olivino, flogopita, clinopiroxeno, ortopiroxeno (en algunas calcanitas y fortunitas), leucita (en algunas jumillitas y veritas) y proporciones variables, según el grado de cristalinidad, de sanidina, richterita potásica y vidrio. Como minerales accesorios, aparecen apatito, calcita, rutilo y espinelas fundamentalmente. En los tipos holocristalinos, el primer grupo de minerales constituyen en conjunto más del 40 % del volumen total de la roca, mientras que sanidina y richterita potásica integran el resto. En los tipos más vítreos, los cristales de olivino, flogopita, clinopiroxeno, y en su caso ortopiroxeno y leucita, que globalmente no sobrepasan el 20 % de la roca, están englobados por un vidrio de color pardo, en el que solo aparecen cristales esqueléticos de sanidina. Entre ambos tipos existe una amplia gama de rocas porfídicas más o menos vítreas, en las que la abundancia de sanidina, richterita potásica y vidrio es intermedia entre la de aquellos.

6.2.4 Basaltos alcalinos

Los basaltos alcalinos están pobremente representados en la región volcánica del sureste de España, y, por otra parte, sus caracteres mineralógicos y petrológicos son poco sobresalientes. Típicamente, estas rocas tienen textura porfídica y matriz microcristalina a vítrea. Olivino, augita y plagioclasa, junto con magnetita y analcima, son los constituyentes esenciales.

6.3 Geoquímica

6.3.1 Rocas calco-alcalinas

Las rocas calco-alcalinas del sureste de España presentan un rango de variación en SiO_2 relativamente amplio (53,3 – 70,6 %), por lo que todos los términos de la serie, menos los basaltos, están representados. No obstante, los términos intermedios son los más abundantes, mientras que las dacitas y, sobre todo, las riolitas son escasas. Por lo que respecta a los elementos mayores, los porcentajes de todos ellos son del mismo orden que los que típicamente presentan estas rocas; es decir, que muestran contenidos relativamente altos de Al_2O_3 , MgO y CaO , moderados de FeO , K_2O y Na_2O , y bajos de TiO_2 y P_2O_5 . La relación de $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ está comprendida entre 0,42 y 1,06; y la relación $\text{Fe}_{\text{total}}/\text{MgO}$ varía entre 1,1 y 2,0 (valor medio 1,4). Consideradas en conjunto, sus tendencias de variación son asimismo típicas: progresiva disminución de Al_2O_3 , Fe_{total} , MgO , MnO , CaO y TiO_2 , aumento de SiO_2 y K_2O , y contenidos prácticamente constantes de Na_2O y P_2O_5 , al pasar de las andesitas basálticas a las riolitas.

6.3.2 Rocas calco-alcalinas potásicas y shoshoníticas

Las rocas calco-alcalinas potásicas y shoshoníticas están peor representadas en el sureste de España que las calco-alcalinas, puesto que en las primeras no se han encontrado términos con un contenido en SiO_2 inferior al 58 % ni superior al 64 %, y en las segundas este rango de variación está comprendido entre 58 % y 67 %. Por lo que respecta a los elementos mayores, las rocas calco-alcalinas potásicas presentan contenidos de K_2O , TiO_2 y P_2O_5 superiores, y de CaO inferiores, para idéntico porcentaje de SiO_2 , que las calco-alcalinas. La relación $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ está comprendida entre 0,63 y 1,98; si bien en la mayoría de las andesitas este valor es cercano a 1, y en las dacitas superior a 1,5; y la relación $\text{Fe}_{\text{total}}/\text{MgO}$ varía entre 1,2 y 2,6 (valor medio 1,9). Las algo elevadas relaciones $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ que presentan estas rocas, y

especialmente las andesitas potásicas, son debidas al relativamente bajo contenido en Na_2O , más que a un anormalmente alto porcentaje de K_2O . Consideradas en conjunto, las tendencias de variación de estos elementos son algo distintas a las de las rocas calco-alcalinas, puesto que el Al_2O_3 permanece prácticamente constante, mientras que el P_2O_5 aumenta, al pasar de las andesitas a las dacitas, y, en este mismo sentido, las disminuciones de MgO y CaO y el incremento de K_2O son más acusadas que en aquellas.

Las rocas shoshoníticas del sureste de España se caracterizan por sus altos contenidos en K_2O , P_2O_5 , Rb, Ba, Pb, Sr, Th y Zr. Estas peculiaridades geoquímicas son responsables de las elevadas relaciones $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (1,1-3,6) y Rb/Sr (0,441-0,686) y de las relativamente bajas relaciones K/Rb (117-198), que presentan las mismas. Por otra parte, los contenidos de MgO y CaO de estas rocas son más bajos que los de las rocas calco-alcalinas, pero del mismo orden, junto con Cu, Co, Ni, V y Cr, que los de las rocas calco-alcalinas potásicas.

Consideradas en conjunto, las rocas shoshoníticas muestran una progresiva disminución de Al_2O_3 , MnO, MgO , CaO , TiO_2 y P_2O_5 , y un notable aumento de K_2O , al aumentar la sílice. Presentan asimismo un ligero enriquecimiento de FeO al pasar de los términos menores silíceos a los intermedios. El aumento continuado de K_2O para todo el rango de variación de SiO_2 es una peculiaridad geoquímica de las shoshonitas del sureste de España, puesto que en las de otras áreas el K_2O incrementa hasta valores de SiO_2 cercanos al 57 %, pero por encima de este valor permanece constante o incluso disminuye.

6.3.3 Rocas ultrapotásicas

Las rocas ultrapotásicas del sureste de España se caracterizan por presentar elevados contenidos de MgO , Ni y Cr, así como de K_2O , P_2O_5 , Ba, Pb, Sr, Th y Zr, y bajos de Al_2O_3 y CaO . Su contenido de SiO_2 es bastante amplio, por lo que dentro de este

grupo existen rocas subsaturadas (jumillitas y calcanitas), ligeramente saturadas o débilmente subsaturadas (fortunitas) y sobresaturadas (veritas).

Las jumillitas son las rocas lamproíticas más básicas (los contenidos de SiO_2 y MgO están comprendidos entre 45,5-51,5 y 14,3-18,0; respectivamente), y son asimismo las más ricas en Ni y Cr, así como en Th y Zr. Su porcentaje de K_2O es inferior al de las cancalitas, fortunitas y veritas, y, sin embargo, tienen las más altas concentraciones en Ba y Sr.

Las cancalitas son rocas intermedias en cuanto al contenido de SiO_2 (su porcentaje oscila entre 52,8 y 55,9). Comparadas con las jumillitas, presentan concentraciones de FeO, MgO, CaO, Cr y Ni, así como de Th, algo inferiores y de K_2O muy superiores. A pesar de esto último, la abundancia de Pb y Sr es menor que en las jumillitas.

Las fortunitas y las veritas son asimismo rocas intermedias ($\text{SiO}_2 = 53,4-57,5$ y $55,7-68,5$; respectivamente). Fortunitas y veritas son más ricas en SiO_2 y Al_2O_3 y más pobres en MgO, P_2O_5 , Cr, Ni, Rb, Ba, Pb, Sr, Th y Zr que las jumillitas y las cancalitas. Por lo que respecta al K_2O , en general presentan porcentajes más elevados que las jumillitas, pero bastante inferiores a los de las cancalitas.

6.3.4 Basaltos alcalinos

Los basaltos alcalinos del sureste de España tienen una composición muy homogénea. Como es típico, presentan relativamente bajos contenidos de SiO_2 y Al_2O_3 y altos de álcalis, TiO_2 y P_2O_5 , así como nefelina normativa. La relación $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ está comprendida entre 0,27 y 0,50 y la relación $\text{Fe}_{\text{total}}/\text{MgO}$ varía entre 1,33 y 1,58.

CAPITULO VII

METODOLOGÍA UTILIZADA

7.1 Selección de los puntos de muestreo

El criterio de selección de las muestras se basó principalmente en los siguientes pasos:

1º Se determinó la zona de estudio por medio de la ubicación en mapas geológicos de España del IGME, de escala 1:50.000, de las zonas donde se encontrasen materiales de origen volcánico, en una región de aproximadamente 200 kilómetros de radio comprendida entre las ciudades de Almería y Murcia.

2º Se seleccionaron 14 mapas geológicos del Instituto Geológico y Minero de España (1:50.000) en los que se encontraban materiales de origen volcánico. Estos mapas fueron los siguientes:

- Mapa Geológico de El Cabo de Gata e Isla Alborán (1.059 y1.078 (bis)).
- Mapa Geológico de El Pozo de los Frailes (1.060).
- Mapa Geológico de Carboneras (1.046).
- Mapa Geológico de Sorbas (1.031).
- Mapa Geológico de Mojácar (1.032).
- Mapa Geológico de Vera (1.014).
- Mapa Geológico de Garrucha (1.015).
- Mapa Geológico de Águilas (997).
- Mapa Geológico de Puerto Lumbreras (975).
- Mapa Geológico de Mazarrón (976).
- Mapa Geológico de Cartagena (977).

- Mapa Geológico de Fuente Álamo de Murcia (955).
- Mapa Geológico de Alcantarilla (933).
- Mapa Geológico de Murcia (934).

3º Se seleccionaron las zonas donde se deseaba realizar los muestreos con criterios de extensión y potencia de las formaciones encontradas. Se escogieron 71 puntos donde se pretendía recolectar las muestras.

4º Se determinaron las coordenadas geográficas de los puntos en estos mapas y luego se procedió a calcular las coordenadas UTM en mapas topográficos de la misma escala, del Servicio Geográfico del Ejército, Cartografía Militar de España, mapa general, serie L, con un orden creciente desde el suroeste al noreste (desde El Cabo de Gata hasta Murcia); para su más fácil ubicación geográfica en campo. Se anexó una breve descripción litológica extraída de la leyenda del mapa geológico donde se ubicó dicho punto.

Las tablas resumen, con una breve descripción litológica y la ubicación, en coordenadas geográficas y UTM, de los sitios donde se pretendía recolectar las muestras; se pueden observar en el anexo A.

7.2 Trabajo de campo

Debido a diversos motivos tales como la dificultad de los accesos, muestras contenidas en propiedades privadas, tiempo, repetición de litologías y otros, sólo se tomaron 41 muestras de las 71 programadas originalmente. Adicionalmente se tomaron dos muestras extra en la Cantera San José, cerca de la localidad de San José de Níjar, SJ-20 y SJ-13, de zeolitas (variedad mordenita) y tobas zeolíticas respectivamente, dada su importancia como materiales conocidos con ciertas propiedades puzolánicas.

La ubicación de las muestras se realizó por medio de un GPS modelo 12, marca Garmin; en el cual se habían introducido previamente las coordenadas de los puntos que se iban a muestrear.

Las tablas con las coordenadas reales, tanto geográficas como UTM de las muestras que fueron recogidas, se presentan en el anexo A.

7.3 Tipo de muestreo

El tipo de muestreo que se aplicó fue el muestreo de fragmentos de afloramientos; y se efectuó de la siguiente manera:

- El muestreo se realizó en áreas de afloramiento directo de los materiales volcánicos (afloramientos, cortes de carretera y/o ferrocarriles, trincheras, pozos, acantilados, cauces de ríos, etc.).
- La toma de muestras se efectuó en las partes más frescas del afloramiento; estas fueron preferentemente monolíticas, en el caso de las rocas cohesivas. En presencia de materiales friables, el muestreo se efectuó a una profundidad de entre 20 y 30 centímetros.
- El peso de las muestras fue de 2 kilogramos aproximadamente.
- Las muestras fueron envasadas cuidadosamente en bolsas de plástico y selladas inmediatamente, aislándolas de las muestras vecinas para evitar al máximo su dilución. En la parte exterior de la bolsa se rotuló el número de muestra correspondiente. El número de la muestra se expresó en los siguientes términos:

HM-X

donde: **X** = número de identificación de la muestra, en el rango de variación de 1,.....,71.

Y: **SJ-X**; en el caso particular de las muestras tomadas en la cantera de San José de Níjar.

- Todos los detalles concernientes a la toma de la muestra fueron escritos en una libreta de campo (ver anexo B), donde se representaron los detalles siguientes:
 - Comprobación de las coordenadas iniciales del punto y referencia a nuevas coordenadas en caso de cambios de la posición (en aquellos casos en que el afloramiento real no coincida con las coordenadas proyectadas y se prefiera la selección de puntos de muestreo más idóneos cercanos a los proyectados).
 - Descripción exhaustiva del punto (tipo de roca, rasgos tectónicos, alteraciones, relaciones con el encajante, extensión del afloramiento, potencia, valoración económica).
 - Características topográficas del entorno y descripción de la accesibilidad.

7.4 Trabajo de laboratorio

Debido al tiempo para realizar el proyecto y al coste de los ensayos, se seleccionaron solo las nueve muestras más representativas de todo el trabajo de muestreo, para realizar el trabajo de laboratorio. El criterio aplicado para la selección de estas

muestras se basó principalmente en abarcar la mayoría de tipos de litología estudiados y el posible aprovechamiento económico de estos yacimientos. Las primeras muestras que fueron descartadas fueron las que se encontraban dentro del Parque Nacional Cabo de Gata, debido a que no pueden ser explotadas por la misma condición de encontrarse dentro del Parque Nacional. Luego se escogieron las muestras que debido a su relativo fácil acceso, características geoquímicas, cantidad de reservas, etc., resultaran ser las más atractivas para ser estudiadas a fondo.

Las muestras seleccionadas fueron las siguientes:

- H-M18 (Dacita biotítica con cordierita y almandino).
- H-M33 (andesita).
- H-M36 (Verita).
- H-M44 (Dacita y riodacita).
- H-M52 (Dacita y riodacita).
- H-M64 (Andesita y doreíta biotítica piroxénica con alteración hidrotermal).
- H-M70 (Lamproíta).
- SJ-20 (Zeolita, variedad mordenita).
- SJ-13 (Toba zeolítica).

Los ensayos se realizaron en las instalaciones del Laboratorio Oficial para Ensayo de Materiales de Construcción (LOEMCO). Para determinar las propiedades puzolánicas de las muestras se emplearon los siguientes ensayos:

- Ensayos del Índice de Keil Modificado.
- Ensayos mecánicos de resistencia a la flexión y a la compresión según norma española UNE-EN 196-1:1996 de título “Método de ensayo de cementos”, Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.

- Ensayos químicos de puzolanicidad, según norma española UNE-EN 196-5:1996; de título “Método de ensayo de cementos”, parte 5: Ensayo de puzolanicidad para cementos puzolánicos.

7.4.1 Preparación de las muestras

El primer procedimiento que debe realizarse en el laboratorio para comenzar los ensayos es el de la preparación de las muestras, para lo cual se deben seguir los siguientes pasos:

1º Reducción del tamaño original o bruto, por medio de una machacadora de mandíbulas marca Alas (figura 4), la cual proporciona como resultado una granulometría de 3 centímetros de tamaño máximo.



Figura 4: Machacadora de mandíbulas marca Alas

2º Reducción de tamaño por medio de una segunda machacadora de mandíbulas marca Controls (figura 5); con el cual se obtiene una granulometría de 1 centímetro de tamaño máximo.



Figura 5: Machacadora de mandíbulas marca Controls

3° Secado durante 2 horas de 1 kilogramo del material procesado por la segunda machacadora en una estufa marca Selecta, a temperatura constante de 100 °C. La muestra se disgrega muy bien en toda la bandeja para que la extracción de la humedad sea efectiva en toda la superficie.

4° Colocar el material en un desecador durante media hora para que este se enfríe y no absorba humedad.

5° Molienda del material por medio de un molino vibratorio marca Siebtechnik (figura 6). Debido a la capacidad reducida de la cámara receptora del molino se efectúa el llenado por fases, cargándola con una cantidad de 150 gramos, aproximadamente. El tiempo que se debe consumir en cada molienda es de 1 minuto.



Figura 6: Molino vibratorio marca Siebtechnik

6° El siguiente paso es el tamizado, el cual se lleva a cabo por medio de un tamiz N° 26/13, de luz 0,063 mm, según norma UNE 7050/3, de diámetro 200 mm y material AISI 304; (figura 7); el cual proporciona una granulometría de 0,063 milímetros de tamaño máximo.



