

INTRODUCCIÓN AL  
**ESTUDIO**  
DE LAS  
**ROCAS Y MINERALES**  
**INDUSTRIALES**  
DE LA  
**ISLA DE BOKO,**  
REPÚBLICA DE  
GUINEA ECUATORIAL

Jorge Luis Costafreda Mustelier  
Domingo Alfonso Martín Sánchez  
Carlos Alberto Leyva Rodríguez  
Jorge Luis Costafreda Velázquez



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE MINAS



POLITÉCNICA

**AUTORES:**

Jorge Luis Costafreda Mustelier  
Domingo Alfonso Martín Sánchez  
Carlos Alberto Leyva Rodríguez  
Jorge Luis Costafreda Velázquez

**COORDINACIÓN Y EDICIÓN:**

Doctor Jorge Luis Costafreda Mustelier  
*Escuela Técnica Superior de Ingenieros  
de Minas y Energía*  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
DE MADRID (ESPAÑA)

Doctor Domingo Alfonso Martín Sánchez  
*Escuela Técnica Superior de Ingenieros  
de Minas y Energía*  
*Departamento de Ingeniería Geológica y Minera*  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
DE MADRID (ESPAÑA)

Ingeniero Jorge Luis Costafreda Velázquez  
*Departamento de Construcciones*  
UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN (CUBA)

MADRID 2019

ISBN: 978-84-09-09374-8

Registro: 2019018551

Fecha: 01/03/2019

Impreso en España.

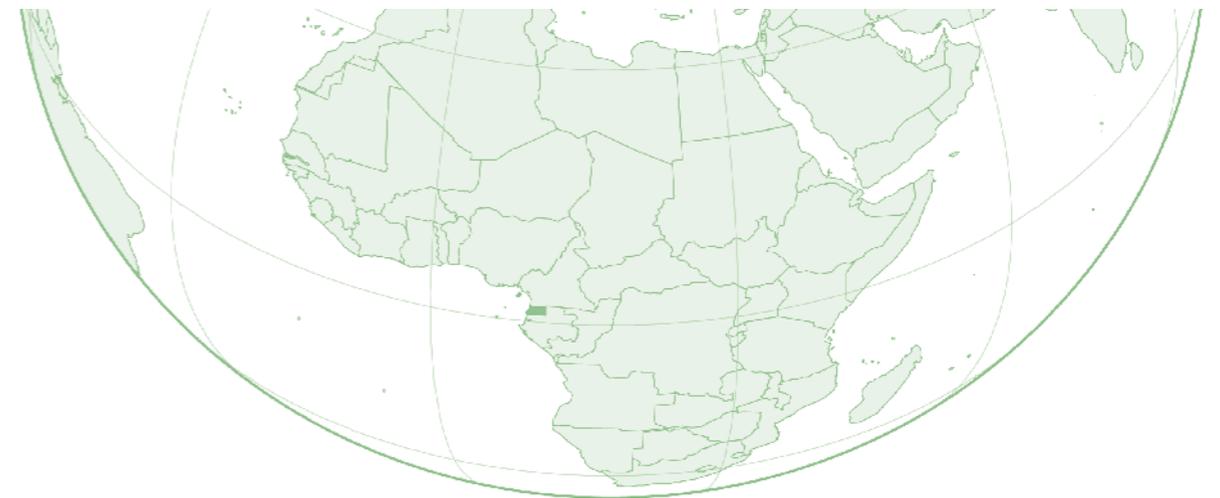
Todos los derechos reservados, Prohibida la reproducción parcial o total bajo ninguna de las formas, electrónicas o mecánicas, incluido el fotocopiado o grabación o por ningún sistema de almacenamiento y reproducción, salvo autorización escrita de los coordinadores y del Editor.



Calle Alenza, 1. 28003  
Madrid. España

INTRODUCCIÓN AL  
**ESTUDIO**  
DE LAS  
**ROCAS Y MINERALES**  
**INDUSTRIALES**  
DE LA  
**ISLA DE BOKO,**  
REPÚBLICA DE  
GUINEA ECUATORIAL

Jorge Luis Costafreda Mustelier  
Domingo Alfonso Martín Sánchez  
Carlos Alberto Leyva Rodríguez  
Jorge Luis Costafreda Velázquez



## ÍNDICE

PRÓLOGO.....	8
INTRODUCCIÓN.....	12
MARCO GEOLÓGICO INSULAR.....	22
LAS MANIFESTACIONES DE ROCAS Y MINERALES INDUSTRIALES DE LA ISLA DE BIKO .....	28
Arcillas sepiolíticas .....	29
Arenas silíceas.....	29
Rocas volcánicas.....	31
Arcillas saponíticas .....	32
INTRODUCCIÓN A LOS TRABAJOS DE RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO Y MUESTREO POR REGIONES DE ESTUDIOS.....	34
TRABAJOS DE RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO POR REGIONES .....	36
Yacimiento de la región de San Nicolás .....	37
Yacimiento de la región de El Cacahual .....	37
Yacimiento de la Región de Luba-Moka .....	41
Yacimiento de la Región de Aleña.....	41
Yacimiento de la Región de Riaba.....	43
TRABAJOS DE MUESTREO.....	44
TRABAJOS DE LABORATORIO .....	48
Difracción de rayos x .....	49
Agregados orientados .....	50
Variabilidad granulométrica de las partículas .....	54
Análisis químico de puzolanicidad .....	63
Materias orgánicas .....	67
Procedimientos para la selección de los componentes del mortero. Proyectos de dosificación de las mezclas .....	69
Tiempos de inicio y final de fraguado y estabilidad de volumen.....	72
Propiedades mecánicas del mortero .....	73

RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES.....	77
Yacimiento de arcillas sepiolíticas de San Nicolás .....	79
Yacimiento de arenas silíceas El Cacahual .....	107
Yacimientos de rocas volcánicas de Luba-Moka.....	133
Yacimiento de arcillas saponíticas de Aleña .....	155
CONSIDERACIONES FINALES.....	164
AGRADECIMIENTOS .....	174
BIBLIOGRAFÍA .....	176

# PRÓLOGO

Hace casi una década, mientras descendía por las escalerillas de la aeronave de Iberia que cubre regularmente el tramo *Madrid – Malabo*, lo primero que vieron mis ojos fue la imponente silueta del *Monte Basilé*, el gigantesco estratovolcán extinto bautizado con el mismo nombre que se yergue hasta poco más de tres mil metros de altura. Hasta ese preciso instante mis sentidos estuvieron fijos en varias tareas totalmente ajenas a los temas que aluden esta obra. Llevaba la agenda rebotante de citas con numerosas personalidades del *Ministerio de Minas, Industria y Energía*, de la Embajada de *España*, de la *Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial (UNGE)* y de los colegios *ecuatoguineanos*; además de otras tareas adicionales no menos importantes. Mi misión consistía en captar alumnos académicamente aventajados que cursaban el último año de bachillerato y traerles a *España* para formarles como *Ingenieros Técnicos de Minas*, en la especialidad de *Recursos Energéticos, Combustibles y Explosivos*.

Esto formaba parte de un convenio tripartito entre el *Ministerio de Minas, Industria y Energía* de la *República de Guinea Ecuatorial*, *Repsol* y la *Universidad Politécnica de Madrid*, siendo la *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía* la entidad formadora; es decir, se trataba de un proyecto educativo eminentemente docente que tuvo vigencia entre los años 2004 y 2012, con la titulación final de cincuenta ingenieros *ecuatoguineanos*.

Hoy, casi una década y media después, todos ellos se hallan colocados en importantes empresas petroleras y de servicios relacionados con el sector de los hidrocarburos, entre las que se citan la *Exxon Mobile, Total, Hess, Schlumberger, Gepectrol, EG-LNG* y *Marathon*. Sin embargo, muy pocos sintieron interés por los recursos naturales sólidos *no metálicos*, y hasta donde conozco, ninguno se desempeña en la actualidad en la prospección de yacimientos *metálicos*.



En esa primera visita tuve la ocasión de reunirme con la misión docente cubana que impartía cursos regulares de ingeniería en la *Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial*, en las especialidades de *Minería, Geología y Geoquímica*, siendo en uno de los encuentros posteriores cuando se nos solicitó ayuda para colaborar en la caracterización, normalización y puesta en valor de algunos recursos naturales *no metálicos* de la *Isla de Bioko* para la elaboración de *cementos, morteros, hormigones* y áridos, en un genuino intento por revalorizar los recursos naturales de ese país en su ya sensible crecimiento económico y social.