Figura 7: Aspecto de la granulometría del material luego de la molienda y el tamizado

7º La cantidad de material tamizado que se utilizó para los ensayos químicos y mecánicos fue de 600 gramos. Para el pesaje se utilizaron balanzas de alta precisión marca Precisa, modelo 1620C.

Luego de la preparación de la muestra, se procedió a realizar los ensayos tanto mecánicos como químicos.

7.4.2 Ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos se realizaron según la norma española UNE-EN 196-1:1996 de título “Método de ensayo de cementos”, Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas; la cual consiste en los siguientes pasos:

1º Pesar en una balanza de precisión marca Swiss Quality la muestra:

- 150 gramos para la relación 70% cemento de referencia, 30% puzolana.
- 125 gramos para la relación 75% cemento de referencia, 25% puzolana.

2° Pesar en la misma balanza de precisión el cemento de referencia:

- 350 gramos para la relación 70% cemento de referencia, 30% puzolana.
- 375 gramos para la relación 75% cemento de referencia, 25% puzolana.
- 450 gramos para la relación 100% cemento de referencia.
- 350 gramos para la relación 70% cemento de referencia, 30% sílice.

3° Pesar en la balanza de precisión la arena normalizada llevada al tamaño que pasa el tamiz de 0,063 mm de luz:

- 150 gramos para la relación 70% cemento de referencia, 30% sílice.

4° Homogeneizar la mezcla manualmente en una bolsa de plástico.

5° Pesar 450 gramos de la mezcla cemento-puzolana, cemento-sílice; y 450 gramos de cemento de referencia para las probetas de 100% cemento.

6° Pesar las bolsas de arena normalizada, CEN-NORMSAND DIN EN 196-1, de 1 350 gramos, con las cuales se van a realizar las probetas de mortero, para verificar que no haya errores en su peso.

7° Pesar 225 gramos de agua normalizada para la realización de dichos ensayos.

8° Mezclar en la amasadora marca Suzpecar, modelo C-700 (figura 8), agregando primero el agua, luego la mezcla; ambos en el cazo de la amasadora y por último la arena en la tolva de la amasadora.



Figura 8: Amasadora marca Suzepecar

9° Verter el mortero en los moldes y compactar, siempre siguiendo el procedimiento que dicta la norma, en la compactadora de sacudidas marca Bonfiglioli, modelo MVF 44 (figura 9).



Figura 9: Compactadora de sacudidas marca Bonfiglioli

10° Enrasar bien los moldes con el equipo adecuado, ponerle un cristal encima y luego colocarlos en la cámara húmeda. Dejarlos durante un día y luego desmoldar, pesar las probetas.

11° Colocar las probetas bien identificadas con el número de muestra y fecha a la que le corresponde romper como se muestra en la foto de la figura 10, en los tanques de agua de la cámara húmeda que correspondan.



Figura 10: Probetas desmoldadas e identificadas

12° Someter las probetas a ensayos de flexión en el flexímetro marca Ibertest, modelo EL 39-1500 (figura 11) y de compresión en la máquina marca S de 200 kN de capacidad máxima (figura 12) a los días que les corresponda y anotar los resultados en las planillas correspondientes.



Figura 11: Flexímetro marca Ibertest



Figura 12: Máquina para realizar los ensayos a compresión

13º Introducir los resultados obtenidos en un programa de ordenador, el cual proporciona los resultados en N/mm^2 (MPa) con su respectiva incertidumbre.

7.4.3 Ensayo químico de puzolanidad

La puzolanidad se determina por comparación de la cantidad de hidróxido de calcio que, pasado un período de tiempo fijo, contiene la disolución acuosa en contacto con el cemento hidratado, con la cantidad de hidróxido de calcio necesaria para obtener una disolución acuosa, saturada y de la misma alcalinidad que la anterior. El ensayo se considera positivo si la concentración de hidróxido de calcio en disolución es inferior a la concentración de saturación.

El ensayo químico de puzolanidad según la norma española UNE-EN 196-5:1996; de título “Método de ensayo de cementos”, parte 5: Ensayo de puzolanidad para cementos puzolánicos; consiste en los pasos explicados a continuación.

7.4.3.1 Preparación de la disolución

1º Introducir 100 ml de agua destilada en el recipiente de ensayo.

2° Colocar en la estufa marca Memmert a una temperatura constante de 40 °C. Mantenerlo durante 1 hora (cerrado).

3° Pesar en la balanza de alta precisión marca Precisa, modelo 1620C, $20 \pm 0,01$ g de muestra de la mezcla seca (75% cemento de referencia, 25% puzolana).

4° Introducirla en el recipiente de ensayo y cerrarlo herméticamente.

5° Agitar vigorosamente la mezcla durante 20 segundos con movimientos giratorios horizontales apoyando la base del recipiente sobre una superficie plana.

6° Colocar el recipiente con la muestra en la estufa cuidando de que quede horizontal.

7° El tiempo máximo que puede transcurrir desde que el recipiente se saca y se mete en la estufa será de 1 minuto.

8° Transcurridos 7 días se saca el recipiente y se filtra la disolución con el equipo de vacío colocando 2 filtros de poro fino (figura 13).



Figura 13: Equipo de vacío para el filtrado

9° El filtrado se hará rápidamente de forma que no transcurran más de 30 segundos.

10° Cerrar inmediatamente los dos orificios del matraz kitasato.

11° Dejar enfriar a temperatura ambiente.

7.4.3.2 Determinación de la concentración de iones hidroxilo

1° Homogeneizar el líquido filtrado agitando el matraz kitasato con un agitador magnético marca Bunsen, modelo MC-8.

2° Tomar con una pipeta 50 ml de la disolución e introducirlos en un vaso de 250 ml.

3° Añadir indicador naranja de metilo hasta que la disolución se vea amarilla como se aprecia en la foto de la figura 14.



Figura 14: Tonalidad amarilla luego de agregar el indicativo de naranja de metilo

4° Rellenar con ácido clorhídrico 0,1 M.

5° Valorar la alcalinidad de la disolución dejando caer gota a gota el HCl 0,1 M sobre el vaso en agitación moderada hasta que vire de color amarillo a rosado claro (figura 15).



Figura 15: Tonalidad rosada clara luego de valorar con ácido clorhídrico

6° Anotar el volumen gastado.

7.4.3.3 Determinación de la concentración de óxido de calcio

1° Añadir a la disolución valorada anteriormente 5 ml de hidróxido de sodio al 10 %.

2° Medir el pH, con el pH-metro marca Titrimo, modelo 719S; que deberá ser superior a 13. Si no es así añadir más disolución de NaOH hasta conseguirlo.

3° Introducir 0,0500 g de indicador de murexida.

4° Rellenar una bureta de 10 ml con la disolución de EDTA 0,025 M.

5° Valorar la concentración de óxido de calcio dejando caer gota a gota la disolución de EDTA 0,025 M sobre el vaso en agitación moderada hasta que vire de color del púrpura, foto de la figura 16, al morado como el de la foto de la figura 17.



Figura 16: Tonalidad púrpura luego de agregar el indicador de murexida

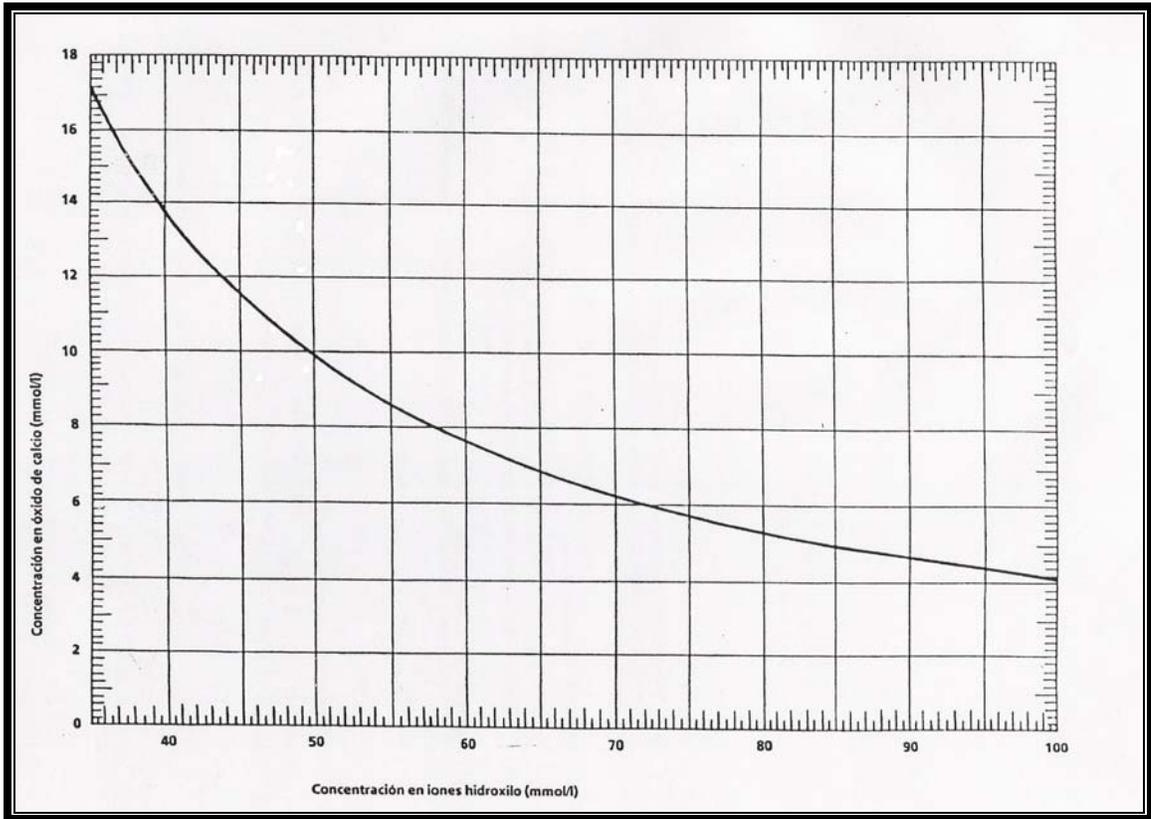


Figura 17: Tonalidad morada luego de valorar con la disolución de EDTA

6° Anotar el volumen gastado.

Una vez anotados los volúmenes de HCl y EDTA consumidos, se introducen en un programa de ordenador el cual proporciona los resultados de los valores medios de la concentración de iones hidroxilo y de la concentración de óxido de calcio.

Tomando el valor medio de la determinación de los iones hidroxilo y el valor medio de la determinación de óxido de calcio, si el punto de intersección está por debajo de la curva en el “Diagrama para la determinación de la puzolanicidad” (figura 18), la mezcla es puzolánica.



FUENTE: Norma europea EN 196-5: 1994.

Figura 18: Diagrama para la determinación de la puzolanicidad

RESULTADOS

Resultados de la investigación geológica

A continuación, en la tabla 9, se indica la composición química media de las muestras analizadas.

Tabla 9: Composición química media de las muestras analizadas

Componentes (%)	Tipo de roca								
	Calco-alcalina			Calco-alcalina potásica y shoshonítica				Ultrapotásica	
	SJ-13	SJ-20	HM-33	HM-18	HM-44	HM-52	HM64	HM-36	HM-70
SiO ₂	64,49	67,04	58,40	63,67	63,00	63,00	61,30	61,22	56,05
Al ₂ O ₃	13,19	12,55	17,53	17,12	17,77	17,77	15,80	12,21	11,43
Fe ₂ O ₃	1,60	1,17	4,79	0,67	0,65	0,65	0,25	2,06	2,23
FeO	-	-	1,45	4,18	2,66	2,66	4,33	1,96	3,31
MnO	0,05	-	0,09	0,09	0,05	0,05	0,08	0,04	0,08
MgO	2,09	1,37	3,66	1,84	2,44	2,44	3,66	4,57	9,27
CaO	0,873	1,54	8,32	2,47	2,97	2,97	5,23	2,72	4,21
Na ₂ O	3,92	2,64	2,44	2,21	3,61	3,61	3,80	1,96	2,10
K ₂ O	2,99	1,79	1,07	3,56	3,85	3,85	2,40	5,71	6,14
TiO ₂	0,119	0,101	0,43	0,68	0,67	0,67	0,54	1,23	1,35
P ₂ O ₅	0,018	-	0,08	0,21	0,33	0,33	0,20	0,77	0,81
H ₂ O	5	5	1,55	2,27	3,20	3,20	2,50	4,88	2,91
CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	0,21	0,06
Total	94,34	93,20	99,81	98,97	100,20	100,20	100,09	99,54	99,95

FUENTE: “La región volcánica neógena del sureste de España” de J. López Ruiz y E. Rodríguez

Badiola; 1980.

Los valores de las muestras SJ-13 y SJ-20 fueron cortesía de Calvo Pérez, Benjamín y Costafreda Mustelíer, Jorge Luis; 2005.

Resultados de los ensayos mecánicos

Nota:

CR= Cemento de referencia (el cemento de referencia utilizado para la realización de estos ensayos fue un cemento tipo I 42,5 R/SR).

P= Puzolana.

- **Resistencia a la flexión y a la compresión según une-en 196-1:1996.**

La tabla 10 y la figura 19 muestran los resultados de la resistencia a la compresión a la edad de 28 días, de morteros fabricados con las relaciones de 70 % CR, 30 % P; y 75 % CR, 25 % P; (los valores amarillos son los que cumplen con las exigencias requeridas).

Tabla 10: Resistencia a la compresión a los 28 días

Número de orden	Muestra	Tipo de roca	Resistencia a la compresión (N/mm ²)	
			(70 % CR, 30 % P)	(75 % CR, 25 % P)
1	SJ-20	Zeolitas	41,3	47,1
2	HM-36	Veritas	42,5	45,1
3	HM-64	Andesitas y doreítas biotítico piroxénicas con alteración hidrotermal	35,3	39,2
4	HM-70	Lamproítas	42,2	47,1
5	SJ-13	Tobas zeolíticas	41,2	44,9
6	HM-52	Dacitas y riodacitas	38,7	42,1
7	HM-44	Dacitas y riodacitas	40,2	42,1
8	HM-18	Dacitas biotíticas con cordierita y almandino	37,4	41,8
9	HM-33	Andesitas	37,7	42,6

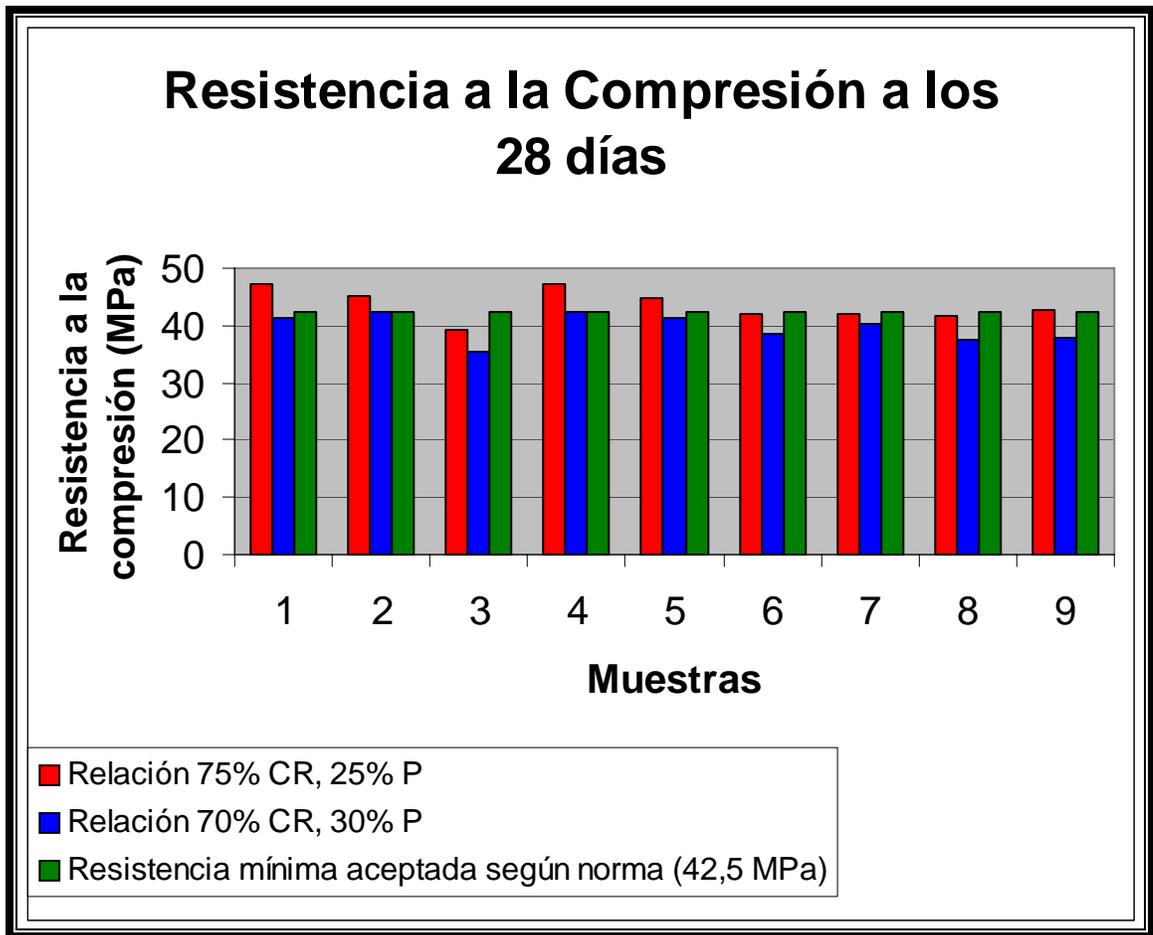


Figura 19: Gráfica de los resultados de resistencia a la compresión

La tabla 11 y la figura 20 muestran los resultados de la resistencia a la flexión a los 28 días, de morteros fabricados con las relaciones de 70 % CR, 30 % P; y 75 % CR, 25 % P. Los resultados de resistencia a la flexión no son determinantes en el comportamiento puzolánico de las muestras.