La propuesta partió del destacado doctor cubano Carlos Alberto Leyva Rodríguez, coautor de esta obra y profesor titular de la *Universidad de Moa (Cuba)*, donde tuve el honor de formarme hace más de treinta años. El Doctor Leyva, junto a los profesores Domingo Alfonso Martín Sánchez, de la *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía*, y Jorge Luis Costafreda Velázquez, de la *Universidad de Holguín (Cuba)*, sigue trabajando de forma incansable en la caracterización de yacimientos de recursos *no metálicos* de la región oriental de la *República de Cuba*, y seguimos unidos en la actualidad por fuertes vínculos de amistad y colaboración científica.

El objeto de este pequeño libro de carácter introductorio es aportar los conocimientos que se obtuvieron durante el *reconocimiento geológico, muestreo, caracterización, interpretación y aplicaciones* de las materias primas procedentes de los yacimientos de *arcillas, arenas silíceas y piedra natural* de la *Isla de Bioko*, y fijar esta experiencia como un punto de partida confiable para sucesivas investigaciones en este campo.

El libro se ha dividido en nueve capítulos que recrean, con notable sencillez, algunas generalidades sobre ese interesante enclave insular, el marco geológico que lo caracteriza, las explicaciones de los trabajos de campo con la descripción litológica de yacimientos, afloramientos y las operaciones de muestreos. Una parte importante del texto está enfocada a los trabajos de laboratorio, donde se ofrece una amplia explicación sobre las técnicas analíticas aplicadas y a la discusión e interpretación de los correspondientes resultados. Por último, se dedica un capítulo a la exposición de una serie de recomendaciones para los posibles usos de estas materias primas naturales.

Es un libro con un fuerte matiz descriptivo y al mismo tiempo práctico, que lleva implícita la intención de ser entendido por todos los lectores.

Soy consciente que esta obra no abarca ni mucho menos toda la riqueza natural de *Guinea Ecuatorial*; hemos advertido ya que es una introducción a los recursos naturales de una pequeña porción geográfica de ese país, favorablemente accesibles y perfectamente aprovechables. La concepción de una obra de mayor envergadura ha de formar parte, indefectiblemente, de un proyecto más extenso que quizás vea la luz en un futuro no muy lejano.

El enorme interés en ofrecer un material de utilidad práctica y de iniciación al entendimiento de los recursos naturales *no metálicos*, es el principal factor que nos ha motivado a presentar esta *Introducción al estudio de las rocas y minerales industriales de la Isla de Bioko, República de Guinea Ecuatorial*.

Madrid, España. 21 de febrero de 2019

**Doctor Jorge Luis Costafreda Mustelier**  
*Escuela Técnica Superior de Ingenieros  
de Minas y Energía  
Universidad Politécnica de Madrid*

# INTRODUCCIÓN

La apertura de *Guinea Ecuatorial* al comercio internacional está dando sus frutos desde hace poco más de una década. El acelerado ritmo que caracteriza su relación con los países desarrollados, sobre todo en materia de comercio, exige la creación de nuevas y eficaces infraestructuras internas; en este sentido, y de forma incipiente, se consiguen los primeros avances para cubrir las demandas de recursos humanos mediante la formación y capacitación de ingenieros, técnicos y operarios nativos.

Se tienen noticias sobre la implantación de nuevos laboratorios, de la fabricación y modernización de complejos portuarios y aeroportuarios, y del desarrollo de las industrias locales. Del mismo modo, hay testimonios sobre la creación de novedosos proyectos de electrificación y diversificación energética que

*Guinea Ecuatorial* protagoniza en colaboración con otros países.

Sin embargo, uno de los sectores más importantes que carece de la solidez y atención requeridas es la industria de la construcción. *Guinea Ecuatorial* está experimentando un notable desarrollo en todos los aspectos socio-económicos, y la industria de la construcción no debe situarse al margen de ese auge. Actualmente se están edificando nuevas zonas residenciales, se ha ampliado el puerto de *Malabo*, se ha completado el adoquinado del paseo marítimo de *Bata*, está en pleno apogeo la construcción de las urbanizaciones ministeriales y residenciales de *Malabo II* y *Malabo III*, de complejos hoteleros en la periferia de la ciudad, y de varios puentes en el viaducto que une *Malabo* con *Riaba*, por citar tan sólo algunos ejemplos significativos (figuras 1 al 9).



← FIGURA 1. Vista parcial del Paseo Marítimo de Bata, visto desde el hotel Panáfrica (Fuente: Costafreda, J.L., 2009).



← FIGURA 2. Aeropuerto Santa Isabel de Malabo. Al fondo se destaca el Monte Basilé (Fuente: Costafreda, J.L., 2009).



← FIGURA 3. Instantánea aérea del aeropuerto Santa Isabel de Malabo. En la actualidad está siendo sometido a un intenso trabajo de ampliación y modernización (Fuente: Costafreda, J.L., 2009).



← FIGURA 4. Bahía y puerto de Malabo vistos desde el aire (Fuente: Costafreda, J.L., 2009).



← FIGURA 5. Ampliación del puerto de Malabo. Se aprecia la terminación de un nuevo espigón capaz de soportar el repleto de barcos de calado apreciable. En primer plano, operaciones de dragado del fondo de la bahía para facilitar el arribo de embarcaciones de gran calado (Fuente: Costafreda, J.L., 2009).



← FIGURA 6. Construcción de un puente en el viaducto que une Malabo y Riaba (Fuente: Costafreda, J.L., 2009).



← FIGURA 7. Autovía que conecta el aeropuerto internacional con las nuevas urbanizaciones de Malabo II, Malabo III y el casco histórico de la ciudad (Fuente: Costafreda, J.L., 2009).

**Guinea Ecuatorial está experimentando un notable desarrollo en todos los aspectos socio-económicos, y la industria de la construcción no debe situarse al margen de ese auge.**



FIGURA 8. El Bahía 2, moderno hotel emplazado muy cerca del centro neurálgico de la ciudad de Malabo (Fuente: Costafreda, J.L., 2009).



FIGURA 9. Planta móvil para el tratamiento de áridos procedentes de las cortas que se ubican en las periferias de la ciudad de Malabo (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).



FIGURA 10. Planta estacionaria para el procesamiento y clasificación de áridos en un lugar muy próximo a la ciudad de Moka (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

Sin embargo, buena parte de los materiales empleados en la edificación de estas obras es importada. En la *Isla de Bioko* existen numerosas explotaciones de áridos (figuras 9 y 10) que se destinan a varios fines, no obstante es muy difícil acceder a los protocolos que establecen los parámetros de la calidad y al control de los ensayos químicos, físicos y mecánicos. Tampoco se conocen sus propiedades geotécnicas y puzolánicas, bien por el carácter hermético de las empresas, bien porque no existe realmente una certificación cualitativa del proceso tecnológico (figura 11).

Las fábricas de *cemento* más conocidas en *Guinea Ecuatorial*, al menos hasta el

año 2010, son la *Afrom Guinea*, *Okomar* y *Abayak*; esta última, según la crónica, importaba *cemento* a granel que luego reenvasaba en bolsas estándares, cubriendo un pico de producción de unas 900 toneladas por día. Sin embargo, el stock acumulado en sus almacenes apenas superaba las 15.000 toneladas, circunstancia que, además de encarecer el precio de venta, derivaba en una producción insuficiente para cubrir el ya notable ritmo de la construcción en todo el país.

El sentido común demuestra que *Guinea Ecuatorial* es rica no sólo en petróleo y gas natural, sino también en recursos *no metálicos* que sirven como fuentes de materias



FIGURA 11. Bloques fabricados con materiales procedentes de canteras ubicadas en los alrededores del Monte Basilé, en la *Isla de Bioko*. Nótese la poca cohesión y la marcada friabilidad de las piezas que indican el deficiente estudio físico y mecánico de la materia prima utilizada (Fuente: Cuesta, A., 2012).

primas para la construcción, generalmente inexplorados o con un grado de estudio muy bajo. El auge de las nuevas construcciones ha abierto una brecha para la explotación intensiva de los recursos *no metálicos*, al tiempo que el número de concesiones mineras otorgadas a las empresas constructoras crece notablemente (tabla 1).

Pero el avance de la *República de Guinea Ecuatorial* no ha estado enfocado solamente al aspecto económico, sino también al plano docente.

El ejemplo más evidente que puede argumentar lo expresado es sin dudas el *Proyecto Guinea Ecuatorial (2004)*, concebido a partir de la firma, en febrero de 2004, de un convenio entre la *Universidad Politécnica de Madrid*, a través de la *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía*, *Repsol* y el *Ministerio de Minas, Industria y Energía de la República de Guinea Ecuatorial* (figura 12 a y b). Este proyecto recibió siempre el apoyo y la asesoría desinteresada de la Embajada de *España en Guinea Ecuatorial* (figura 12 c).