Tabla 11: Resistencia a la flexión a los 28 días

Número de orden	Muestra	Tipo de roca	Resistencia a la flexión (N/mm ²)	
			(70 % CR, 30 % P)	(75 % CR, 25 % P)
1	SJ-20	Zeolitas	6,4	6,8
2	HM-36	Veritas	7,1	6,5
3	HM-64	Andesitas y doreítas biotítico piroxénicas con alteración hidrotermal	5,6	5,7
4	HM-70	Lamproítas	7,1	6,6
5	SJ-13	Tobas zeolíticas	6,6	6,3
6	HM-52	Dacitas y riodacitas	6,1	6,5
7	HM-44	Dacitas y riodacitas	6,3	6,2
8	HM-18	Dacitas biotíticas con cordierita y almandita	6,0	6,2
9	HM-33	Andesitas	6,4	6,9

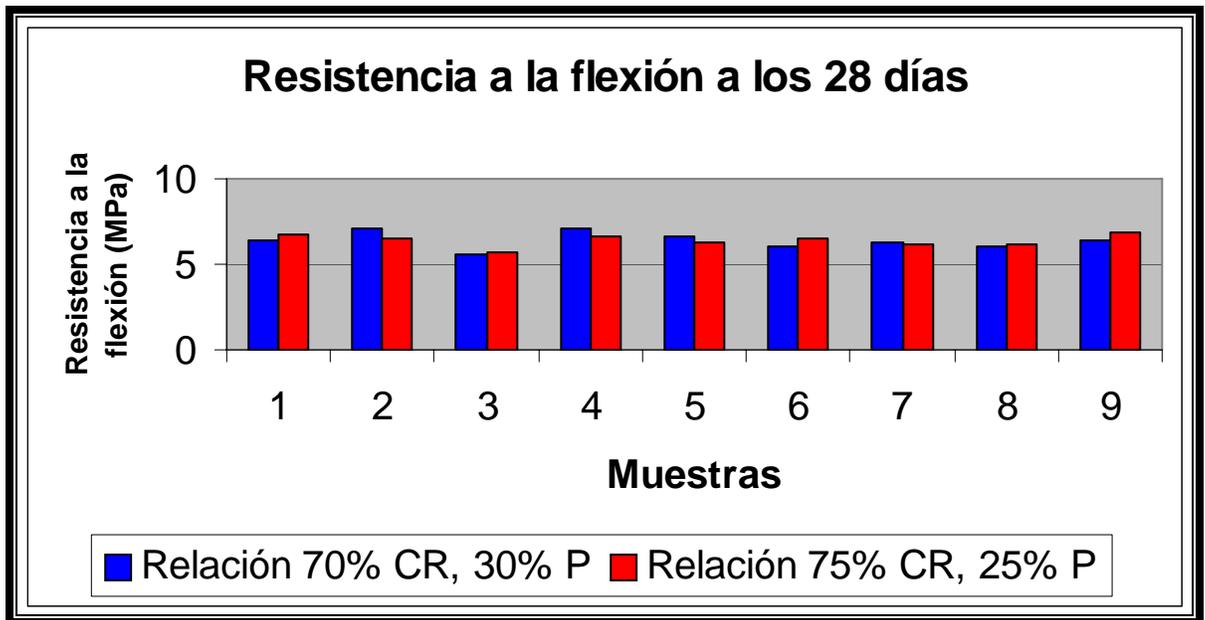


Figura 20: Gráfica de los resultados de resistencia a la flexión

- **Resistencia a la compresión para cementos resistentes a los sulfatos y al agua de mar**

La tabla 12 y la figura 21 muestran los resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días, de morteros fabricados con la relación 75 % CR y 25 % P, para compararlos con el porcentaje de resistencia mínima exigidos para la fabricación de cementos resistentes a los sulfatos (SR) y al agua de mar (MR), según las normas españolas UNE 80303-1:2001 y 80303-2:2001, respectivamente.

La resistencia a la compresión experimentada por el cemento de referencia fue de 60 N/mm², el cual es el valor comparativo para calcular el índice de actividad resistente (IAR) de los morteros preparados con la mezcla de cemento/puzolana a una proporción de 75/25 en masa.

Tabla 12: Índice de actividad resistente (IAR)

Número de orden	Muestra	Tipo de roca	Resistencia a la compresión a 28 días		Valoración
			N/mm ²	IAR (%)	
1	SJ-20	Zeolitas	47,1	78,50	Si
2	HM-36	Veritas	45,1	75,16	Si
3	HM-64	Andesitas y doreítas biotítico piroxénicas con alteración hidrotermal	39,2	65,33	No
4	HM-70	Lamproítas	47,1	78,50	Si
5	SJ-13	Tobas zeolíticas	44,9	74,83	No
6	HM-52	Dacitas y riodacitas	42,1	70,16	No
7	HM-44	Dacitas y riodacitas	42,1	70,16	No
8	HM-18	Dacitas biotíticas con cordierita y almandino	41,8	69,66	No
9	HM-33	Andesitas	42,6	71,00	No

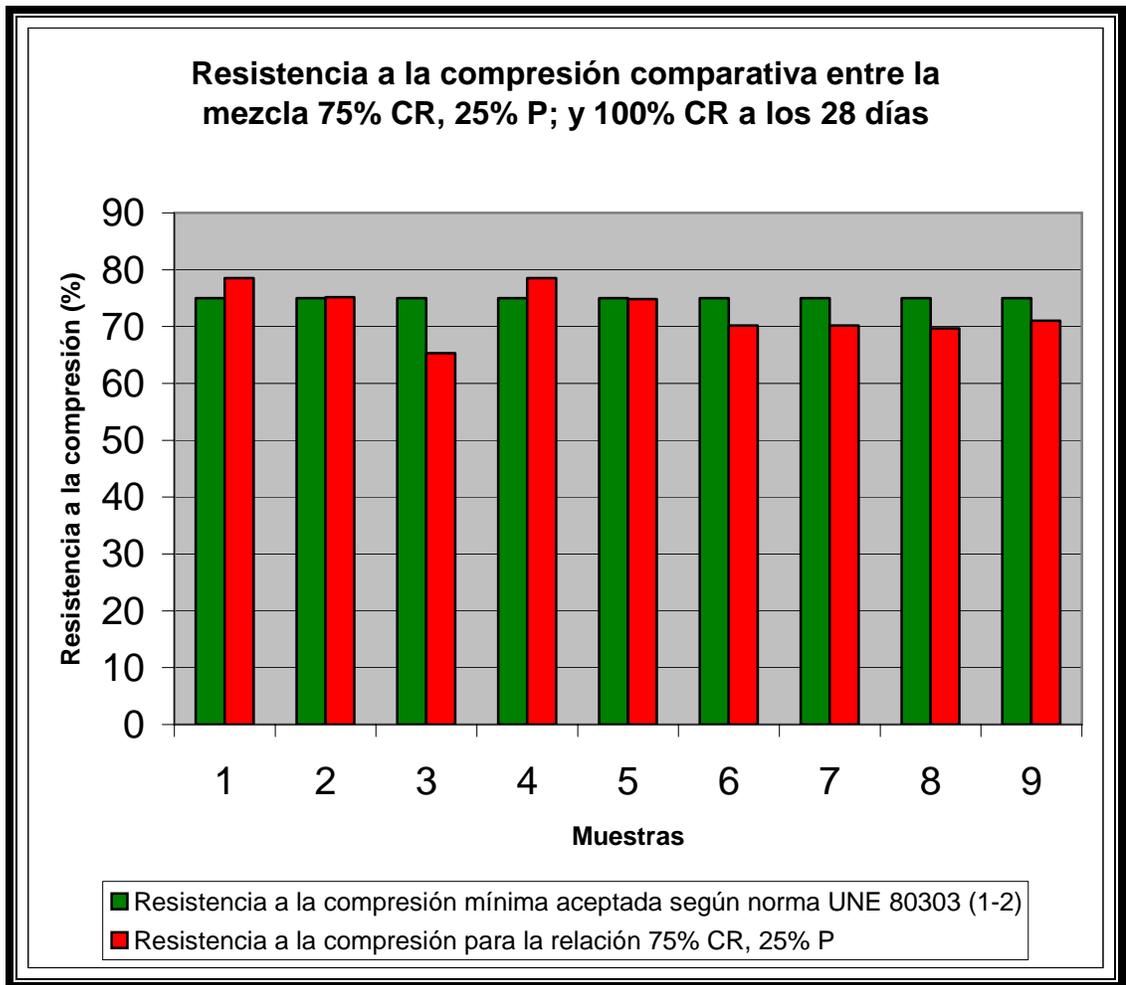


Figura 21: Gráfica comparativa del índice de actividad resistente

- **Índice de keil modificado**

La tabla 13 muestra los resultados del cálculo del índice de Keil modificado, tanto para 7 como para 28 días, y la valoración de este ensayo para las muestras estudiadas. La relación cemento de referencia/puzolana para este ensayo es de 70/30 en masa.

Tabla 13: Resultados del ensayo del Índice de Keil modificado

Número de orden	Muestra	Tipo de roca	A 7 días		A 28 días	
			Hi mod (%)	Valoración	Hi mod (%)	Valoración
1	SJ-20	Zeolitas	2,23	Muy pobre	26,95	Pobre
2	HM-36	Veritas	2,98	Muy pobre	31,64	Buena
3	HM-64	Andesitas y doreítas biotítico piroxénicas con alteración hidrotermal	0	Muy pobre	3,51	Pobre
4	HM-70	Lamproítas	11,19	Muy pobre	30,46	Buena
5	SJ-13	Tobas zeolíticas	21,64	Pobre	26,56	Pobre
6	HM-52	Dacitas y riodacitas	0	Muy pobre	16,79	Pobre
7	HM-44	Dacitas y riodacitas	0	Muy pobre	22,65	Pobre
8	HM-18	Dacitas biotíticas con cordierita y almandita	0	Muy pobre	11,71	Pobre
9	HM-33	Andesitas	0	Muy pobre	12,89	Pobre

Resultados de los ensayos químicos de puzolanidad

La tabla 14 y la figura 22, muestran los resultados y la valoración de los ensayos químicos de puzolanidad realizados a 7 días para muestras de cemento con puzolana en una relación de 75 % CR, 25 % P; según la norma europea EN 196-5:

1994, para cumplir con las especificaciones de las normas españolas UNE 80303-1:2001 y UNE 80303-2:2001, de cementos resistentes a los sulfatos y al agua de mar.

Tabla 14: Ensayo químico de puzolanidad a 7 días

Número de orden	Muestra	Tipo de roca	Concentración de iones hidroxilo (mmol/l)	Concentración en óxido de calcio (mmol/l)	Valoración
1	SJ-20	Zeolitas	46,4	9,2	SI
2	HM-36	Veritas	47,2	10,6	SI
3	HM-64	Andesitas y doreítas biotítico piroxénicas con alteración hidrotermal	47,0	14,8	NO
4	HM-70	Lamproítas	48,0	13,4	NO
5	SJ-13	Tobas zeolíticas	49,4	9,4	SI
6	HM-52	Dacitas y riodacitas	49,2	12,2	NO
7	HM-44	Dacitas y riodacitas	47,8	13,4	NO
8	HM-18	Dacitas biotíticas con cordierita y almandino	49,0	13,5	NO
9	HM-33	Andesitas	48,6	14,6	NO

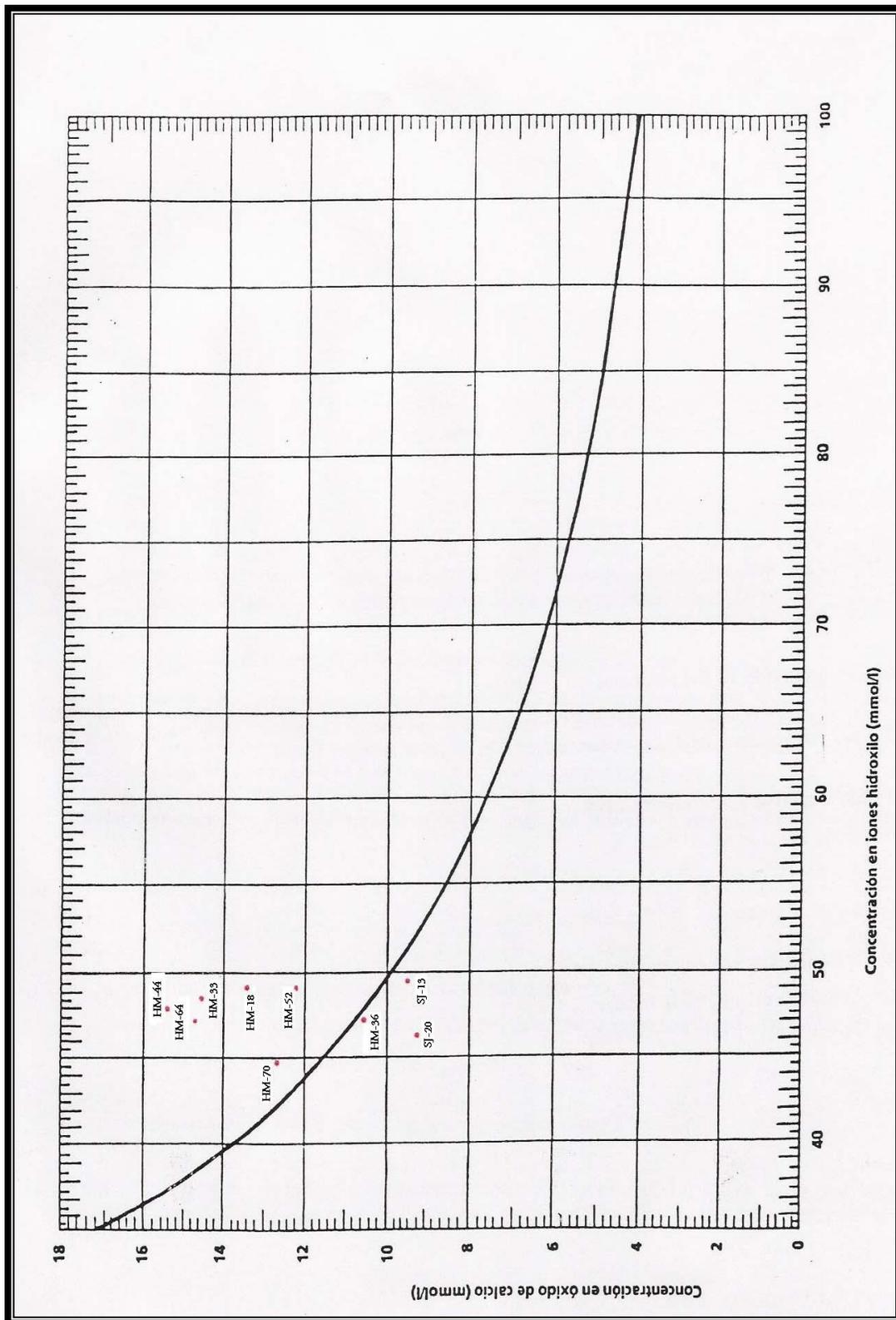


Figura 22: Diagrama para la determinación de la puzolanicidad (resultados)

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El primer punto que cabe destacar en el análisis de los resultados es que al hacer la comparación entre la tabla 9-1 (composición química media de las muestras analizadas), y la tabla 4-1 (composición química típica de las puzolanas volcánicas), puede comprobarse que las muestras estudiadas se encuentran dentro de los rangos de la composición química típica de las puzolanas volcánicas. Este hecho fue el punto de partida para la realización de este proyecto, ya que esto hace pensar que estos materiales pueden poseer las propiedades puzolánicas adecuadas para la fabricación de ciertos cementos con adiciones de puzolanas.