**TABLA 1:** Relación de algunas concesiones mineras adjudicadas a empresas extractoras y constructoras en el ámbito de la Isla de Bioko (Fuente: M.M.I.E. de Guinea Ecuatorial, 2010).

NOMBRE DE LA EMPRESA	Nº DE LA CANTERA	NOMBRE DE LA CANTERA
ALBARAKA S.	1	PATIO PÉREZ
ARAB CONTRACTORS	2	BANEY DIA BANEY NOCHE
	3	SIPOPO I
	4	SIPOPO II DÍA SIPOPO II NOCHE
	5	FINCA CARLOTA
BOUYGUESBATIMENT	6	SAMPAKA
	7	KM. 34
	8	KM. 34
CAMIGESA	9	BANEY
CMEC	10	SIPOPO
HORIZON	11	PUERTO K5
K5	12	PATIO PEREZ
SEGUIBAT	13	BANEY
	14	PATIO P. I
	15	PATIO P. II
	16	LUBA
	17	SIPOPO
	18	MOKA
	19	REBOLA KM. 13
	20	FINCA ALEGRE
	21	RIABA INASA
	22	RIABA VIKATANA
SOMAGEC	23	TIMBABE
	24	KM. 34

El convenio favoreció especialmente a los alumnos *ecuatoguineanos* de los últimos cursos de bachillerato que ostentaban un buen expediente académico, incluso a los que habían iniciado sus estudios superiores en la *Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial (UNGE)*, mediante becas dotadas económicamente para asegurar su estancia en *España*, durante un período no superior a tres años (figura 12 d y e).

El proceso de selección de los estudiantes se efectuaba directamente en la base, es decir en los propios colegios, tanto de la parte insular como de la continental, siendo los centros más visitados el *Español*

de Malabo, el *Waizo IPola*, el *Santa Teresita*, el *Claret*, el *Español de Bata* y el de los *Salesianos* (figuras 13, 14 y 15).

Con la titulación de 50 estudiantes *ecuatoguineanos*, el convenio docente finalizó en el año 2012 y a partir de entonces se crearon las bases para la firma de nuevos tratados en materia de colaboración en el ámbito docente, formación de postgrado en economía del petróleo y del gas natural, la exploración minera de recursos sólidos *metálicos* y *no metálicos*, la explotación de recursos hídricos, la planificación energética sostenible, entre otros proyectos adicionales.



**FIGURA 12 a.** Se muestra una instantánea de una reunión anual del Proyecto Guinea Ecuatorial en la sede de la Escuela de Minas y Energía de Madrid, en plena intervención del Sr. Atanasio Elá Ntugu Nsá, entonces Ministro de Minas, Industria y Energía de Guinea Ecuatorial. (Fuente: Costafreda, J.L., 2008)



**FIGURA 12 b.** Escena que recrea los momentos en que el ministro sucesor, el Sr. Marcelino Obono Edu y el entonces Director de la Escuela de Minas y Energía de Madrid, D. Benjamín Calvo Pérez, confirman la continuación del proyecto para el curso escolar 2010-2011. (Fuente: Costafreda, J.L., 2009).

El avance de la República de Guinea Ecuatorial ha estado enfocado también al plano docente. El ejemplo más evidente es el *Proyecto Guinea Ecuatorial (2004)*.



FIGURA 12 c. De izquierda a derecha, aparecen D. Jorge Luis Costafreda Mustelier, Coordinador del Proyecto Guinea Ecuatorial, D. Manuel Gómez-Acebo Rodríguez-Spiteri, Embajador de España en Guinea Ecuatorial durante el período 2009-2013, y D. Benjamín Calvo Pérez, en la antigua sede de la Embajada en Malabo. (Fuente: Costafreda, J.L., 2009).



FIGURA 13. Durante una entrevista a los alumnos de último año de bachillerato del Colegio Waizo Ipola, en Malabo, aspirantes a las becas de formación en España (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).



FIGURA 12 d. Parte del plantel de profesores de la Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial (UNGE) junto al coordinador del proyecto. (Fuente: Costafreda, J.L., 2009).



FIGURA 14. En la presentación del Proyecto Guinea Ecuatorial a los alumnos del Colegio La Salle de Lea, en Bata, en el marco de la convocatoria de las becas (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).



FIGURA 12 e. Instante en que se imparte una clase en el Colegio Español de Malabo a cargo del Padre José Gangoso, de origen español y entonces Director del Centro, y un egresado del Proyecto Guinea Ecuatorial, el Ingeniero Técnico de Minas D. Dionisio Miguel Ntutumu Nsang, que comenta sus impresiones del proyecto a los nuevos aspirantes (Fuente: Costafreda, J.L., 2009).



FIGURA 15. Presentación del Proyecto Guinea Ecuatorial a los estudiantes del Colegio Padre Celestino Nhang, en Bata (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

## MARCO GEOLÓGICO INSULAR

Además de poseer una superficie territorial relativamente grande, la mayor parte de la jurisdicción de *Guinea Ecuatorial* se localiza en dos regiones fundamentales: una continental, conocida tradicionalmente como *Río Muni*, y otra insular, que abarca un conjunto de islas, islotes y cayos, entre los que descuellan la *Isla de Bioko*, sede de la capital diplomática del país, *Annobón*, *Corisco*, *Elobey Grande* y *Elobey Chico*.

En la constitución natural del territorio insular se aprecian diferencias importantes con los terrenos que conforman la región continental, lo que evidencia la diversidad de procesos que tuvieron lugar a lo largo de su historia geológica. Los principales rasgos de esta disparidad se manifiestan en la petrología y en los sistemas hidrográficos, geomorfológicos y tectónicos. Esta obra se centra muy brevemente en la geología de la *Isla de Bioko*, desechando los detalles que caracterizan los demás territorios, dado que los trabajos de investigación se enfocaron específicamente en esta región.

La *Isla de Bioko* es de génesis volcánica y volcanosedimentaria, y es un elemento más en la constitución de la denominada “*Línea Volcánica de Camerún*” (figura 16), en la cual dibuja una especie de cadena de edificios volcánicos y pequeñas calderas en forma de *rosario*, con dirección aproximada hacia el norte-noreste y el sur-suroeste (Burke, K., 2001; Deruelle, B., *et al.*, 1991; Lee, D. C., *et al.*, 1994; Molerio León, L.F., 2014;

Molerio León, L.F., 2011; Njonfang, E., A., *et al.*, 2007; Wilson, M. & Guiraud, R., 1992; [www.AFR-02](#); [www.icex.es/icex/es](#)). La composición de los litotipos es fundamentalmente basáltica, aunque es frecuente localizar pequeñas formaciones constituidas por diferenciados de quimismo más félsico (figura 17).

Actualmente, los materiales volcánicos de composición basáltica están meteorizados y erosionados, y forman potentes capas eluviales, depósitos de pie de talud y coluviones sobre los cuales se desarrolla un suelo de varios metros de espesor (figura 18), con una manifiesta fertilidad característica de esas latitudes. Estos suelos son aprovechados en la agricultura intensiva, hortalizas, viveros y en el cultivo de árboles de gran talla destinados a la industria maderera (figura 19).

Según las características de los materiales y de la estructura geomorfológica de los edificios volcánicos, imperó una gran actividad eruptiva en el pasado geológico; así, por ejemplo, en la zona de *Luba-Moka* predominaron episodios explosivos que aportaron grandes volúmenes de piroclastos en forma de bombas volcánicas, escorias, ignimbritas, cenizas y otros materiales (figura 20 a, b y c).

En la zona de *Aleña*, en un punto que se encuentra situado al norte de la ciudad de *Luba*, las emisiones se tornaron tranquilas,



➤ **FIGURA 16.** Vista aérea desde el este en la que se aprecia la cúspide del *Monte Camerún* y sus pequeños conos adventicios. Con sus 3.967 metros de altura, este volcán permanece casi siempre oculto bajo el nublado cielo ecuatorial. La fotografía fue tomada desde una aeronave de la compañía *Iberia*, cuyo recorrido cubría el trayecto *Madrid-Malabo-Madrid* (Fuente: *Costafreda, J.L., 2009*).