Normas españolas

En este capítulo se analizan los tipos de cementos comunes que se pueden fabricar con las muestras de puzolana volcánica natural estudiadas. Los tipos de cementos que se podrían fabricar con estos materiales, siempre y cuando cumplan con las normas correspondientes, norma española UNE-EN 197-1:2000, son los siguientes:

- CEM II/B-P
- CEM IV/A

Y sus correspondientes si cumplen con las normas de cementos resistentes a los sulfatos (SR) y al agua de mar (MR), UNE 80303-1 y UNE 80303-2, respectivamente:

- II/B-P 42,5 (N ó R)/SR UNE 80303-1
- IV/A 42,5 (N ó R)/SR UNE 80303-1
- II/B-P 42,5 (N ó R)/MR UNE 80303-2
- IV/A 42,5 (N ó R)/MR UNE 80303-2

Al haber utilizado como cemento de referencia un cemento tipo I 42,5 R/SR, se deben tomar como valores para el análisis de los resultados de las exigencias mecánicas, los referentes a los cementos comunes con una clase de resistencia de 42,5 N y 42,5 R; los cuales deben encontrarse entre 42,5 y 52,5 MPa.

Observando los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión de los morteros de ensayo con una relación 70 % cemento de referencia y 30 % de puzolana a una edad de 28 días; se pueden determinar que la única muestra que cumple con los requerimientos mecánicos para la fabricación de cementos con adiciones de puzolana (CEM II/B-P) y cementos puzolánicos (CEM IV/A) es la muestra HM-36 (veritas); ya que éstas se encuentran justo en el límite de la resistencia a la compresión para cementos comunes con una clase de resistencia de 42,5 N y 42,5 R.

Mediante los resultados de resistencia a la compresión a una edad de 28 días, obtenidos para los morteros de muestras mezcladas con cemento en una relación de 75 % cemento de referencia y 25 % de puzolana, se puede determinar que las muestras que cumplen con los requerimientos mecánicos para la fabricación de los cementos tipo CEM II/B-P y CEM IV/A, son las siguientes:

Muestra SJ-20, zeolita, RC = 47,1 MPa.

Muestra HM-36, verita, RC = 45,1 MPa.

Muestra HM-70, lamproíta, RC = 47,1 MPa.

Muestra SJ-13, toba zeolítica, RC = 44,9 MPa.

Muestra HM-33 andesita, RC = 42,6 MPa.

Donde: RC = resistencia a la compresión a los 28 días.

Las muestras que cumplen con los requerimientos mecánicos ($IAR \geq 75\%$) y químicos (cumplir con el ensayo de puzolanidad a la edad de 7 días, según el

método de la norma UNE-EN 196-5), para la fabricación de cementos resistentes a los sulfatos (SR) y al agua de mar (MR), son los siguientes:

- Muestra SJ-20, zeolita, IAR = 78,50 %
- Muestra HM-36, verita, IAR = 75,16 %

Donde: IAR = índice de actividad resistente.

Las muestras que cumplen con los requerimientos químicos de puzolanidad para la fabricación de cementos puzolánicos tipo CEM IV/A son las siguientes:

- Muestra SJ-20, zeolita.
- Muestra HM-36, verita.
- Muestra SJ-13, toba zeolítica.

Nota: este ensayo se realizó a los 7 días de edad, cuando en realidad se debía realizar a los 8 ó 15 días en su defecto; pero el hecho de que presente resultados positivos a los 7 días, quiere decir que también los presentará a los 8 ó 15 días. Este ensayo se realizó a la edad de 7 días con el propósito de aprovechar los resultados y comprobar si también cumplían con los requisitos exigidos por las normas de los cementos resistentes a los sulfatos y al agua de mar.

Se recomienda realizar este ensayo a 8 ó 15 días a las muestras HM-70 y HM-33, que dieron resultado negativo a los 7 días, cosa que no se realizó por falta de tiempo, ya que éstas cumplen con los requerimientos mecánicos para la fabricación de cementos puzolánicos, pero no con el ensayo químico de puzolanidad a los 7 días.

Las muestras que cumplen con los requerimientos tanto químicos de puzolanidad, como mecánicos para la realización de cementos puzolánicos tipo CEM IV/A son:

- Muestra SJ-20, zeolita.
- Muestra HM-36, verita.
- Muestra SJ-13, toba zeolítica.

Las tablas 15 y 16 muestran un resumen de los cementos que pueden fabricarse con los diferentes tipos de muestras y los diferentes tipos de relaciones (cemento de referencia/puzolana) empleadas en la realización de este proyecto. Es muy importante acotar que solo se están estudiando las exigencias mecánicas y químicas (puzolánicas), que requieren estos tipos de cementos para ser fabricados según las normas europeas; pero que para en realidad poder ser fabricados deben cumplir con todas las exigencias (químicas, físicas, mecánicas, de durabilidad, etc.) establecidas por la norma española UNE-EN 197-1:2000.

Tabla 15: Tipos de cemento que se pueden fabricar con una relación 70% CR, 30% P

Muestra	Tipos de cemento					
	CEM II/B-P	CEM IV/A	II/B-P 42,5/SR	II/B-P 42,5/MR	IV/A 42,5/SR	IV/A 42,5/MR
SJ-20	-	-	-	-	-	-
HM-36	X	X	X	X	X	X
HM-64	-	-	-	-	-	-
HM-70	-	-	-	-	-	-
SJ-13	-	-	-	-	-	-
HM-52	-	-	-	-	-	-
HM-44	-	-	-	-	-	-
HM-18	-	-	-	-	-	-
HM-33	-	-	-	-	-	-

Tabla 16: Tipos de cemento que se pueden fabricar con una relación 75% CR, 25% P

Muestra	Tipos de cemento					
	CEM II/B-P	CEM IV/A	II/B-P 42,5/SR	II/B-P 42,5/MR	IV/A 42,5/SR	IV/A 42,5/MR
SJ-20	X	X	X	X	X	X
HM-36	X	X	X	X	X	X
HM-64	-	-	-	-	-	-
HM-70	X	*	-	-	-	-
SJ-13	X	X	-	-	-	-
HM-52	-	-	-	-	-	-
HM-44	-	-	-	-	-	-
HM-18	-	-	-	-	-	-
HM-33	X	*	-	-	-	-

* Se debe realizar el ensayo químico de puzolanidad, a 8 ó 15 días para determinar si cumple con la norma UNE-EN 196-5 de puzolanidad para cementos puzolánicos, ya que éstas cumplen con los requerimientos de resistencia mecánica.

Índice de Keil modificado

En cuanto al ensayo del Índice de Keil modificado los resultados a 7 días de haber preparado los morteros, indicaban que los materiales eran puzolanas de una calidad “pobre” o “muy pobre”; lo cual es comprensible, ya que los cementos puzolánicos o con adiciones de puzolanas suelen tener una resistencia temprana muy baja, debido a que estos poseen un tiempo de endurecimiento considerablemente más lento que el cemento de referencia; pero que sin embargo con el tiempo pueden llegar a generar una mayor resistencia.

Los resultados para el ensayo del Índice de Keil modificado a 28 días de edad, indican que las muestras HM-36 y HM-70, son puzolanas de una calidad “buena” con un $H_i \text{ mod} = 31,64\%$ y $H_i \text{ mod} = 30,46\%$; los cuales están muy cercanos del límite inferior aceptable ($H_i \text{ mod} = 30\%$).

Campos de aplicación

Los campos de aplicación de los cementos que se pueden fabricar con las muestras estudiadas, para la categoría resistente de 42,5 y 42,5 (R) son:

- Cementos Pórtland tipo CEM II/B-P
 - Hormigones armados y en masa, y morteros en general.

- Cementos puzolánicos tipo CEM IV/A
 - Hormigones armados y en masa, y morteros en general, especialmente en ambientes moderadamente agresivos, obras hidráulicas y en hormigones con áridos reactivos.

- Cementos resistentes a los sulfatos SR, UNE 80303-1:2001
 - Hormigones en contacto con terrenos o aguas que contienen sulfatos (de calcio y/o magnesio).
 - Cimentaciones en terrenos yesíferos.
 - Obras marítimas en circunstancias muy agresivas.

- Cementos resistentes al agua de mar MR, UNE 80303-2:2001
 - hormigones en contacto con aguas o ambientes marinos.

Grados de utilización de los cementos para diferentes hormigones

Los cementos Pórtland tipo CEM II/B-P son:

- Muy utilizables para:
 - Hormigón en masa.
 - Hormigón con áridos potencialmente reactivos.

- Utilizables para:
 - Hormigón armado.
 - Hormigón compactado con rodillo.

- Menos (o poco) utilizables para:
 - Hormigón proyectado (R).
 - Hormigón para prefabricados no estructurales.
 - Hormigón para elementos estructurales prefabricados, no pretensados.
 - Hormigón para desencofrado, descimbrado y desmoldado rápidos (R).

- No utilizables para:
 - Hormigón pretensado,.
 - Hormigón de alta resistencia.
 - Hormigón para elementos estructurales prefabricados pretensados.

Los cementos puzolánicos tipo CEM IV/A son:

- Muy utilizables para:
 - Hormigón en masa.
 - Hormigón con áridos reactivos.

- Utilizables para:
 - Hormigón armado.
 - Hormigón proyectado (R).
 - Hormigón compactado con rodillo.
 - Hormigón para prefabricados no estructurales.
 - Hormigón para elementos estructurales prefabricados, no pretensados.

- Menos (o poco) utilizables para:
 - Hormigón para desencofrado, descimbrado y desmoldado rápidos (R).

- No utilizables para:
 - Hormigón pretensado.
 - Hormigón de alta resistencia.
 - Hormigón para elementos estructurales prefabricados pretensados.

Los cementos de la norma UNE 80303:1996 son los mismos que los de la norma UNE 80301:1996, sin más diferencia que las limitaciones superiores que se señalan para los contenidos de aluminato tricálcico (C_3A) y suma de aluminato tricálcico y ferrito-aluminato tetracálcico (C_3A+C_4AF). Estas limitaciones son más severas para los cementos resistentes a los sulfatos (de suelos y terrenos) y al agua de mar, SR, que para los únicamente resistentes al agua de mar, MR.

Unos y otros cementos en cuanto a tipos, subtipos y categorías, tienen los mismos grados de utilización y para las mismas finalidades y aplicaciones que sus homólogos de la norma EN 197-1:2000, a los que sustituyen siempre que los hormigones o las obras en que se hayan de emplear exijan, por razones de durabilidad, mayores

resistencias a los sulfatos y/o agua de mar que las que les pueden conferir los cementos equivalentes de dicha norma.

CONCLUSIONES

Las puzolanas como adiciones al cemento son de capital importancia dentro de la industria del cemento, ya que intervienen en la calidad del producto final, aumentan la eficiencia del proceso de fabricación y reducen los costos de producción.

Las puzolanas naturales incrementan la resistencia del hormigón a largo plazo, mejoran su resistencia química frente a sulfatos y medios con ligera acidez mineral y acidez orgánica, y eliminan o atenúan los efectos expansivos de la reacción de los áridos opalinos con los álcalis del cemento, o de cualquier otra procedencia. En cambio se dan cementos de endurecimiento más lento a plazos cortos, si bien este inconveniente, cuando lo sea, se puede paliar, en parte, con una molienda más fina del cemento.

El calor generado por la mezcla cemento/puzolana es menor que el generado por el mismo peso de solo cemento, lo cual incide en la durabilidad del concreto dado que se disminuyen las tensiones generadas en la dilato-contracción térmica.

El uso de las puzolanas permite el diseño de mezcla de hormigones más impermeables, cuyo período de deterioro por el lixiviado de la cal libre se reduce.

Todas las muestras estudiadas, zeolitas, veritas, andesitas, dacitas, riodacitas, doreítas, tobas zeolíticas y lamproítas, corresponden a materiales puzolánicos, ya que las características de su composición química así lo indican; pero no todas son de buena calidad y sólo algunas de ellas son materiales aptos para la fabricación de cementos puzolánicos o con adiciones de puzolanas.

Según el ensayo del Índice de Keil modificado, el cual es el principal criterio por el cual se basa la empresa cementera Holcim para evaluar la calidad de un material

como puzolana, las únicas muestras que presentaron resultados positivos fueron la HM-36 (veritas) y la HM-70 (lamproítas); las cuales mostraron una valoración de calidad de puzolana “buena” a los 28 días de edad.

La muestra que demostró poseer la mejores propiedades puzolánicas fue la muestra de veritas, la HM-36, ya que los morteros elaborados con este material tanto en una proporción de cemento de referencia/puzolana 75/25 como con una relación de 70/30, cumplieron los requerimientos mecánicos y químicos puzolánicos, en el caso que así se requiriera; para la fabricación de los siguientes cementos: CEM IIB/P, CEM IV/A, II/B-P 42,5 (N ó R)/SR UNE 80303-1, IV/A 42,5 (N ó R)/SR UNE 80303-1, II/B-P 42,5 (N ó R)/MR UNE 80303-2, IV/A 42,5 (N ó R)/MR UNE 80303-2.

La segunda muestra que demostró poseer muy buenas propiedades puzolánicas, tanto mecánicas como químicas, fue la muestra SJ-20, representativa de zeolitas de la variedad mordenita, ya que con ésta, pero solo con una proporción de cemento de referencia/puzolana de 75/25, se podrían elaborar los mismos cementos que con la muestra HM-36.

La muestra de tobas zeolíticas SJ-13, demostró cumplir las exigencias químicas puzolánicas y mecánicas para la fabricación de cementos tipo CEM IIB/P y CEM IV/A; pero no cumplió con la mínima exigencia mecánica para la fabricación de cementos resistentes a los sulfatos y al agua de mar.

Por último, las muestras HM-70 (lamproítas) y HM-33 (andesitas), solo cumplieron con los requerimientos mecánicos para la fabricación de cementos tipo CEM IIB/P, pero deben realizarse los ensayos químicos de puzolanidad según la norma UNE-EN 196-5, a una edad de 8 ó 15 días en su defecto, los cuales no pudieron realizarse por motivos de tiempo, ya que estas muestras cumplen con los requerimientos mecánicos para la fabricación de cementos puzolánicos tipo CEM IV/A. No obstante, estas muestras no cumplieron con el ensayo químico de puzolanidad a 7 días; por lo

que no son aptas para la elaboración de cementos resistentes a los sulfatos y al agua de mar.