➤ **FIGURA 17.** El volcanismo que originó la *Isla de Bioko* se caracterizó por las ingentes emisiones de lavas basálticas en forma de riadas y de materiales piroclásticos de naturaleza más o menos explosiva que se depositaron en las suaves laderas del estratovolcán. La ciclicidad de las erupciones indica una alternancia entre los productos de composición basáltica y andesito-dacítica con pronunciados rasgos felsíticos, como se observa en la figura. La yacencia de los cuerpos más diferenciados es suave, y está acorde con la estructura regional (Fuente: *Costafreda, J.L., 2012*).



➤ **FIGURA 18.** El volcanismo de la *Isla de Bioko*, generalmente de composición basáltica, depositó grandes masas de materiales volcánicos que al meteorizarse favorecieron la formación de potentes secuencias de suelos fértiles sobre los que se desarrolla una abundante y variada flora. En la figura se muestra parte de un afloramiento expuesto en el corte de la carretera que une el trayecto entre *Malabo* y *Riaba* (Fuente: *Costafreda, J.L., 2009*).

en forma de riadas que desde el cráter se movieron por las laderas del volcán hasta alcanzar la línea de la costa. Estos flujos, aún calientes, entraron en contacto con el agua del mar creando un notable proceso de hidrovulcanismo, donde el oleaje no sólo favoreció su rápido enfriamiento, compactación y posterior descomposición mediante un proceso de halmirólisis, sino que produjo una marcada alteración morfológica en los finos estratos en que se dispusieron los volcanosedimentos (figura 21 a y b).

En la cuenca del río *San Nicolás* yacen materiales aún más finos, posiblemente originados durante los ciclos explosivos que favorecieron sus traslados en suspensión hasta distancias relativamente grandes, posteriormente se depositaron en los piamontes que se extienden hasta puntos cercanos a la costa, donde se formaron apreciables concentraciones de arcillas

*sepiolíticas* (figura 22 a y b). Según *Lee et al.*, (1998), las erupciones más antiguas se produjeron durante el *Paleógeno*, mientras que las más recientes datan de períodos más tardíos que llegan a manifestarse, incluso, en el *Cuaternario*.

Los procesos erosivos y denudativos, fundamentalmente los de dinámica gravitacional, han actuado de forma particularmente intensa en las cimas y laderas de los edificios volcánicos, dando lugar a un escenario geomorfológico compuesto por calderas, valles profundos, sinuosas gargantas, promontorios, escarpes, acantilados, cárcavas y farallones (figura 23). Las estructuras volcánicas que destacan en el relieve de la *Isla de Bioko* son el *Monte Basilé*, que con sus 3.011 metros de altura (figura 24) constituye el punto más prominente de la isla en relación al nivel del mar, el cráter de *Moka* y la caldera de *Luba* (figura 32).



➤ **FIGURA 19.** En los tupidos bosques y selvas de *Guinea Ecuatorial* descuellos una especie arbórea muy singular, la *Ceiba*, que representa uno de los principales símbolos del blasón de esa República (Fuente: *Costafreda, J.L., 2008*).



a



b



c

FIGURA 20 (a, b y c). Vista de algunas variedades de materiales piroclásticos acumulados en el collado de Biaó-Belebú, procedentes de la erupción del ahora extinto volcán de Moka. En la figura superior (a) se aprecia una *bomba volcánica* típica, con estructura globular y aerodinámica a causa del poder moldeador del aire sobre la lava aún caliente. De forma similar, en la figura central (b) aparece un girón de lava sobreenfriado y solidificado por la velocidad y el cambio brusco de temperatura, quedando una roca de estructura amorfa. En la figura inferior (c) se distingue una gran acumulación caótica de *pedra pómez*, *ignimbritas*, *escorias*, entre otros materiales (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).



a



b



c

FIGURA 21 (a, b y c). Las tranquilas emisiones de productos volcánicos basálticos en forma de *riadas* entraron en contacto con las frías aguas del *Océano Atlántico*, experimentando un rápido enfriamiento y la manifestación del proceso de alteración conocido como *halmirólisis*, lo cual favoreció la formación de productos arcillosos, como la *saponita*. En las imágenes superior y central (a y b) se muestran dos afloramientos en los que destacan unos volcanosedimentos finamente estratificados, con una visible turbación en su yacencia subhorizontal. En la figura inferior (c) se ofrece una vista de la ciudad de Luba, importante enclave portuario ubicado en la parte suroccidental de la Isla de Bioko (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

# LAS MANIFESTACIONES DE ROCAS Y MINERALES INDUSTRIALES DE LA ISLA DE BOKO

## ARCILLAS SEPIOLÍTICAS

Las recientes investigaciones realizadas en los potentes yacimientos de *arcillas* que se encuentran en la cuenca del río *San Nicolás*, en los alrededores de la ciudad de *Malabo*, revelan la presencia de una fase mayoritaria compuesta por *sepiolita* acompañada por especies secundarias de *feldespato*, *caolinita*, *hematita*, *moscovita* e *illita* (Costafreda, J.L. et al., 2012a).

Los análisis de *microscopía electrónica de barrido (MEB)*, *difracción de rayos x (DRX)* y *agregados orientados con etilenglicol (AO)* indican un comportamiento similar y homogéneo en la composición de las muestras estudiadas (Costafreda, J.L. et al., 2012a).

Por otro lado, los análisis *químicos*, *puzolánicos*, *granulométricos*, de *consistencia*, de inicio y final de *fraguado* y de *estabilidad de volumen* confirman la idoneidad de estas *arcillas* para sustituir hasta un 25 % del *cemento portland* en los proyectos de mezclas de *morteros* (Costafreda, J.L. et al., 2012a).

No se tiene noticia sobre la realización de proyectos de investigación en estas formaciones sedimentarias, por lo que se considera el primer trabajo de carácter científico que se inicia para la caracterización, sistematización y posibles aplicaciones de estos recursos en la industria de la construcción *ecuatoguineana*.

## ARENAS SILÍCEAS

Dentro de la amplia diversidad de rocas y minerales industriales que yacen en la *República de Guinea Ecuatorial* se encuentran los yacimientos e indicios de *arenas silíceas* de *Bioko Norte* (Costafreda, J.L. et al., 2012b). Las escasas crónicas mencionan actividades de explotación esporádica y temporera en una pequeña corta actualmente paralizada que se ubica en la aldea de *El Cacahual*, aproximadamente al suroeste de la ciudad de *Malabo* (figuras 25 y 26), desde la cual se extrae material destinado a la fabricación de *morteros* para las construcciones locales. Sin embargo, a excepción de las menciones formuladas por los profesores Antonio Rodríguez Vega y Carlos Alberto Leyva Rodríguez, ambos de la *Universidad de Moa*, no se registran otros estudios previos sobre su composición y su calidad tecnológica.

Los recientes trabajos de investigación llevados a cabo por investigadores de la *Universidad de Moa*, de la *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía de Madrid*, de la *Fundación Gómez Pardo*, y de la *Universidad de Holguín*, con la colaboración de profesores y alumnos de la *Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial*, y cuyos resultados se ofrecen en esta obra, incluyeron campañas de muestreo, caracterización y aplicaciones de estos recursos. Las primeras conclusiones establecen que en la composición sustancial de este yacimiento aparece el *cuarzo* como principal



FIGURA 25. Plano de ubicación del yacimiento de arenas silíceas El Cacahual (Fuente: Costafreda, J.L., 2012) (Tomado y mejorado de Google Earth, 2012).



FIGURA 26. Aspecto de uno de los taludes de la corta del yacimiento de arenas silíceas El Cacahual (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

fase mineral, acompañado de *feldespato*, *caolinita*, *mica moscovita* e *illita* (Costafreda, J.L. et al., 2012b).

El estudio morfológico de las muestras por medio de la *microscopía electrónica de barrido* describe granos con dimensiones muy cercanas entre ellos y con formas angulosas, subangulosas y ocasionalmente subredondeadas, que indican un transporte escaso o casi nulo; esta evidencia infiere la naturaleza residual de este yacimiento formado posiblemente por la alteración y posterior redeposición eluvial de sedimentos procedentes de un supuesto

protolito de composición cercana a la de los granitoides. Por otra parte, la presencia de fases representadas por *dolomita* y *hematita* puede ser el testimonio de la acción de procesos hidrotermales que afectaron a estas formaciones (Costafreda, J.L. et al., 2012b).

Otras tareas que complementan esta investigación, como el estudio *granulométrico*, el *contenido en materias orgánicas* y los ensayos de *resistencias mecánicas*, que fueron realizados en el *Laboratorio Oficial para Ensayos de Materiales de Construcción (LOEMCO)*, en Madrid, corroboran la calidad tecnológica de estas *arenas*.



FIGURA 27. Detalles de una explotación de áridos en una cantera próxima a la ciudad de Moka, en el collado de Biaó-Belebú. Obsérvese el mal desarrollo de las labores mineras y los colapsos originados por el deficiente cálculo de la estabilidad de los taludes (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

## ROCAS VOLCÁNICAS

Las rocas efusivas formadas por la actividad volcánica constituyen, con toda certeza, la principal fuente de áridos y *piedra natural* de la *Isla de Bioko* (Costafreda, J.L., et al., 2012c).

El auge alcanzado por la construcción en la ciudad de *Malabo*, *Malabo II* y *Malabo III* es un testimonio concluyente del volumen de áridos que se requiere para la edificación de los nuevos polígonos, urbanizaciones, infraestructuras portuarias, carreteras, presas, alcantarillados y paseos marítimos, ya descritos en capítulos precedentes (figuras 1, 7, 8, 9 y 10).

Gran parte de los materiales de construcción, fundamentalmente el *cemento*, procede de las importaciones, como se ha dicho previamente, mientras que las rocas y minerales industriales autóctonos se conocen poco, opacados por el papel hegemónico del *petróleo* y el *gas natural*.

El desconocimiento de las propiedades químicas, petrográficas y mecánicas de estas rocas y la existencia de un sistema normativo mejorable ha disparado su uso indiscriminado, siempre con la impronta de una controvertida calidad de los productos finales (figura 11). Asimismo, la falta

de experiencia en ingeniería y geotecnia para el desarrollo de minas y canteras, y la intermitencia de la ley de minas, ha favorecido la germinación descontrolada de un gran número de excavaciones propensas a continuos derrumbes y a la producción de impactos medioambientales irreversibles (figura 27).

La presente obra se ha marcado entre sus objetivos fundamentales mostrar los resultados obtenidos con el análisis y caracterización de estas formaciones volcánicas, así como su posible aprovechamiento industrial mediante el aporte de datos sobre sus propiedades puzolánicas e idoneidad en la elaboración de *morteros*.

Los datos indican que estos litotipos, fundamentalmente las *escorias* y los productos derivados de la consolidación de los flujos de *lava*, mayoritariamente de composición basáltica, son capaces de sustituir al *cemento pórtland* hasta en un 25 %, y favorecen el incremento de las resistencias mecánicas normales con valores que sobrepasan

los 37 *Mpa* en un período de 28 días (Costafreda, J.L. *et al.*, 2012c).

El estudio de las muestras mediante el método del *análisis químico de puzolanidad* a 7 días establece el carácter puzolánico de estas rocas, corroborado por la interpretación de los citados ensayos mecánicos.

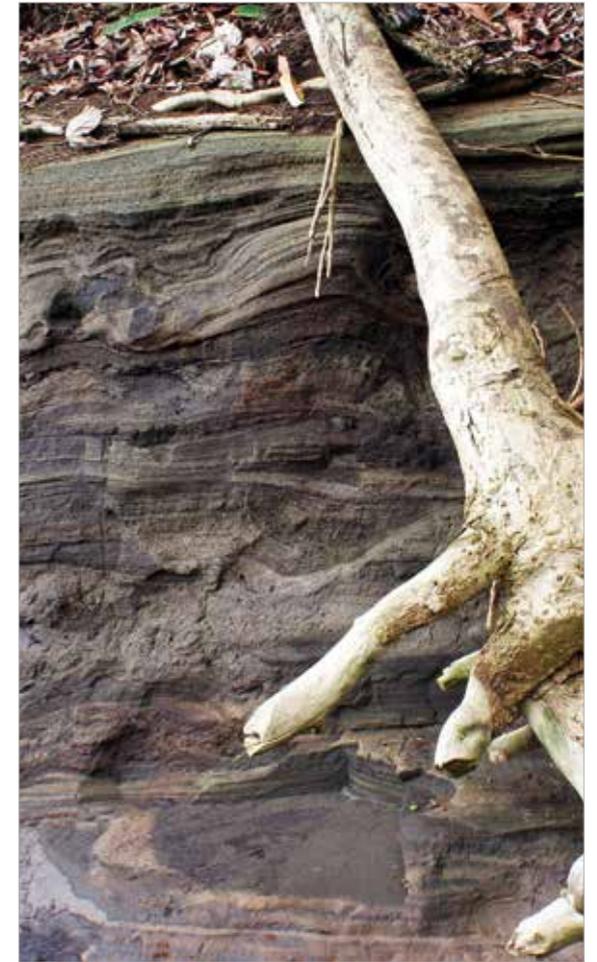
El análisis de la composición química detecta contenidos apreciables en  $\text{SiO}_2$  (44,40%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15,58%),  $\text{CaO}$  (9,32%),  $\text{MgO}$  (4,25%) y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (13,63%), y cantidades despreciables de *azufre*, *sulfatos* y *materia orgánica* (Costafreda, J.L. *et al.*, 2012c).

Los resultados de los análisis de *difracción de rayos x* revelan la presencia mayoritaria de una fase compuesta por *feldespato* y otra subordinada constituida por *cuarzo*, *hematita* y *dolomita* (Costafreda, J.L. *et al.*, 2012c).

El estudio mediante *microscopía electrónica de barrido* permite comprobar la poca abundancia de las especies vítreas (Costafreda, J.L. *et al.*, 2012c).

## ARCILLAS SAPONÍTICAS

La disposición natural de los materiales volcanosedimentarios en la localidad de *Aleña*, así como su estilo de yacencia monoclinial hacia el oeste, en dirección al *Océano Atlántico*, indican que el proceso de deposición se adaptó bien a las laderas del volcán *Basilé* y de sus pequeños conos adventicios (Ndong, M., 2013). Los estudios realizados sobre algunas muestras recolectadas en esta localidad revelan una concentración anómala de *arcilla* de la variedad *saponita* que pudo formarse por la alteración hidrotermal de rocas volcánicas de composición basáltica, mediante lo cual pudieron depositarse apreciables cantidades de *silicato cálcico* que dieron lugar a esta especie arcillosa.



**Las rocas efusivas formadas por la actividad volcánica constituyen, con toda certeza, la principal fuente de áridos y piedra natural de la Isla de Bioko.**

**La saponita, como ocurre con el resto de las arcillas, posee propiedades muy apreciadas entre las que se citan su elevada área superficial, su capacidad sorcitiva, manifestada a través de los procesos de absorción, adsorción y desorción, plasticidad y su carácter tixotrópico.**

# INTRODUCCIÓN A LOS TRABAJOS DE RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO Y MUESTREO POR REGIONES DE ESTUDIOS

En las campañas de *reconocimiento geológico* y *muestreo* llevadas a cabo en los diferentes yacimientos de interés de la *Isla de Bioko* tomaron parte especialistas y profesores de la *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía (Universidad Politécnica de Madrid)*, de la *Fundación Gómez Pardo (FGP)* y de las Universidades de *Moa* y *Holguín*, respectivamente, durante el mes de marzo de 2012, con la inestimable ayuda de profesores y alumnos de la *Universidad Nacional de la República de Guinea Ecuatorial (UNGE)*.

En las descripciones de los afloramientos se emplearon dos variantes, la *autotransportada*

y la *pedestre*. Con la variante *autotransportada* se cubrieron zonas distales y se realizó la descripción de los cortes y taludes que existen a ambos lados de las carreteras que unen los trayectos *Malabo-Luba-Moka* y *Moka-Riaba-Rebola-Malabo*. Con la variante *pedestre* se estudiaron áreas específicas y proximales entre las que se mencionan *San Nicolás, Cacahual, Aleña, Luba, Collado de Biaó-Belebú, Moka* y *Riaba*.

En los recorridos se empleó un instrumento de *Global Position Situation (GPS)*, de la marca *Garmin*, y una brújula teodolito de la casa *Brunton*.

Los edificios volcánicos se erigieron a pocos metros por encima del nivel del mar, sobre un andamiaje de materiales inconsistentes e inestables que más tarde colapsaron, originando pequeñas calderas.

# TRABAJOS DE RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO POR REGIONES

## YACIMIENTO DE LA REGIÓN DE SAN NICOLÁS

Se reconocieron y describieron 32 puntos de afloramientos. Los lugares con mejor aflorabilidad son los potentes depósitos de arcillas que yacen en las márgenes del río *San Nicolás*, localmente conocido como “Río *Matadero*”. Adicionalmente, fueron descritos los afloramientos de los pequeños arroyos que discurren al este y al oeste del curso principal, hasta su desembocadura en el *Océano Atlántico* (ver figura 28).