Es de suma importancia destacar que el hecho de que algunas de las muestras estudiadas posean las propiedades químicas puzolánicas o mecánicas aptas para la fabricación de ciertos cementos comunes según la norma UNE-EN 197-1:2000 no quiere decir necesariamente que éstos se puedan fabricar, ya que para poder elaborar estos cementos las muestras de cemento mezclado deben aprobar todas las exigencias mecánicas, físicas, químicas y de durabilidad de dicha norma.

RECOMENDACIONES

Gracias a los resultados obtenidos en este proyecto se puede recomendar la continuidad del estudio de estos materiales, ya que algunos de ellos demostraron poseer muy buenas propiedades puzolánicas y vale la pena confirmarlo por medio de un mayor número de ensayos.

Este proyecto solo se centró en la determinación de las propiedades puzolánicas de las muestras estudiadas, pero un punto muy importante a tener en cuenta es que para que realmente se puedan fabricar cementos con estos materiales, las muestras ensayadas deben cumplir todas las exigencias de la norma UNE-EN 197-1:2000, por lo que se recomienda realizar todos los ensayos mecánicos, físicos, químicos y de durabilidad a las muestras que mostraron resultados positivos para comprobar si efectivamente se pueden fabricar cementos comunes tipo CEM II y tipo CEM IV que cumplan con las exigencias de la norma.

Otro punto muy importante en el que se debe profundizar es la proporción de mezcla con el cemento de referencia para elaborar los morteros de ensayo, ya que estas proporciones se relacionan directamente con los resultados, así que alguna muestra que no cumpla con algunos requisitos a cierta proporción, puede que cumpla con ellos con otra proporción diferente. Esta es la razón por la cual se recomienda que se realicen ensayos con distintas proporciones de cemento de referencia-puzolana.

Se apunta también la conveniencia de realizar los ensayos químicos de puzolanicidad de la norma UNE-EN 196-5, a la edad de 8 ó 15 días en su defecto, a las muestras HM-70 (lamproítas) y HM-33 (andesitas), los cuales no se pudieron realizar por causa de falta de tiempo, pero que son muy importantes, ya que estas muestras cumplen con los requerimientos mecánicos para la fabricación de cementos puzolánicos tipo CEM IV/A.

Por otro lado, también sería recomendable que se realizara una mayor cantidad de ensayos de resistencia a la compresión a la muestra SJ-13, ya que ésta se encuentra justo en el límite del índice de actividad resistente ($IAR = 74,83 \%$; cuando lo mínimo es 75%), y ya que cumple con el ensayo químico de puzolanicidad a una edad de 7 días, si se demostrara que esta muestra puede poseer un $IAR \geq 75 \%$, también se podrían fabricar cementos resistentes a los sulfatos (SR) y al agua de mar (MR) con ella.

Como última recomendación se propone que se realice un estudio a más detalle de las reservas de los yacimientos de los materiales que dieron resultados positivos, ya que aunque a priori este proyecto se realizó teniendo en cuenta las dimensiones de los afloramientos, éstas se realizaron por aproximaciones visuales y por los datos de los mapas geológicos, pero se deben estudiar más a fondo para contar con un criterio más confiable.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas

- [1] UNE-EN 197-1:2000, Cemento; Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.
- [2] UNE 80303-1:2001, Cementos con características adicionales; Parte 1: Cementos resistentes a los sulfatos.
- [3] UNE 80303-2:2001, Cementos con características adicionales; Parte 2: Cementos resistentes al agua de mar.

Bibliografía general

- ALIQUE, O., CAMBRONERO, L., MORANO, A. y RUIZ-ROMÁN, J.M. (2000): Estudio sobre la aplicabilidad de materiales volcánicos de carácter ácido procedentes de el salvador como material de construcción. Proyecto Fin de Carrera, ETSIM.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, El Cabo de Gata.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Almería.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, El Pozo de los Frailes.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Carboneras.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Tabernas.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Sorbas.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Mojácar.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Vera.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Garrucha.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Huerca Overa.

- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Águilas.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Puerto Lumbreras.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Mazarrón.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Lorca.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Totana.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Fuente Álamo de Murcia.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Cartagena.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Alcantarilla.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Murcia.
- IGME: Mapa geológico de España, E. 1:50000, Macael.
- IGME: Mapa de rocas industriales de España, E. 1:200000, Murcia.
- IGME: Mapa de rocas industriales de España, E. 1:200000, Baza.
- IGME: Mapa de rocas industriales de España, E. 1:200000, Almería.
- IGME: Mapa de rocas industriales de España, E. 1:200000, Garrucha.
- LOPEZ RUIZ, J., RODRÍGUEZ BADIOLA, E. (1980): La región volcánica neógena del sureste de España en Estudios Geológicos N° 36, pp 5-63, Madrid.
- MONTOYA, MESEGER, MORÁN (2000): Hormigón armado. Gustavo Gili, Barcelona.
- PUENTE CASTILLO, Marta Beatriz (2004): Elaboración de morteros con zeolita. Proyecto fin de carrera, ETSIM.
- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJERCITO: Mapa topográfico de El Cabo de Gata. Cartografía general de España, mapa general, serie L.
- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJERCITO: Mapa topográfico de El Pozo de los Frailes. Cartografía general de España, mapa general, serie L.
- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJERCITO: Mapa topográfico de Carboneras. Cartografía general de España, mapa general, serie L.

- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJERCITO: Mapa topográfico de Sorbas. Cartografía general de España, mapa general, serie L.
- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJERCITO: Mapa topográfico de Mojácar. Cartografía general de España, mapa general, serie L.
- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJERCITO: Mapa topográfico de Vera. Cartografía general de España, mapa general, serie L.
- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJERCITO: Mapa topográfico de Garrucha. Cartografía general de España, mapa general, serie L.
- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJERCITO: Mapa topográfico de Águilas. Cartografía general de España, mapa general, serie L.
- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJERCITO: Mapa topográfico de Puerto Lumbreras. Cartografía general de España, mapa general, serie L.
- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJERCITO: Mapa topográfico de Mazarrón. Cartografía general de España, mapa general, serie L.
- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJERCITO: Mapa topográfico de Fuente Álamo de Murcia. Cartografía general de España, mapa general, serie L.
- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJERCITO: Mapa topográfico de Cartagena. Cartografía general de España, mapa general, serie L.
- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJERCITO: Mapa topográfico de Alcantarilla. Cartografía general de España, mapa general, serie L.
- SERVICIO GEOGRÁFICO DEL EJERCITO: Mapa topográfico de Murcia. Cartografía general de España, mapa general, serie L.
- TOBÓN, Jorge Iván (2000): Puzolanas en los alrededores de Irra. Departamento de recursos minerales, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.
- UNE-EN 197-2:2000, Cemento; Parte 2: Evaluación de la conformidad.
- UNE-EN 196-1:1996, Métodos de ensayo de cementos; Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.
- UNE-EN 196-2:1996, Método de ensayos de cementos; Parte 2: Análisis químico de cementos.

- UNE-EN 196-5:1996, Métodos de ensayo de cementos; Parte 5: Ensayo de puzolanicidad para cementos puzolánicos.
- UNE-EN 196-6, Métodos de ensayo de cementos; Parte 6: Determinación de la finura.
- UNE 80300 IN:2000, Cementos; Recomendaciones para el uso de los cementos.
- EN 933-9, Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos; Parte 9: Evaluación de los finos.
- PrEN 13639:1999, Determinación del contenido de carbono orgánico total de las calizas.

ANEXOS

ANEXO NÚMERO 1

PUNTOS DE MUESTREO

A continuación se presentan las tablas A-1 a la A-14, las cuales muestran una breve descripción litológica y la ubicación, tanto en coordenadas geográficas como en coordenadas UTM, de los puntos donde se pretendía recolectar las muestras.

Tabla A-1: Toma de muestras en el área de El Cabo de Gata

N° de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M1	Brechas piroclásticas de andesita piroxénica.	Latitud	36° 45' 00"	N	4 067 550
		Longitud	2° 11' 29"	E	572 150

Tabla A-2: Toma de muestras en el área de El Pozo de los Frailes

N° de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M2	Brechas piroclásticas de andesita piroxénica con alteración endógena.	Latitud	36° 44' 07"	N	4 065 800
		Longitud	2° 10' 30"	E	573 700
H-M3	Andesitas piroxénicas con alteración endógena.	Latitud	36° 46' 11"	N	4 069 700
		Longitud	2° 10' 30"	E	574 000
H-M4	Andesitas piroxénicas con alteración intensa.	Latitud	36° 45' 23"	N	4 068 450
		Longitud	2° 09' 20"	E	575 500
H-M5	Brechas piroclásticas de andesita piroxénica	Latitud	36° 44' 16"	N	4 066 400
		Longitud	2° 07' 54"	E	577 450
H-M6	Andesitas piroxénicas con alteración endógena.	Latitud	36° 47' 47"	N	4 072 600
		Longitud	2° 09' 05"	E	575 400
H-M7	Andesitas piroxénicas con alteración intensa.	Latitud	36° 46' 43"	N	4 070 700
		Longitud	2° 07' 56"	E	577 300
H-M8	Andesitas piroxénicas con alteración endógena.	Latitud	36° 45' 55"	N	4 069 050
		Longitud	2° 06' 54"	E	578 950
H-M9	Andesitas piroxénicas con alteración endógena.	Latitud	36° 49' 27"	N	4 075 750
		Longitud	2° 08' 10"	E	576 900
H-M10	Tobas de lapilli dacítico.	Latitud	36° 49' 00"	N	4 074 850

		Longitud	2° 07' 36"	E	577 750
H-M11	Brechas piroclásticas de andesita anfibólica.	Latitud	36° 48' 00"	N	4 073 050
		Longitud	2° 06' 30"	E	579 450
H-M12	Andesitas piroxénicas.	Latitud	36° 46' 50"	N	4 070 850
		Longitud	2° 05' 02"	E	581 600
H-M13	Andesitas piroxénicas.	Latitud	36° 49' 34"	N	4 075 850
		Longitud	2° 02' 44"	E	584 700
H-M14	Brechas piroclásticas poligénicas.	Latitud	36° 49' 50"	N	4 076 500
		Longitud	2° 05' 14"	E	581 200

Tabla A-3: Toma de muestras en el área de Carboneras

N° de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M15	Conglomerados y brechas piroclásticas anfibólicas de matriz rojiza.	Latitud	36° 53' 10"	N	4 082 600
		Longitud	2° 07' 54"	E	577 100
H-M16	Andesitas piroxénicas con alteración endógena.	Latitud	36° 51' 06"	N	4 078 800
		Longitud	2° 07' 54"	E	580 250
H-M17	Dacitas biotítico-anfibólicas rojo-violáceas.	Latitud	36° 50' 33"	N	4 077 700
		Longitud	2° 04' 48"	E	582 000
H-M18	Dacitas biotíticas con cordierita y almandita.	Latitud	36° 57' 41"	N	4 090 950
		Longitud	2° 10' 10"	E	573 900
H-M19	Brechas piroclásticas de andesita y dacita anfibólica.	Latitud	36° 54' 41"	N	4 085 300
		Longitud	2° 06' 04"	E	580 000
H-M20	Dacitas y andesitas anfibólicas.	Latitud	36° 52' 31"	N	4 081 050
		Longitud	2° 03' 14"	E	584 250
H-M21	Dacitas biotítico-anfibólicas rojo-violáceas con alteración intensa.	Latitud	36° 52' 08"	N	4 080 250
		Longitud	2° 02' 37"	E	585 150
H-M22	Brechas piroclásticas de andesita piroxénica.	Latitud	36° 50' 20"	N	4 077 350
		Longitud	2° 00' 32"	E	588 350
H-M23	Dacitas y andesitas	Latitud	36° 55' 37"	N	4 087 000

	anfíbólicas.	Longitud	2° 02' 27"	E	585 300
H-M24	Brechas piroclásticas de andesita y dacita anfíbólica.	Latitud	36° 54' 41"	N	4 084 950
		Longitud	2° 01' 07"	E	587 200
H-M25	Dacitas y andesitas anfíbólicas.	Latitud	36° 54' 00"	N	4 083 800
		Longitud	2° 00' 16"	E	588 550
H-M26	Brechas piroclásticas de andesita piroxénica.	Latitud	36° 53' 10"	N	4 083 000
		Longitud	1° 59' 40"	E	589 450
H-M27	Brechas piroclásticas de dacita y andesita anfíbólica.	Latitud	36° 56' 44"	N	4 089 050
		Longitud	2° 00' 40"	E	587 850
H-M28	Tobas poligénicas.	Latitud	36° 55' 24"	N	4 086 750
		Longitud	1° 58' 36"	E	591 000
H-M29	Andesitas piroxénicas.	Latitud	36° 54' 50"	N	4 085 650
		Longitud	1° 57' 48"	E	592 200
H-M30	Brechas piroclásticas de dacita y andesita anfíbólica.	Latitud	36° 59' 00"	N	4 093 350
		Longitud	1° 57' 05"	E	593 200
H-M31	Brechas piroclásticas de andesita piroxénica.	Latitud	36° 57' 00"	N	4 089 800
		Longitud	1° 54' 36"	E	596 850

Tabla A-4: Toma de muestras en el área de Sorbas

N° de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M32	Rocas volcánicas poligénicas.	Latitud	37° 00' 44"	N	4 096 800
		Longitud	1° 54' 40"	E	596 750
H-M33	Rocas volcánicas poligénicas.	Latitud	37° 01' 45"	N	4 098 700
		Longitud	1° 53' 18"	E	598 800
H-M34	Rocas volcánicas poligénicas.	Latitud	37° 02' 26"	N	4 100 000
		Longitud	1° 52' 46"	E	599 450

Tabla A-5: Toma de muestras en el área de Mojácar

Nº de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M35	Andesitas.	Latitud	37° 04' 00"	N	4 102 850
		Longitud	1° 51' 03"	E	601 950

Tabla A-6: Toma de muestras en el área de Vera

Nº de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M36	Veritas.	Latitud	37° 12' 06"	N	4 117 850
		Longitud	1° 54' 07"	E	597 500
H-M37	Veritas.	Latitud	37° 12' 41"	N	4 119 250
		Longitud	1° 55' 50"	E	594 950
H-M38	Metabasitas y diabasas.	Latitud	37° 12' 19"	N	4 118 050
		Longitud	2° 05' 13"	E	581 100
H-M39	Metabasitas y diabasas.	Latitud	37° 15' 24"	N	4 123 750
		Longitud	2° 03' 00"	E	584 400

Tabla A-7: Toma de muestras en el área de Garrucha

Nº de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M40	Rocas lamproíticas.	Latitud	37° 12' 52"	N	4 119 250
		Longitud	1° 50' 36"	E	602 600
H-M41	Rocas lamproíticas.	Latitud	37° 12' 52"	N	4 119 250
		Longitud	1° 49' 46"	E	603 750
H-M42	Dacitas y riodacitas.	Latitud	37° 14' 16"	N	4 122 000
		Longitud	1° 49' 26"	E	604 250
H-M43	Rocas lamproíticas.	Latitud	37° 19' 11"	N	4 131 000
		Longitud	1° 49' 33"	E	603 900
H-M44	Dacitas y riodacitas.	Latitud	37° 18' 23"	N	4 129 600

		Longitud	1° 47' 38"	E	606 700
--	--	----------	------------	---	---------

Tabla A-8: Toma de muestras en el área de Águilas

N° de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M45	Diabasas.	Latitud	37° 27' 49"	N	4 146 950
		Longitud	1° 49' 52"	E	603 200
H-M46	Diabasas.	Latitud	37° 28' 41'	N	4 148 550
		Longitud	1° 49' 42"	E	603 600
H-M47	Diabasas.	Latitud	37° 29' 31"	N	4 150 100
		Longitud	1° 47' 30"	E	606 800
H-M48	Riodacitas.	Latitud	37° 29' 36"	N	4 150 250
		Longitud	1° 40' 18"	E	617 500

Tabla A-9: Toma de muestras en el área de Puerto Lumbreras

N° de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M49	Diabasas y metabasitas.	Latitud	37° 30' 41"	N	4 152 300
		Longitud	1° 47' 52"	E	606 250
H-M50	Riodacitas.	Latitud	37° 38' 39"	N	4 167 400
		Longitud	1° 31' 18"	E	630 400

Tabla A-10: Toma de muestras en el área de Mazarrón

N° de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M51	Dacitas, riodacitas, tobas y vitrófidos.	Latitud	37° 35' 16"	N	4 161 300
		Longitud	1° 29' 08"	E	633 700
H-M52	Dacitas, riodacitas, tobas y vitrófidos.	Latitud	37° 38' 32"	N	4 167 500
		Longitud	1° 24' 53"	E	639 800
H-M53	Dacitas, riodacitas, tobas y vitrófidos.	Latitud	37° 35' 58"	N	4 163 150
		Longitud	1° 21' 00"	E	645 600

H-M54	Dacitas con alteración hidrotermal.	Latitud	37° 36' 06"	N	4 163 150
		Longitud	1° 19' 30"	E	647 850
H-M55	Dacitas, riodacitas, tobas y vitrófidos.	Latitud	37° 36' 00"	N	4 163 000
		Longitud	1° 18' 22"	E	649 500
H-M56	Dacitas, riodacitas, tobas y vitrófidos.	Latitud	37° 35' 58"	N	4 162 950
		Longitud	1° 17' 22"	E	651 000
H-M57	Rocas lamprofídicas.	Latitud	37° 36' 31"	N	4 164 000
		Longitud	1° 15' 48"	E	653 250
H-M58	Dacitas, riodacitas, tobas y vitrófidos.	Latitud	37° 37' 36"	N	4 165 950
		Longitud	1° 20' 15"	E	646 700

Tabla A-11: Toma de muestras en el área de Cartagena

N° de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M59	Basaltos.	Latitud	37° 39' 37"	N	4 169 700
		Longitud	1° 10' 08"	E	661 500
H-M60	Basaltos.	Latitud	37° 39' 29"	N	4 169 700
		Longitud	1° 05' 04"	E	668 950
H-M61	Andesitas y doreítas biotíticas piroxénicas con alteración hidrotermal.	Latitud	37° 37' 49"	N	4 166 900
		Longitud	0° 57' 49"	E	679 800
H-M62	Andesitas y doreítas biotíticas piroxénicas con alteración hidrotermal.	Latitud	37° 38' 42"	N	4 169 000
		Longitud	0° 55' 44"	E	682 800
H-M63	Andesitas y doreítas biotíticas piroxénicas con alteración hidrotermal.	Latitud	37° 38' 52"	N	4 169 450
		Longitud	0° 53' 56"	E	685 400
H-M64	Andesitas y doreítas biotíticas piroxénicas con alteración hidrotermal.	Latitud	37° 36' 55"	N	4 165 450
		Longitud	0° 53' 48"	E	685 700

Tabla A-12: Toma de muestras en el área de Fuente Álamo de Murcia

Nº de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M65	Basaltos.	Latitud	37° 40' 05"	N	4 171 550
		Longitud	1° 08' 37"	E	663 750
H-M66	Basaltos.	Latitud	37° 40' 05"	N	4 170 900
		Longitud	1° 07' 57"	E	664 750

Tabla A-13: Toma de muestras en el área de Alcantarilla

Nº de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M67	Veritas.	Latitud	37° 57' 26"	N	4 201 400
		Longitud	1° 21' 52"	E	643 600
H-M68	Veritas.	Latitud	37° 57' 26"	N	4 202 150
		Longitud	1° 21' 28"	E	644 200
H-M69	Veritas.	Latitud	37° 57' 44"	N	4 202 700
		Longitud	1° 21' 12"	E	644 600

Tabla A-14: Toma de muestras en el área de Murcia

Nº de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M70	Lamproítas.	Latitud	37° 59' 50"	N	4 207 750
		Longitud	1° 57' 56"	E	678 600
H-M71	Lamproítas.	Latitud	37° 59' 50"	N	4 207 750
		Longitud	1° 57' 42"	E	678 950

A continuación se presentan las tablas A-15 a la A-26, en las cuales se presenta la ubicación real de las muestras tomadas en el campo.

Tabla A-15: Coordenadas reales de las muestras tomadas en el área de El Cabo de Gata

N° de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M1	Andesita piroxénica.	Latitud	36° 43' 57"	N	4 065 555
		Longitud	2° 12' 01"	E	571 409

Tabla A-16: Coordenadas reales de las muestras tomadas en el área de Pozo de los Frailes

N° de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M2	Andesita piroxénica con alteración endógena.	Latitud	36° 43' 43"	N	4 065 155
		Longitud	2° 10' 24"	E	573 813
H-M2-A	Andesitas piroxénicas con alteración endógena.	Latitud	36° 43' 43"	N	4 065 155
		Longitud	2° 10' 24"	E	573 813
H-M4	Andesitas piroxénicas con alteración intensa.	Latitud	36° 45' 35"	N	4 068 608
		Longitud	2° 09' 05"	E	575 754
H-M5	Brechas piroclásticas de andesita piroxénica	Latitud	36° 44' 13"	N	4 066 115
		Longitud	2° 08' 11"	E	577 102
H-M6	Andesitas piroxénicas con alteración endógena.	Latitud	36° 47' 46"	N	4 072 683
		Longitud	2° 08' 12"	E	577 037
H-M8	Andesitas piroxénicas con alteración endógena.	Latitud	36° 45' 33"	N	4 068 599
		Longitud	2° 06' 34"	E	579 490
H-M9	Andesitas piroxénicas con alteración endógena.	Latitud	36° 49' 16"	N	4 075 436
		Longitud	2° 08' 08"	E	577 088
H-M10	Tobas de lapilli dacítico.	Latitud	36° 48' 56"	N	4 074 830
		Longitud	2° 07' 56"	E	577 397
H-M11	Brechas piroclásticas de andesita anfibólica.	Latitud	36° 47' 49"	N	4 072 780
		Longitud	2° 06' 31"	E	579 520

H-M12	Andesitas piroxénicas.	Latitud	36° 46' 49"	N	4 070 942
		Longitud	2° 05' 44"	E	580 700
H-M13	Andesitas piroxénicas.	Latitud	36° 49' 25"	N	4 075 804
		Longitud	2° 03' 05"	E	584 614

Tabla A-17: Coordenadas reales de las muestras tomadas en el área de Carboneras

N° de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M15	Conglomerados y brechas piroclásticas anfibólicas de matriz rojiza.	Latitud	36° 53' 46"	N	4 083 780
		Longitud	2° 07' 03"	E	578 642
H-M16	Andesitas piroxénicas con alteración endógena.	Latitud	36° 51' 14"	N	4 079 117
		Longitud	2° 05' 54"	E	580 386
H-M18	Dacitas biotíticas con cordierita y almandita.	Latitud	36° 57' 41"	N	4 090 967
		Longitud	2° 10' 27"	E	573 531
H-M19	Brechas piroclásticas de andesita y dacita anfibólica.	Latitud	36° 54' 40"	N	4 085 452
		Longitud	2° 06' 17"	E	579 749
H-M21	Dacitas biotítico-anfibólicas rojo-violáceas con alteración intensa.	Latitud	36° 51' 16"	N	4 079 209
		Longitud	2° 02' 42"	E	585 128
H-M22	Brechas piroclásticas de andesita piroxénica.	Latitud	36° 50' 11"	N	4 077 248
		Longitud	2° 00' 40"	E	588 174
H-M23	Dacitas y andesitas anfibólicas.	Latitud	36° 55' 34"	N	4 087 165
		Longitud	2° 02' 34"	E	585 268
H-M24	Brechas piroclásticas de andesita y dacita anfibólica.	Latitud	36° 54' 05"	N	4 084 441
		Longitud	2° 01' 31"	E	586 844
H-M27	Brechas piroclásticas de dacita y andesita anfibólica.	Latitud	36° 56' 35"	N	4 089 079
		Longitud	2° 00' 48"	E	587 870
H-M31	Brechas piroclásticas de andesita piroxénica.	Latitud	36° 57' 04"	N	4 090 080
		Longitud	1° 54' 29"	E	597 237

Tabla A-18: Coordenadas reales de las muestras tomadas en el área de Sorbas

Nº de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M33	Rocas volcánicas poligénicas.	Latitud	37° 01' 53"	N	4 098 994
		Longitud	1° 52' 54"	E	599 478
H-M34	Rocas volcánicas poligénicas.	Latitud	37° 02' 27"	N	4 100 048
		Longitud	1° 52' 25"	E	600 175

Tabla A-19: Coordenadas reales de las muestras tomadas en el área de Vera

Nº de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M36	Veritas.	Latitud	37° 12' 11"	N	4 118 020
		Longitud	1° 54' 16"	E	597 227
H-M37	Veritas.	Latitud	37° 12' 51"	N	4 119 242
		Longitud	1° 55' 45"	E	595 022
H-M38	Metabasitas y diabasas.	Latitud	37° 12' 24"	N	4 118 265
		Longitud	2° 05' 02"	E	581 306
H-M39	Metabasitas y diabasas.	Latitud	37° 15' 35"	N	4 124 193
		Longitud	2° 02' 34"	E	584 894

Tabla A-20: Coordenadas reales de las muestras tomadas en el área de Garrucha

Nº de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M41	Rocas lamproíticas.	Latitud	37° 12' 57"	N	4 119 535
		Longitud	1° 49' 56"	E	603 623
H-M42	Dacitas y riodacitas.	Latitud	37° 14' 13"	N	4 121 876
		Longitud	1° 49' 46"	E	603 823
H-M44	Dacitas y riodacitas.	Latitud	37° 18' 15"	N	4 129 364
		Longitud	1° 47' 48"	E	606 647

Tabla A-21: Coordenadas reales de las muestras tomadas en el área de Águilas

Nº de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M48	Riodacitas.	Latitud	37° 29' 48"	N	4 150 865
		Longitud	1° 40' 29"	E	617 166

Tabla A-22: Coordenadas reales de las muestras tomadas en el área de Mazarrón

Nº de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M51	Dacitas, riodacitas, tobas y vitrófidos.	Latitud	37° 35' 31"	N	4 161 678
		Longitud	1° 29' 06"	E	633 760
H-M52	Dacitas, riodacitas, tobas y vitrófidos.	Latitud	37° 38' 35"	N	4 167 472
		Longitud	1° 24' 35"	E	640 303
H-M53	Dacitas, riodacitas, tobas y vitrófidos.	Latitud	37° 36' 09"	N	4 163 061
		Longitud	1° 21' 03"	E	645 593
H-M53-A	Tobas.	Latitud	37° 36' 09"	N	4 163 061
		Longitud	1° 21' 03"	E	645 593
H-M54	Dacitas con alteración hidrotermal.	Latitud	37° 36' 12"	N	4 163 182
		Longitud	1° 19' 21"	E	648 070
H-M58	Dacitas, riodacitas, tobas y vitrófidos.	Latitud	37° 37' 50"	N	4 166 201
		Longitud	1° 20' 28"	E	646 384

Tabla A-23: Coordenadas reales de las muestras tomadas en el área de Cartagena

Nº de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M60	Basaltos.	Latitud	37° 39' 14"	N	4 169 231
		Longitud	1° 04' 42"	E	669 518
H-M61	Andesitas y doreítas biotíticas piroxénicas.	Latitud	37° 37' 43"	N	4 166 635
		Longitud	0° 57' 10"	E	680 651
H-M64	Andesitas y doreítas	Latitud	37° 37' 22"	N	4 166 120

	biotíticas piroxénicas con alteración hidrotermal.	Longitud	0° 53' 56"	E	685 426
--	--	----------	------------	---	---------

Tabla A-24: Coordenadas reales de las muestras tomadas en el área de Alcantarilla

N° de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M67	Veritas.	Latitud	37° 56' 49"	N	4 201 243
		Longitud	1° 21' 56"	E	643 621

Tabla A-25: Coordenadas reales de las muestras tomadas en el área de Murcia

N° de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
H-M70	Lamproítas.	Latitud	37° 59' 48"	N	4 207 464
		Longitud	0° 58' 07"	E	678 375

En la tabla A-26 se muestra la ubicación de las muestras SJ-20 y SJ-13 (cantera San José); cortesía del ingeniero Jorge Luis Costafreda Mustelier.

Tabla A-26: Coordenadas reales de las muestras tomadas en la cantera San José, área de El Pozo de los Frailes

N° de muestra	Litología	Coordenadas			
		Geográficas		U.T.M.	
SJ-20	Zeolita (mordenita)	Latitud	36° 46' 49"	N	4 070 870
		Longitud	02° 04' 13"	E	582 957
SJ-13	Toba zeolítica	Latitud	36° 46' 49"	N	4 070 870
		Longitud	02° 04' 46"	E	582 130

FUENTE: Cortesía de Costafreda Mustelier, Jorge Luis.

ANEXO NÚMERO 2

**TRABAJO DE EXPLORACIÓN Y MUESTREO DEL ÁREA VOLCÁNICA
NEÓGENA DEL SURESTE ESPAÑOL**

Realizado durante los días 24 al 31 de enero de 2005 por:

Ing. Jorge Luis Costafreda Mustelier.

Br. Esteban Estévez Fernández.

Punto N° 1

25 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4065555

E: 0571409

En la carretera N° 1064 que conecta a Cabo de Gata con San José, a 2 kilómetros aproximadamente al este de Cabo de Gata.

Gran afloramiento de andesitas piroxénicas en el corte de la carretera, en realidad son brechas piroclásticas andesíticas, con coloraciones pardas oscuras a pardo claras. En ocasiones tienen color verde pálido. En el afloramiento se observan dos fracturas principales con dirección: $200^{\circ} - 20^{\circ}$ y buzamiento: 85° hacia el este, rellenas de vetas de calcita que en los espacios libres forman pequeñas geodas de aproximadamente 0,5 a 1 cm de longitud (drusas también). A través de estas fracturas se produjo la descarga de fluidos hidrotermales que alteran fuertemente las andesitas, clarificándolas, cloritizándolas y tiñéndolas con óxido de hierro. Predomina fuerte silicificación y oxidación. Las andesitas forman grandes cavidades vacías como testimonio del escape violento de los gases durante el enfriamiento de la riada piroclástica. Las andesitas tienen textura porfídica, las plagioclasas están sericitizadas y los piroxenos han pasado a cloritas.

Muestra HM-1: andesitas piroxénicas.

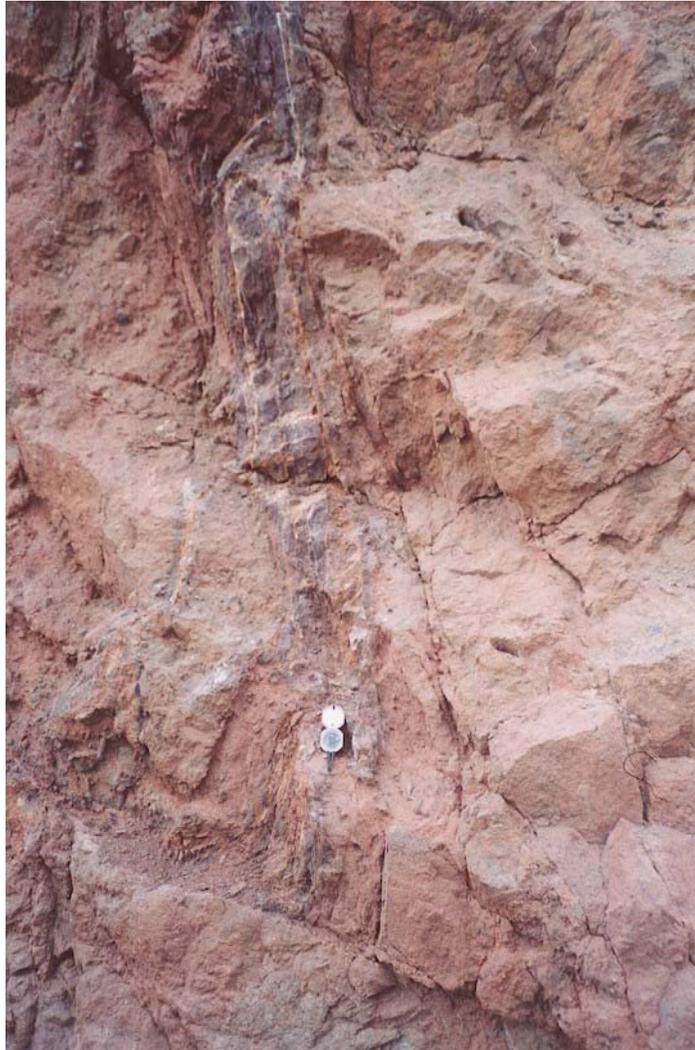


Figura B-1: Fractura observada en el afloramiento

Punto N° 2

25 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4065155

E: 0573813

En el corte de la carretera que une el faro de Cabo de Gata con San José.