## YACIMIENTO DE LA REGIÓN DE EL CACAQUAL

Este yacimiento toma su nombre de la pequeña aldea de pescadores conocida como *El Cacahual*, situada al suroeste de la ciudad de *Malabo* e inmediatamente al este del aeropuerto internacional *Santa Isabel de Malabo*. El yacimiento abarca un área de aproximadamente 3.000 metros cuadrados, en una zona de densa floresta donde el acceso sólo es posible a través de una estrecha pista sin pavimentar. La vía de entrada a la cantera es por el sur y conduce a un antiguo frente de explotación de banco único vertical con una altura que alcanza los 3,5 metros (figuras 29 y 30).



FIGURA 28. Vista del sector de estudio del río *San Nicolás*, en *Malabo*, con representación de los itinerarios y las estaciones descritas durante los trabajos de reconocimiento geológico (Fuente: Costafreda, J.L., 2012) (Tomado y mejorado de *Google Earth*, 2012).



FIGURA 29. Vista parcial de la corta del yacimiento *El Cacahual*, donde se distinguen los restos de antiguos laboreos mineros artesanales (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).



FIGURA 30. Vista de un talud ubicado en el flanco norte de la pequeña corta del yacimiento de *arenas silíceas El Cacahual*. En primer plano el profesor Carlos Leyva, de la Universidad de Moa (Cuba), ofreciendo *in situ* detalladas explicaciones sobre el afloramiento (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

Los trabajos de *reconocimiento geológico* en el yacimiento *El Cacahual* establecen tres tipos aparentemente distintos de *arenas silíceas*, que para los efectos descriptivos son denominadas: *Cacahual-2*, *Cacahual-3* y *Cacahual-4*.

Los itinerarios, con los que se controló un total de 30 estaciones o puntos de descripción de afloramientos, se realizaron siguiendo una dirección NNO, de forma transversal al rumbo del yacimiento, estimado como NNE (figura 31).



FIGURA 31. Área que delimita el yacimiento *El Cacahual* con resalte de los itinerarios geológicos, estaciones y puntos de muestreos (Fuente: Costafreda, J.L., 2012) (Tomado y mejorado de Google Earth, 2012).

Según las características de los materiales y de la estructura geomorfológica de los edificios volcánicos, imperó una gran actividad eruptiva en el pasado geológico.

Actualmente los materiales volcánicos de composición basáltica están meteorizados y erosionados, y forman potentes capas eluviales, depósitos de talud y coluviones.



➤ **FIGURA 32.** Ubicación del yacimiento de rocas volcánicas del tramo Luba-Moka con representación de los itinerarios geológicos, estaciones y puntos de muestreo (Fuente: Costafreda, J.L., 2012) (Tomado y mejorado de Google Earth, 2018).



➤ **FIGURA 33.** Representación esquemática del área del yacimiento Aleña, en la región meridional de Guinea Ecuatorial insular conocida como Bioko Sur, señalándose los itinerarios geológicos y los puntos de toma de muestras (Fuente: Costafreda, J.L., 2012) (Tomado y mejorado de Google Earth, 2018).



➤ **FIGURA 34.** Vista de un potente afloramiento descrito en la localidad de Aleña, constituido por productos volcánicos que exhiben huellas de turbación. Estos depósitos se encuentran actualmente alterados por el proceso de bentonitización (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

## YACIMIENTO DE LA REGIÓN DE LUBA-MOKA

Los campañas geológicas abarcaron las zonas que contienen los principales afloramientos de rocas volcánicas ubicados en las inmediaciones de las ciudades de Luba y Moka, específicamente en lo que se denomina en esta obra *Collado de Biaó-Belebú* (Nota de los Autores), donde se ubica la *localidad tipo* (figura 32). En esta región se describió un total de 9 estaciones para un número igual de afloramientos.

## YACIMIENTO DE LA REGIÓN DE ALEÑA

Las marcharrutas cubrieron parcialmente un área cuya topografía indica la presencia de una pequeña caldera y conos volcánicos adventicios de tamaños reducidos (figura 33). Los litotipos descritos en esta localidad consisten en potentes acumulaciones de materiales piroclásticos finos y lavas de composición basáltica, que indican la actividad rítmica del volcanismo en *Guinea Ecuatorial*. Los productos volcánicos se encuentran muy alterados por la acción de procesos previos de *bentonitización*, *esmectización* y *saponitización* (figura 34).



Playa Arena Blanca



FIGURA 35. Vista parcial de las secuencias volcánicas sedimentarias que yacen en las cercanías del poblado de Riaba, compuestas por series de cenizas, lapilli y cineritas de composición basáltica (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

En la constitución natural del territorio insular se aprecian diferencias importantes con los terrenos que conforman la región continental, lo que evidencia la diversidad de procesos que tuvieron lugar a lo largo de su historia geológica

## YACIMIENTO DE LA REGIÓN DE RIABA

Los trabajos de campo establecen la localidad *tipo* en las cercanías del poblado de Riaba. La descripción global se efectuó en un solo punto de afloramiento ubicado en el corte de la carretera que conecta las ciudades de Moka y Riaba.

Los materiales descritos consisten en potentes capas de *escorias volcánicas* intercaladas entre series de *cenizas, lapilli, cineritas* y volcanosedimentos polimícticos de composición basáltica. El buzamiento de las secuencias volcánicas sedimentarias en esta localidad oscila entre los  $12^\circ$  y los  $45^\circ$ , con dirección noreste, lo que indica una yacencia monoclinial de la ladera nororiental del Monte Basilé (figura 35).



## TRABAJOS DE MUESTREO

Los trabajos de muestreo se llevaron a cabo en zonas previamente elegidas durante las campañas de *reconocimiento geológico*, mediante los cuales se describieron grandes y variados afloramientos de *arcillas sepiolíticas* en la cuenca del río *San Nicolás*, de *arenas silíceas* en la aldea de *El Cacahual*, de *rocas volcánicas* de composición basáltica en los alrededores de las ciudades de *Luba* y *Moka*, de *arcillas saponíticas* en la localidad de *Aleña* y de *escorias* en las inmediaciones de la ciudad de *Riaba* (figuras 36, 37, 38, 39 y 40).

En las operaciones de toma de muestra se aplicaron los métodos de *ranurado continuo* (*channel-sampling*) y de *fragmentos litogeoquímicos* de afloramientos. Antes de la asimilación del material se limpió previamente su superficie, eliminando todo vestigio de *materia orgánica* y rastros de *oxidación*;

a continuación las muestras fueron envasadas cuidadosamente en bolsas plásticas impermeables destinadas a este fin y rotuladas adecuadamente. El peso de cada muestra osciló entre los 10 y los 15 kg. Con los trabajos de muestreo se garantizó la cantidad necesaria y representativa de muestras para la realización de los ensayos de laboratorio y el establecimiento de la calidad de los materiales estudiados.

Para los trabajos que se describen en esta obra se asimiló un total de diez muestras: 3 de los afloramientos del río *San Nicolás*, otras 3 procedentes del yacimiento *El Cacahual*, 2 tomadas en la localidad de *Luba-Moka*, 1 de la zona de *Aleña* y 1 extraída en *Riaba*. Las muestras fueron identificadas con nombres relativos a la *localidad tipo* y acompañadas por las coordenadas del punto, propiamente dicho (tabla 2).



FIGURA 36. Operaciones de muestreo en un afloramiento de arcillas sepiolíticas en la ribera occidental del río San Nicolás, en Malabo (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).



**FIGURA 37.** Extracción de muestras de arenas silíceas desde un frente de explotación abandonado del yacimiento El Cacahual (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).



**FIGURA 38.** Asimilación de fragmentos litogeoquímicos de rocas volcánicas en un gran afloramiento expuesto en el collado de Biaó-Belebú, en la carretera que une las ciudades de Luba y Moka (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).