Brecha de andesitas de color pardo claro a pardo oscuro, en ocasiones con fuertes tonalidades amarillentas y rojizas. En algunas partes llegan a ser verdosas. Generalmente aparecen muy friables y fragmentadas; otras veces están silicificadas. Se observa en algunos puntos los efectos de la meteorización esferoidal de las andesitas. Hay fuerte cloritización que aporta a la roca un marcado color verde claro intenso. Se observan ocasionalmente vetas rellenas con pátinas ocrosas de óxidos de hierro. Las andesitas alternan con zonas más restringidas de tobas andesíticas.

Muestras:

HM – 2: andesita piroxénica.

HM – 2 – A: toba vitrocrystaloclástica de composición andesítica.



Figura B-2: Detalle del afloramiento

Punto N° 5

25 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4066116

E: 0577102

En la pista que conduce a la playa Monsul, 1 kilómetro al este de la misma; en el cerro.

Aflora abundante material piroclástico de composición andesítica. Los fragmentos poseen diámetro entre 1 – 2 centímetros hasta 50 centímetros. Generalmente son angulosos a subangulosos tenazmente cementados por un material andesítico, alterado, arcilloso compuesto por granos más finos (0,5 – 1,0 cm). La roca es de textura porfídica, con cristales de plagioclasas, piroxenos y anfíboles (en menor cantidad). La matriz tiene coloraciones verdosas. La superficie de los piroclastos se encuentra llena de espacios y cavidades vacías desde donde han sido lixiviados los feldespatos en condiciones de meteorización.

Muestra HM – 5: brechas piroclásticas de andesita piroxénica.



Figura B-3: Afloramiento de andesitas

Punto N° 4

25 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4068608

E: 0575754

En el cauce seco del arrollo y en toda la ladera sur y oeste de la montaña, aflora andesita fuertemente metasomatizada por efecto hidrotermal. Posee coloraciones pardo oscuro – claro, amarillenta, gris claro verdoso, en ocasiones con tonalidades

abigarradas. En la superficie se observan innumerables cavidades vacías. La matriz está totalmente sustituida por sericita, clorita y óxidos de hierro; son comunes también las venas dendríticas de óxido de manganeso. En algunos casos hay resto de potasificación (alteración potásica) y de silicificación, esta última en venas subparalelas. Hay mancha de bitúmenes en las muescas de las grietas. Dentro de la matriz es posible distinguir pequeñas vetas de cuarzo.

En el entorno es posible observar varios pozos de minas antiguas.

Muestra HM – 4: andesita piroxénica con alteración intensa.



Figura B-4: Andesita alterada hidrotermalmente

Punto N° 8

25 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4068599

E: 0579490

En el corte de la carretera, en la parte norte del poblado de San José.

Aflora andesita piroxénica de color verdoso con fuertes tonalidades violáceas y rojizas. La roca está fuertemente tectonizada y llega a ser friable en algunos puntos. Posee vesículas vacías por lixiviación de los componentes. Es de textura porfídica y los fragmentos mejor conservados son muy duros, silicificados. En algunas partes el afloramiento es atravesado por vetas subhorizontales de cuarzo lechoso y calcita, con ancho entre 1 – 5 centímetros. Dentro de las vetas hay deposiciones amorfas silíceas de color pardo oscuro.

Muestra HM – 8: andesitas piroxénicas con alteración endógena.



Figura B-5: Vesícula encontrada en el afloramiento

Punto N° 12

25 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4070942

E: 0580700

En el corte de la pista aflora andesita porfídica de color gris claro con fuertes tonalidades verdosas y amarillentas. La matriz está constituida por cristales pequeños y alterados de plagioclasa, los fenocristales son de piroxenos; son raros los cristales de anfíboles. No hay cuarzo. Predomina un fuerte agrietamiento. En los espacios vacíos se desarrollan vetas rellenas de material silíceo colomorfo de color verde, también tectonizado, las vetas llegan a tener hasta 2 cm de espesor. En algunos intervalos la roca está fuertemente cloritizada por efecto de alteración hidrotermal.

Muestra HM – 12: andesitas piroxénicas.



Figura B-6: Detalle del afloramiento de andesitas piroxénicas

Punto N° 11

25 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4072780

E: 0579520

En el corte de la carretera que conduce a Rodalquilar, a 500 metros al este del cruce al Pozo de los Frailes.

Aflora andesita porfídica de color gris verdoso, cenicienta, muy tectonizada, en parte llega a ser milonitizada. Espacios de fricción en muchos intervalos; vetas subverticales rellenas de material arcilloso carbonatado de color amarillento a blanco sucio con ocasionales tintes de óxido de hierro de color pardo rojizo. Las vetas alcanzan ancho de hasta 5 centímetros. La textura es porfídica formada por fenocristales finos de plagioclasa y anfíboles.

Muestra HM – 11: brechas piroclásticas de andesita anfibólica.



Figura B-7: Brechas de andesita anfibólica

Punto N° 9

25 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4075436

E: 0577088

En el cerro que se encuentra al este de la pista, a 1 kilómetro al norte del “Cortijo del Cura” .

Aflora en lo alto del cerro andesita piroxénica de color pardo rojizo, muy lixiviada su superficie. Se encuentra marcada por grandes orificios producidos por escape violento de gas. El afloramiento es atravesado por grandes venas rellenas de material carbonatado de color beige, de textura nodular, residual; reacciona vigorosamente con el ácido clorhídrico (HCl).

Muestra HM – 9: andesitas piroxénicas con alteración endógena.

Punto N° 10

25 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4075398

E: 0577484

En la ladera norte del cerro, a 40 metros al sur de la pista.

Aflora material tobáceo de composición andesítica o dacítica; muy alterado de color pardo, gris y verdoso. La matriz es arenosa y no se observan cristales. En cambio son comunes xenolitos de andesita o dacita.

Muestra HM – 10: tobas de lapilli dacítico.

Punto N° 6

25 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4072683

E: 0577037

En la cima del cerro. Aflora andesita porfídica fuertemente alterada hidrotermalmente.

Predomina la alteración potásica y silícica, dando a la roca impresionantes coloraciones rojizas, pardas, violáceas, amarillentas y cenicientas. En la matriz se distingue con dificultad fenocristales de piroxenos, las plagioclasas se han convertido en material arcilloso de color blanco sucio. Las pátinas de óxidos de hierro bordean los piroclastos en los planos de unión. Son comunes los túneles y grandes cavidades producidas por el escape violento de los gases.

Se observan vetas de cuarzo que cortan el afloramiento de forma intermitente y su espesor es de 1,5 – 2 centímetros.

Muestra HM – 6: andesitas piroxénicas con alteración endógena.

Punto N° 13

25 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4075804

E: 0584614

En las estribaciones que se encuentran al norte de la Isleta del Moro, acceso desde la carretera que une Rodalquilar con San José.

Aflora andesita piroxénica de color pardo oscuro con tonalidades verdosas, de textura porfídica. Las plagioclasas han sido sustituidas casi completamente por material arcilloso y calcita; la matriz se torna muy fina sin dejar huellas de minerales petrográficos anteriores. Predomina una fuerte limonitización con abundantes pátinas de óxidos de hierro en todos los planos de grietas y fracturas.

Muestra HM – 13: andesitas piroxénicas.

Punto N° 22

27 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4077247

E: 0588173

Junto al mar afloran andesitas de color verde oscuro fuertemente erosionadas. Se intercalan con formaciones calcáreas y con conglomerados de matriz carbonatadas.

Muestra HM – 22: brechas piroclásticas de andesita piroxénica.

Punto N° 21

27 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4079209

E: 0585128

En el complejo minero antiguo. Dacitas biotíticas y anfibólicas con fuerte alteración hidrotermal.

Las rocas poseen intensas coloraciones gris claras, blancas, rojizas, pardo oscuro y pardo rojizo. Se encuentran fuertemente alteradas, agrietadas, cruzadas por vetas de

materiales ocosos. Hay resto de minerales metálicos alterados y sulfatados (pirita, calcopirita).

Muestra HM – 21: dacitas biotítico-anfibólicas rojo-violáceas con alteración intensa.

Punto N° 16

27 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4079115

E: 0580385

En el corte de camino. Roca fuertemente alterada por efecto hidrotermal. Predominan colores abigarrados: blanco, gris, pardo oscuro, pardo claro, rojo intenso, rojo pálido, amarillo, violáceo. Es muy difícil distinguir que minerales persisten en la matriz. En algunos puntos parece más tobácea. Hay tramos más restringidos con fuerte milonitización.

Muestra HM – 16: andesitas piroxénicas con alteración endógena.



Figura B-8: Detalle del afloramiento de andesitas piroxénicas

Punto N° 15

27 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4083780

E: 0578642

En el corte del camino aflora dacita de color verdoso, gris claro verdoso; de textura porfídica. Son visibles los granos de cuarzo, anfíbol y piroxeno sobre una matriz cloritizada más fina. Se observan granos muy pequeños de biotita. La roca se encuentra ligeramente carbonatizada.

Muestra HM – 15: conglomerados y brechas piroclásticas de andesita y dacita anfibólica.

Punto N° 19

27 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4085452

E: 0579749

En el afloramiento se observan brechas piroclásticas de andesitas de color verde pálido, con tonalidades grises y pardas, llegando a ser amarillentas. Predominan las pátinas de óxidos de hierro y de manganeso bordeando los piroclastos. La matriz posee también composición andesítica.

Muestra HM – 19: brechas piroclásticas de dacita y andesita anfibólica.

Punto N° 18

27 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4090967

E: 0573531

En la caldera volcánica, extremo norte. Aflora dacita alterada, casi tobácea y con aspecto escoriáceo. Más ligera de peso, textura porfídica, porosa; la matriz es de un color gris claro ceniciento en donde se observan granos de granate.

Se trata de un cuello volcánico que se colapsó quedando sus bordes en contacto con rocas carbonatadas organógenas.

Muestra HM – 18: dacitas biotíticas con cordierita y almandino.



Figura B-9: Cuello volcánico colapsado donde afloran dacitas

Punto N° 23

27 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4087165

E: 0585268

En el cerro. Afloran andesitas anfibólicas de color gris oscuro, porfídica, alterada.

Muestra HM – 23: dacitas y andesitas anfibólicas.

Punto N° 24

27 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4084442

E: 0586844

En el borde de la cantera y en el fondo de la misma hacia el sur. Afloran brechas piroclásticas de andesitas y dacitas anfibólicas. Están cementadas por matriz de igual composición con interdigitación de cemento carbonatado.

En el entorno, por el norte, contactan con formaciones carbonatadas organógenas, arrecifal.

Muestra HM – 24: brechas piroclásticas de andesita y dacita anfibólica.

Punto N° 27

27 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4089071

E: 0587872

Dentro de la cantera. Aflora brecha piroclástica de dacita o andesita, fuertemente metasomatizada, toman coloraciones gris claras, verde pálido, verde oscuro. Al parecer se tornan fuertemente tobáceas en muchos puntos.

Muestra HM – 27: brechas piroclásticas de andesita y dacita anfibólica.

Punto N° 31

28 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4090080

E: 0597237

En el corte de la carretera que une Carboneras con Agua Amarga.

Brechas de materiales piroclásticos de composición dacítica-andesítica de color gris claro con tonalidades verdosas y amarillentas. Poseen pátinas de óxido de hierro y costras de carbonatos. La matriz que cementa es de igual composición que los piroclastos. Predomina un fuerte tectonismo y friabilidad.

Muestra HM – 31: brechas piroclásticas de andesita piroxénica.

Punto N° 33

28 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4098994

E: 0599478

En el corte de la carretera que une Carboneras con Murcia.

Afloramiento de brechas de andesita piroxénica de color gris claro a verdoso. Está manchada con óxidos de hierro y atravesada por innumerables diaclasas con inclinación de 55° hacia el norte.

Muestra HM – 33: andesitas piroxénicas.

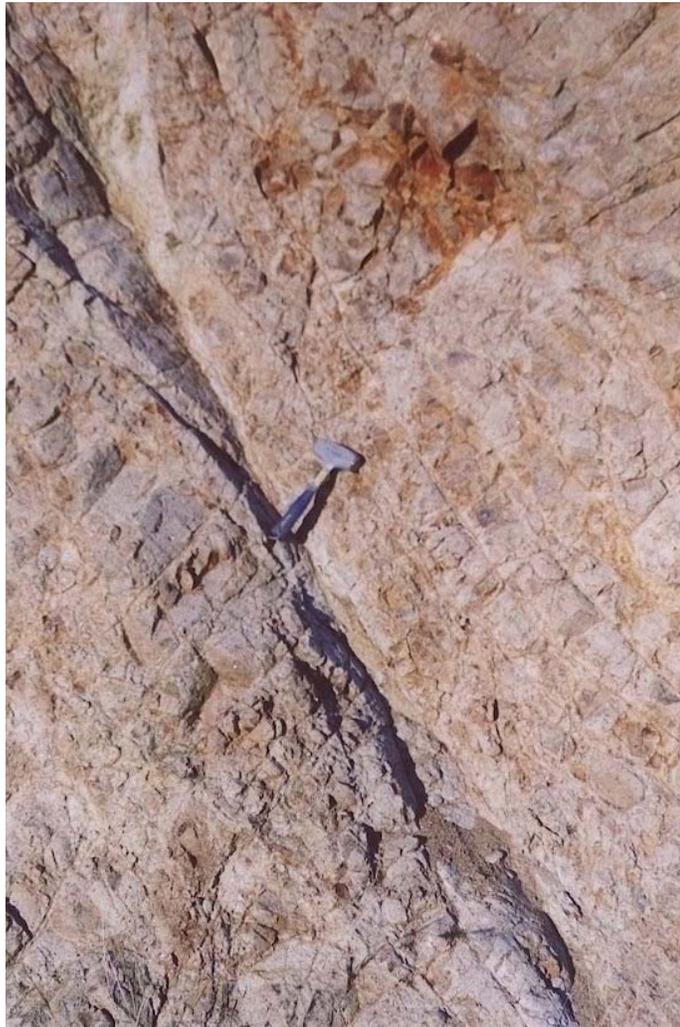


Figura B-10: Detalle de diaclasa que atraviesa el afloramiento

Punto N° 34

28 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4100049

E: 0600176

En el corte de la carretera que une Carboneras y Murcia.

Siguen aflorando las brechas piroclásticas de andesitas. Los fragmentos son de un color verde más oscuro hasta pardo, silicificados y muy duros y compactos. La matriz es de igual composición, pero más alterada y friable y con coloraciones más pálidas (verde amarillentas). Predominan las diaclasas, fallas y planos de movimiento en general.

Muestra HM – 34: brechas piroclásticas de andesitas piroxénicas.

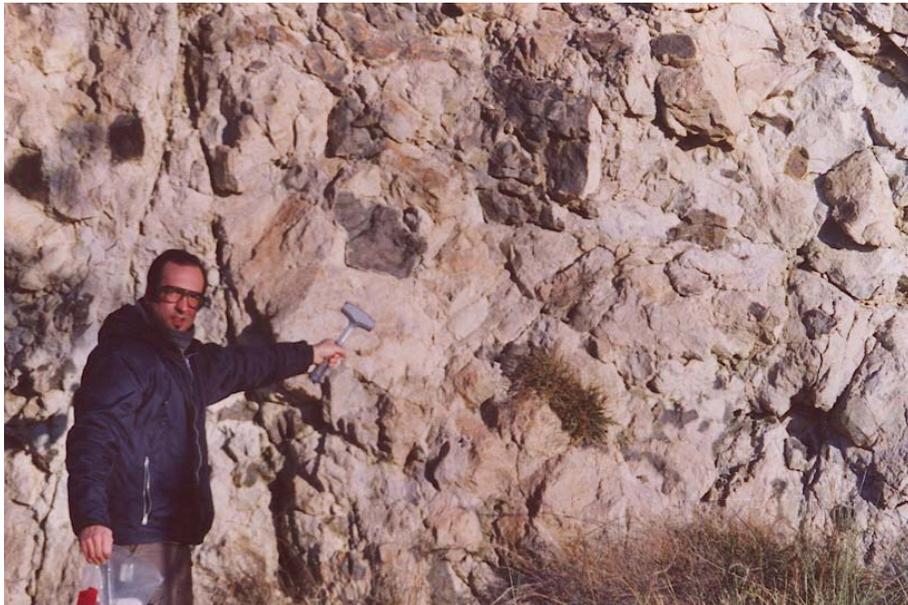


Figura B-11: Brechas piroclásticas de andesitas piroxénicas

Punto N° 37

28 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4119242

E: 0595022

En la ladera norte del cerro. Aflora una roca de color verde oscuro a verde pardo, de textura porfídica, fuertemente cloritizada y brechosa. Está manchada de óxidos de hierro de color pardo rojizo. En ocasiones los fragmentos sueltos tienen estructura vesicular. Parece un basalto metamorfizado. Todo el cerro está compuesto de este material. Infrayaciendo esta formación se observan formaciones carbonatadas masivas.

Muestra HM – 37: veritas.

Punto N° 36

28 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4118024

E: 0597227

En el corte de la trinchera. Aflora una roca similar a la descrita en el punto N° 37. Aparece aquí más fresca; se observa claramente su textura porfídica, vesicular. El color es verde oscuro y posee abundantes pátinas de óxidos de hierro tiñendo todo el material de coloraciones rojizas, pardas y amarillentas. Vetas de carbonatos residuales cortan gran parte del afloramiento, disponiéndose de forma horizontal a subhorizontal.

Predomina un fuerte agrietamiento. La formación, como en el punto N° 37, está contactando con formaciones carbonatadas y terrígeno-carbonatadas bien estratificadas.

Se acusa un grado de metamorfismo no intenso en estas rocas.

Muestra HM – 36: veritas.

Punto N° 38

28 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4118265

E: 0581306

En el corte de la carretera que une El Pilar y Lubrin.

Aflora una roca de color verde oscuro de textura granuda, metamorfizada. Son notables los blastogranos de cuarzo y feldespato de forma ocelar. Se observa mica en toda la pasta. El afloramiento se encuentra atravesado por zonas friables tectonizadas de más de 2 metros de espesor. En otras partes hay un fuerte bandeamiento sinuoso donde el material se torna más triturado y arenoso (milonita). En el contacto de este material con el entorno hay vetas de cuarzo en forma de almendras, con ancho de hasta 3,5 centímetros. Vetas rellenas de material arcilloso carbonatado cruzan el afloramiento con ángulos horizontales a subhorizontales.

En algunos tramos la roca se encuentra cubierta por un tinte pardo rojizo y amarillento de óxidos e hidróxidos de hierro, preferentemente en las caras planas y

superficies de fricción. En otros puntos son notables los feldespatos en supercrecimiento formando franjas discontinuas alargadas en el sentido del esfuerzo.

Muestra HM – 38: metabasitas y diabasas.

Punto N° 39

28 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4124193

E: 0584894

En el corte de la carretera. Aflora roca similar a la descrita en el punto N° 38. Aparece un grado de metamorfismo y esquistosidad algo mayor. Hay una pizarrosidad más acusada. Hay fuerte mineralización pirítica alterada a óxidos de hierro.

Muestra HM – 39: metabasitas y diabasas.



Figura B-12: Detalle del metamorfismo ocurrido en el afloramiento

Punto N° 44

29 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4129362

E: 0606647

En el corte de carretera que une Cuevas de Almanzora y Águilas.

Afloran brechas y milonitas de dacitas de color verde claro amarillento, intercaladas de roca de igual composición fuertemente silicificadas. Hay predominio de gran alteración hidrotermal , con mineralización metálica oxidada. Fallas verticales rellenas de material silicificado de composición dacítica. Hay alternancia con material dacítico friable.

Todo el afloramiento está atravesado por vetas de cuarzo con ancho de hasta 2 centímetros, con yacencia subhorizontal.

Muestra HM – 44: dacitas y riodacitas.

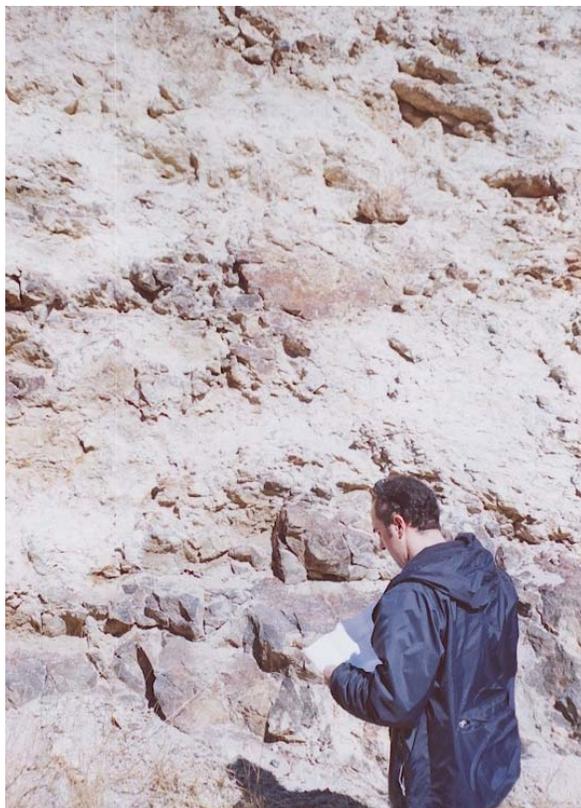


Figura B-13: Afloramiento de dacitas y riodacitas



Figura B-14: Brechas fuertemente silicificadas

Punto N° 41

29 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4119250

E: 0603623

En el corte de la carretera que une Garrucha con Vera.

Afloramiento de roca tectonizada, cataclastizada, milonitizada de color verde oscuro.
En los fragmentos mejor conservados hay una textura porfídica o porfidoblástica fina.

Hay lentejones de materiales tobáceos y dacíticos aprisionados dentro de este material.

Muestra HM – 41: rocas lamproíticas.

Punto N° 42

29 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4121870

E: 0603823

Aflora dacita de color gris claro con tonalidades verdosas pálidas. Textura porfídica, los cristales de plagioclasa son los fenocristales más grandes; además son notables los cristales de cuarzo. Los piroxenos y los anfíboles son mucho más pequeños. La pasta es muy fina, algo cloritizada. En los planos de fracturas se depositan excrecencias nodulares y globulares de magnesita. Son comunes las vetas de cuarzo. Estas rocas se disponen en el afloramiento como una apilada masa de brechas piroclásticas cementadas por un material de igual composición dacítica.

Por la forma geomorfológica parece ser un pequeño cuello volcánico colapsado.

Muestra HM – 42: dacitas y riodacitas.

Punto N° 48

29 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4150865

E: 0617166

En el corte de la carretera que conduce a Puerto Lumbreras.

Aflora riodacita porfídica de color gris claro con tonalidades verdosas pálidas. Fuertemente tectonizada y limolitizada por efecto hidrotermal.

Aflora en grandes cerros que circundan la región.

Muestra HM – 48: riodacitas.

Punto N° 51

29 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4161678

E: 0633760

En el corte de la carretera que une a Morata con Mazarrón.

Aflora una brecha poligénica de andesita y dacita de color gris claro a gris verdoso. Los piroclastos son angulosos a subangulosos. Hay también material tobáceo de color gris en tonalidades pardas, algo escoriáceo con abundante vidrio volcánico.

Muestra HM – 51: dacitas, riodacitas, tobas y vitrófidos.

Punto N° 52

29 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4167472

E: 0640303

En el corte de la carretera a 3,5 kilómetros al norte de La Majada.

Afloran materiales similares a los descritos en el punto N° 51. En este punto las tobas tienen un papel preponderante en cuanto a abundancia.

Muestra HM – 52: dacitas, riodacitas, tobas y vitrófidos.

Punto N° 53

29 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4163061

E: 0645593

En el corte de la carretera que une Leiva con Mazarrón.

Aflora el mismo material litológico descrito en los puntos N° 51 y N° 52.

Muestras:

HM – 53: dacitas, riodacitas, tobas y vitrófidos.

HM – 53 – A: tobas.

Punto N° 54

29 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4163182

E: 0648070

En el corte de la pista, en la parte norte de Mazarrón.

Aflora dacita fuertemente alterada; es de color gris claro, con tonalidades verde pálida; pero destaca mucho el color pardo rojizo. Posee alto contenido de minerales sulfurosos, los cuales se han oxidado por efecto de la meteorización. Hay franjas bandeadas dispuestas de forma subvertical, con coloraciones más pardas – oscuras – rojizas, con ancho entre 30 y 40 centímetros. Las vetas rellenas de sulfuros oxidados alcanza 1 centímetro de ancho. Predomina una fuerte carbonatación; en forma de vetas y nódulos individuales.

Muestra HM – 54: dacitas con alteración hidrotermal.



Figura B-15: Detalle de la alteración hidrotermal sufrida en la zona

Punto N° 58

29 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4166204

E: 0646384

En corte de la carretera que une a Mazarrón y Murcia.

Afloran andesitas y dacitas brechosas, muy alteradas; con coloraciones gris verdosas y tonalidades pardo rojizas. Hay fuerte brechamiento, los fragmentos son más tenaces que la matriz de igual composición, la cual se torna extremadamente friable. En la superficie de los bloques se observa fuerte lixiviación de los minerales petrográficos preexistentes.

Se observan planos de falla de hasta 70 centímetros, buzando subverticalmente (70°) hacia el noreste.

Muestra HM – 58: dacitas, riodacitas, tobas y vitrófidos.



Figura B-16: Afloramientos de dacitas y riodacitas

Punto N° 60

30 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4169231

E: 0669518

En la rambla del pueblo de San Isidro.

Aflora basalto de color gris oscuro con tonalidades pardo – oscuro. Es vesicular, amigdaloidal con rellenos de zeolitas de cristalitos concéntricos y radiales. Se encuentra el afloramiento cruzado en todas direcciones por vetas de calcita y de materiales carbonatados de origen terrígeno residual. La riada se solidificó en condiciones tranquilas, sin mucha influencia de ambiente marino.

Muestra HM – 60: basaltos.



Figura B-17: Afloramiento de basaltos

Punto N° 64

30 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 4166120

E: 0685426

En la cima del cerro. Aflora una roca fuertemente alterada de color verde oscuro, con fuertes tonalidades rojizas y pardas, también amarillentos. Los espacios de minerales preexistentes han sido sustituidos por minerales arcillosos oxidados. Hay restos de minerales metálicos también oxidados. Los piroxenos han sido sustituidos en más de un 80 %. Hay algunos granos de cuarzo flotando en la matriz oxidada.

Muestra HM – 64: andesitas y doreítas biotíticas piroxénicas con alteración hidrotermal.

Punto N° 61

30 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

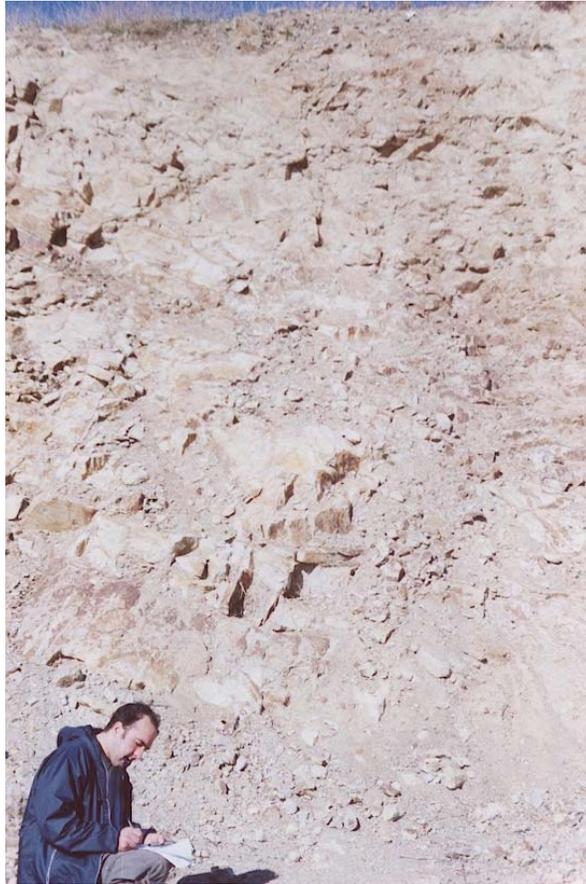
N: 4166635

E: 0680651

En la ladera sureste del cerro Cabezo Beaza.

Afloran andesitas y dacitas de color gris claro con tonalidades verdosas. La matriz fina engloba también cristales de biotita. Textura porfídica. Se encuentran recubiertos de finas partículas de limonita de color pardo rojizo. Están en contacto tectónico con materiales vulcanosedimentarios (calcaneritas).

Muestra HM – 61: andesitas y doreítas biotíticas piroxénicas.



**Figura B-18: Detalle del afloramiento de andesitas y doreítas biotíticas
piroxénicas**

Punto N° 70

30 de enero de 2005

Coordenadas U.T.M.:

N: 407464

E: 0678375

En la ladera oeste del cerro Cabezo Negro.

Aflora una roca brechosa de color pardo oscuro – claro, con tonalidades gris oscuras y verde aceituna. Está fuertemente silicificada, formando variedades de jasperoides y perímetros silicificados en torno a los fragmentos. Alternan partes más esponjosas, livianas y lixiviadas de textura porfídica y coloraciones pardo amarillentas, de aspecto tobáceo. Hay fuerte tectonismo con molienda general, que produce una acusada friabilidad en todo el aforamiento.

Muestra HM – 70: lamproítas.

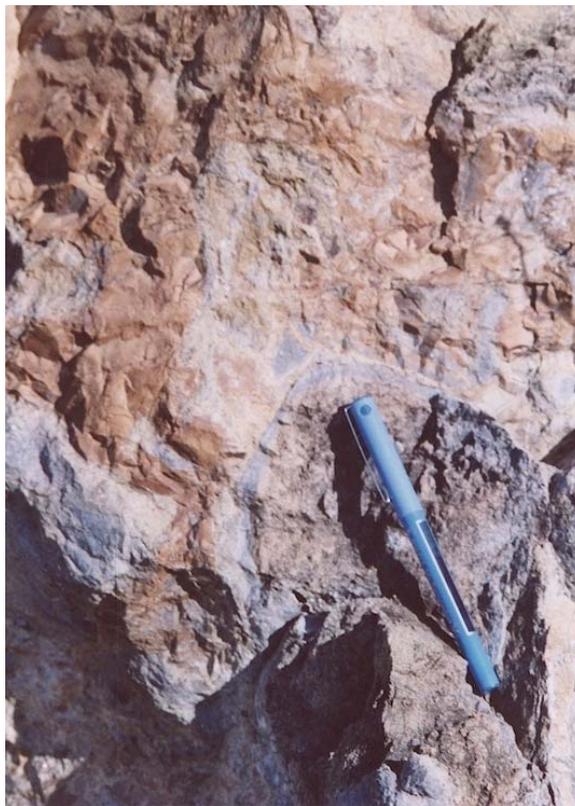


Figura B-19: Rocas lamprofídicas

Punto N° 67
2005

30 de enero de

Coordenadas U.T.M.:

N: 4201243

E: 0643621

En el afloramiento en el lado noreste del pueblo El Barquero.

Aflora una roca de color gris verdoso, brechosa en grandes bloques (30 centímetros a 1 metro de diámetro) unidos por material carbonatado y silicificado en gran parte. Tienen aspecto porfídico, también poroso y lixiviado, muchas veces con grandes vesículas abiertas.

Muestra HM – 67: veritas.



Figura B-20: Material carbonatado observado en el afloramiento de veritas