**FIGURA 39.** Afloramiento de materiales volcanosedimentarios de composición basáltica alterados a bentonita en la localidad de Aleña. En estos productos volcánicos se determinó un apreciable porcentaje de arcilla saponítica (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

**TABLA 2:** Relación de muestras con indicación de la litología, nomenclatura, localidad y ubicación geográfica (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

LITOLÓGÍA	MUESTRA	LOCALIDAD	UBICACIÓN (COORDENADAS)	
Arcillas sepiolíticas	Arcilla-1	Malabo (Río San Nicolás)	N 3° 45' 07.66"	E 8° 47' 18.97"
	Arcilla-2		N 3° 45' 22.31"	E 8° 47' 23.38"
	Arcilla-3		N 3° 45' 14.99"	E 8° 47' 15.68"
Arenas silíceas	Cacahual-2	El Cacahual	N 3° 45' 31.6"	E 8° 41' 27.3"
	Cacahual-3		N 3° 45' 32.1"	E 8° 41' 28.9"
	Cacahual-4		N 3° 45' 31.2"	E 8° 41' 27.2"
Rocas volcánicas	Moka-1	Moka Luba	N 3° 23' 32.7"	E 8° 39' 33.6"
	Moka-1a		N 3° 23' 35.9"	E 8° 39' 31.9"
Arcillas saponíticas	Aleña-1	Aleña	N 3° 23' 17.3"	E 8° 35' 7.9"
Escoria volcánica	Riaba	Riaba	N 3° 23' 35.88"	E 8° 45' 12.19"



En este capítulo se describe de forma detallada la serie de ensayos y análisis realizados en el *Laboratorio Oficial para Ensayos de Materiales de Construcción (LOEMCO)* y en el *Laboratorio Centralizado de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía de Madrid*, sobre el conjunto de muestras indicado en la tabla 2.

La interpretación de los resultados fue realizada en su totalidad por los especialistas de la *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía*, de la *Fundación Gómez Pardo*, del *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa* y de la *Universidad de Holguín*.

## DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Mediante este método se analizaron las muestras procedentes de *Cacahual-2*, *Cacahual-3*, *Cacahual-4*, *Moka-1*, *Moka-1a* y *Aleña-1*.

Este análisis exige la selección de una cantidad equivalente a 500 mg de muestra finamente molida hasta una *granulometría* inferior a 200 *mallas* (74  $\mu$ ), cuidadosamente homogeneizada para que la proporción analizada sea representativa. Se prepara una de las superficies aportándole la mayor uniformidad posible; para lograr esto se toma como soporte una placa de aluminio con una ventana circular donde se coloca la muestra y se presiona después con otra placa de igual composición, consiguiéndose así una superficie plana.

En el análisis de las muestras muchos laboratorios emplean en la actualidad el difractómetro *Phillips-1710*, con longitud de onda ( $\lambda$ ) 1,54060 - 1,54438 y rango de barrido de  $2\theta$  (4.000 - 60.000).

**En el método de difracción de rayos x la intensidad de los picos del difractograma es proporcional a la cantidad de especie o fase mineral contenida en la muestra.**

## AGREGADOS ORIENTADOS

La presencia de minerales arcillosos en las muestras *Arcilla-1*, *Arcilla-2*, *Arcilla-3* y *Aleña-1* (tabla 2) ha sugerido el empleo de la técnica de los *agregados orientados*, dado que muchas *arcillas* se distinguen con dificultad durante la realización de un solo barrido.

Las muestras *Cacahual-2*, *Cacahual-3*, *Cacahual-4*, *Moka-1* y *Moka-1a*, fueron desestimadas en este análisis porque no contienen material arcilloso.

Para la aplicación del método se toman 500 mg de muestra con un tamaño inferior a 12  $\mu$ ; así, una vez que se elimina la fracción mineral cristalina se produce un visible incremento de la fase arcillosa y otros componentes libres. Se vierten 4 o 5 gotas de *hexametafosfato sódico* en un tubo de ensayo y se deja decantar; una parte del producto que queda en suspensión se coloca en un *portamuestras* durante 24 horas, a temperatura ambiente. Transcurrido este tiempo, en el cual el agua se evapora y queda una fina película sobre el *portamuestras*, la muestra es sometida a análisis.

Uno de los objetivos principales perseguidos con el empleo de este método es aumentar la intensidad de los picos, una vez eliminadas las fases minerales, y disponer de una cantidad representativa de la fase arcillosa con *granulometría* inferior a 5  $\mu$ .

Este preparado se somete a un tratamiento con *etilenglicol* calentándolo en una estufa con un rango de temperatura entre 70 y 80 °C, durante 24 horas, tiempo durante el cual los vapores actúan sobre la muestra, de modo que si contiene *arcillas* con capacidad de expansión (*esmectitas*) el espaciado pasará desde ciertos valores iniciales, cercanos a los 14 Å, a valores finales de hasta 17 Å.

### Microscopía electrónica de barrido

La *microscopía electrónica de barrido* es un método de *análisis químico* no destructivo que permite conocer la composición química de partículas diminutas en la superficie de muestras sólidas, con una resolución espacial de alrededor de 1  $\mu$ .

La técnica consiste en analizar la radiación emitida por una muestra sólida, cuando sobre ella incide un *haz* de electrones debidamente focalizado.

La *microscopía* se basa en la utilización del espectro característico generado por la interacción de la radiación electrónica con la materia con fines analíticos, tanto cualitativos (la energía de la radiación es característica de cada elemento) como cuantitativos (la altura del pico del espectro es proporcional a la cantidad del elemento dado presente en la muestra).

El control y focalización del *haz* se realiza mediante dos lentes electromagnéticas: una *condensadora* y otra *objetivo*, que modifican la intensidad del *haz* al variar su corriente, además de varios diafragmas. La columna electrónica, así como los *espectrómetros*, están sometidos a alto vacío ( $P < 10^{-4}$  Torr) para minimizar la absorción de los *rayos x* por el aire, especialmente en los elementos ligeros, cuya emisión es menos energética.

Se analizó una gran parte de las muestras procedentes de las áreas investigadas, específicamente las denominadas *arcilla-1*, *arcilla-2*, *arcilla-3*, *cacahual-2*, *cacahual-3*, *cacahual-4*, *moka-1*, *moka-1a* y *Aleña-1*. En la preparación y análisis de las muestras mediante este método se siguen empleando en la *Escuela de Minas y Energía de Madrid*, con bastante frecuencia, los siguientes equipos: el microscopio electrónico *Hitachi S-570* “*Scanning Electron Microscope con analizador Kevex 1728*”, el “*BIORAD Polaron Division Carbon Evaporation Power Supply*” y el “*Polaron SEM Coating System*” (figuras 41 a y b).

Previo al análisis de las muestras, se deben cumplimentar varias fases para garantizar la obtención de un espécimen adecuado y óptimo para su investigación, y que satisfaga las normativas vigentes para este tipo de ensayo. Los pasos seguidos son descritos en los párrafos siguientes.



FIGURA 41 a. Microscopio electrónico *Hitachi S-570* y sus partes componentes; a) depósito de nitrógeno líquido, b) cámara de los filamentos, c) cañón electrónico, d) cámara de alto vacío, e) mandos para introducir y retirar la muestra de la cámara de alto vacío y para variar los ángulos de la posición de la muestra, y f) módulo acoplado: monitor para visualizar la imagen durante el barrido y botones de control de operaciones. (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).



FIGURA 41 b. Equipos de grafitación de las pastillas “*BIORAD Polaron Division Carbon Evaporation Power Supply*” y el “*Polaron SEM Coating System*”; a) electrodos, b) compresor y c) cámara de alto vacío (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

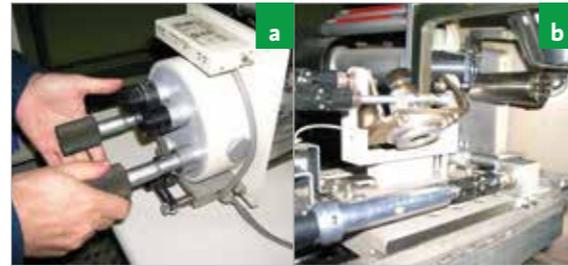
Las muestras se reducen hasta un diámetro entre 0,2 y 0,5 cm; pulverizadas previamente, son esparcidas sobre una cinta adhesiva grafitada que se fija en la superficie del *portamuestras*. Cuando son fragmentos sólidos, con facetas regulares que permiten su acoplamiento horizontal sobre el *portamuestras*, suelen fijarse a éste con *plastilina*.

Previo a su análisis, las muestras son cubiertas en condiciones de *vacío* con una capa de *grafito*, utilizando el equipo de la figura 41 (b) y preparado, a priori, según se observa en la figura 42.



↑ FIGURA 42. Operador colocando la barra de grafito en uno de los bornes fijados en la tapa de la cámara de alto vacío (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

El paso siguiente consiste en retirar la muestra grafitada de la cámara de *alto vacío* y fijarla en el *portamuestras* del microscopio electrónico, lo cual se logra extrayendo el tren *portamuestras* una vez que la cámara está en modo *no-vacío* (figuras 43 a y b).



↑ FIGURA 43 (a, y b). Extracción del tren *portamuestras* del microscopio electrónico; a) en plena extracción, b) visualización del *portamuestras* (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

La muestra y su soporte se fijan en un ángulo de 30° con respecto al tubo detector semiconductor, para que el *haz* emitido por el cañón de electrones incida directamente sobre ella; esta posición también permite que los desprendimientos energéticos provenientes de la muestra sean absorbidos eficazmente por el tubo detector.

El tubo detector semiconductor está compuesto de *silicio* dopado con *litio*, y debe refrigerarse continuamente hasta temperaturas cercanas a -60°C con el fin de evitar la dispersión del *litio* en el *silicio*; para garantizar este proceso, los microscopios electrónicos de este tipo están dotados de un depósito de *nitrógeno líquido* (figura 40).

El microscopio electrónico de barrido está compuesto de un cañón electrónico en lo alto del cual, coronándolo, se encuentra el recinto que contiene los filamentos donde se genera el chorro o *haz* de electrones.

Más abajo hay acopladas tres lentes-bobina (lentes no ópticas) de forma cilíndrica, en torno a las cuales se enrolla alambre de *cobre*, formando una bobina que genera un campo electromagnético; su función es hacer más compacto y paralelo el *haz* de electrones hasta que incida en la superficie de la muestra. Esta bobina es de *hierro dulce*, y puede focalizar el *haz* hasta una anchura de 1 μ.

Una vez que el indicador de *alto vacío* da la señal se monitoriza la intensidad de la radiación de electrones, que en el caso de materiales ligeros es de 20 kV, mientras que para los elementos pesados es de 25 kV. El resto de los pasos se controla desde el panel acoplado al microscopio (figura 44).

Hay un ordenador conectado al conjunto del equipo por medio del cual, y con la ayuda de dos *softwares*, se toman las lecturas de los elementos que componen la muestra, los espectros de emisión y las fotografías de los sectores de la muestra previamente elegidos.



↑ FIGURA 44. Panel de control para las operaciones con el microscopio electrónico de barrido (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

El primero de estos *softwares*, el “*Winshell*”, permite obtener y fijar en el eje de las abscisas los datos de emisión de rayos x característicos de cada elemento (en *kilo-electrón-voltios*), mientras que en *ordenadas* se representan las cuentas de rayos x en forma de gráficos, donde aparecen los picos principales y secundarios de los espectros, así como la identificación del elemento que los produce.

El segundo *software*, conocido como “*Printerface*”, permite fotografiar e imprimir imágenes de áreas determinadas de la muestra..

El panel acoplado al microscopio (figura 44) controla el *zoom* de las lentes; el aumento alcanzado es de 200 x10<sup>3</sup>, y la nitidez de la imagen dependerá, en todos los casos, de la limpieza de la cámara de *alto vacío*. Desde este panel se controla también el voltaje, el sistema de barrido electrónico de la muestra, así como los análisis globales y puntuales.

## VARIABILIDAD GRANULOMÉTRICA DE LAS PARTÍCULAS

Para la realización de estos ensayos se empleó un total de 8 muestras procedentes de los yacimientos e indicios de interés (*arcilla-1, arcilla-2, arcilla-3, moka-1, moka-1a, cacahual-2, cacahual-3 y cacahual-4*), descritas con sumo detalle en los capítulos precedentes.

La preparación de las muestras seleccionadas para este ensayo se inicia con la reducción de sus diámetros originales, empleando para ello una máquina machacadora de mandíbulas (figura 45 a), con la cual se reduce la *granulometría* inicial hasta 3 cm, aproximadamente. Posteriormente, se someten a una segunda fase de reducción para obtener una fracción de 1 cm de diámetro (ver figura 45 b).

Se separa y se seca 1 kg de material obtenido en la segunda fase de molienda para ser secado en una estufa durante 2 horas, a temperatura constante de 100 °C (ver figura 46 a). Para hacer más efectivo el proceso de secado, se disgrega la muestra cuidadosamente en toda la bandeja.

A continuación, se coloca en un desecador (ver figura 46 b) durante media hora para su enfriamiento lento y uniforme; con este procedimiento se evita la reabsorción de la humedad ambiental remanente del laboratorio.

Una vez que la muestra está completamente seca se procede a la tercera fase de molienda, operación que se realiza mediante un molino vibratorio (figura 47).



FIGURA 45. Máquinas machacadoras de mandíbulas "Alas" y "Controls" empleadas en la reducción de materiales en las fracciones 3 a 1 cm, respectivamente (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).



FIGURA 46 (a, y b). En (a) estufa empleada en el secado de las muestras trituradas a 100 °C; en (b) desecador para la preservación de las muestras ante la humedad ambiental o inducida (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).



FIGURA 47. Molino vibratorio "Siebtechnik", señalándose la cámara de recepción de la muestra (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).



FIGURA 48. Tamiz empleado y aspecto del material obtenido con *granulometría* final por debajo de 0,063 mm (Fuente: Blázquez, G., 2019).

La reducida capacidad de la cámara receptora de este molino sólo permite la molienda de la muestra por fases, en cada una de las cuales debe depositarse una cantidad equivalente a 150 g, aproximadamente. El tiempo empleado para cada molienda en esta última fase es de 1 minuto, según las especificaciones de la *norma*.

El material obtenido de la molienda de la tercera fase es tamizado, según la *norma* UNE-EN 933-1:1998, con el tamiz N° 26/13 luz 0,063 mm, de diámetro 200 mm y material AISI 304; el producto final debe tener una *granulometría* menor que 0,063 mm (figura 48).

El paso siguiente consiste en la separación de 600 g de material tamizado para ensayos físicos y mecánicos ulteriores. En el pesaje se utilizan balanzas de alta precisión (figura 49).

El material fino procedente del molino vibratorio es sometido al análisis *granulométrico* mediante el método del "filler" (UNE-EN 933-10:2001), siendo posible obtener una relación pormenorizada de poblaciones a partir de las cuales pueden planificarse distintos tipos de ensayos. Parte del material molido puede reanalizarse con el *granulómetro láser*, mediante lo cual se obtendrá una medida de control de la calidad del ensayo.

El proceso debe garantizar una muestra con una *granulometría* suficientemente fina y uniforme, por debajo de las 63 μ, con una marcada regularidad en el tamaño.



FIGURA 49. Balanza de alta precisión "Precisa", modelo 1620C, muy empleada en el pesaje de materiales finos (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Además de las muestras naturales que se analizan y se describen en los párrafos precedentes, es conveniente explicar el proceso del análisis *granulométrico* de la *arena normalizada* (CEN-NORMS AND DIN EN 196-1; UNE-EN 933-1:1998), fundamentalmente cuando se pretende investigar el comportamiento de una mezcla de *mortero* y *hormigón* en la cual toman parte estos materiales de forma conjunta y simultánea. Los resultados estándares de los ensayos realizados con estas *arenas* se indican en la tabla 3 (Costafreda, J.L., 2008).

Según estos resultados, los mayores porcentajes de material retenido forman dos poblaciones significativas cuyos diámetros se encuentran ubicados en el rango de 1,00 mm y 0,5 mm. En la primera de ellas se retiene el 24,43% del material, mientras que en la segunda el 32,48%; ambas representan los tamaños adecuados para la preparación del mortero, desechándose las poblaciones de finos (Costafreda, J.L., 2008).

El *rechazo* grueso está constituido por el 8,30% en el tamiz 1,60 mm; mientras que el fino posee el 11,56% en el tamiz 0,250 mm, el 18,13% en el tamiz 0,125 mm y el 4,84% en el tamiz 0,063 mm.

TABLA 3: Determinación de la *granulometría* de las partículas de una masa estándar de *arena normalizada* mediante tamizado por vía seca (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Tamaño de abertura del tamiz (mm)	Masa de material retenido (R <sub>i</sub> ) (g)	Porcentaje de material retenido R <sub>i</sub> /M <sub>1</sub> x 100 (%)	Porcentajes acumulados que pasan 100 - S(R <sub>i</sub> /M <sub>1</sub> x 100) (%)
2,00	0,00	0,00	100,00
1,60	39,29	8,30	91,70
1,25			
1,00	115,57	24,43	75,57
0,800			
0,630			
0,500	153,69	32,48	67,52
0,400			
0,320			
0,250	54,71	11,56	88,41
0,200			
0,160			
0,125	85,77	18,13	81,87
0,100			
0,080			
0,063	22,89	4,84	95,16

Masa seca total (M<sub>1</sub>) = 473,13 g

Masa seca tras lavado (M<sub>2</sub>) = 473,13 g

Material tamizado que queda en la bandeja del fondo (P) = 0,39 g

La presencia de partículas finas en las arenas normalizadas se debe al desgaste físico que se produce durante su transporte, almacenamiento y manipulación.

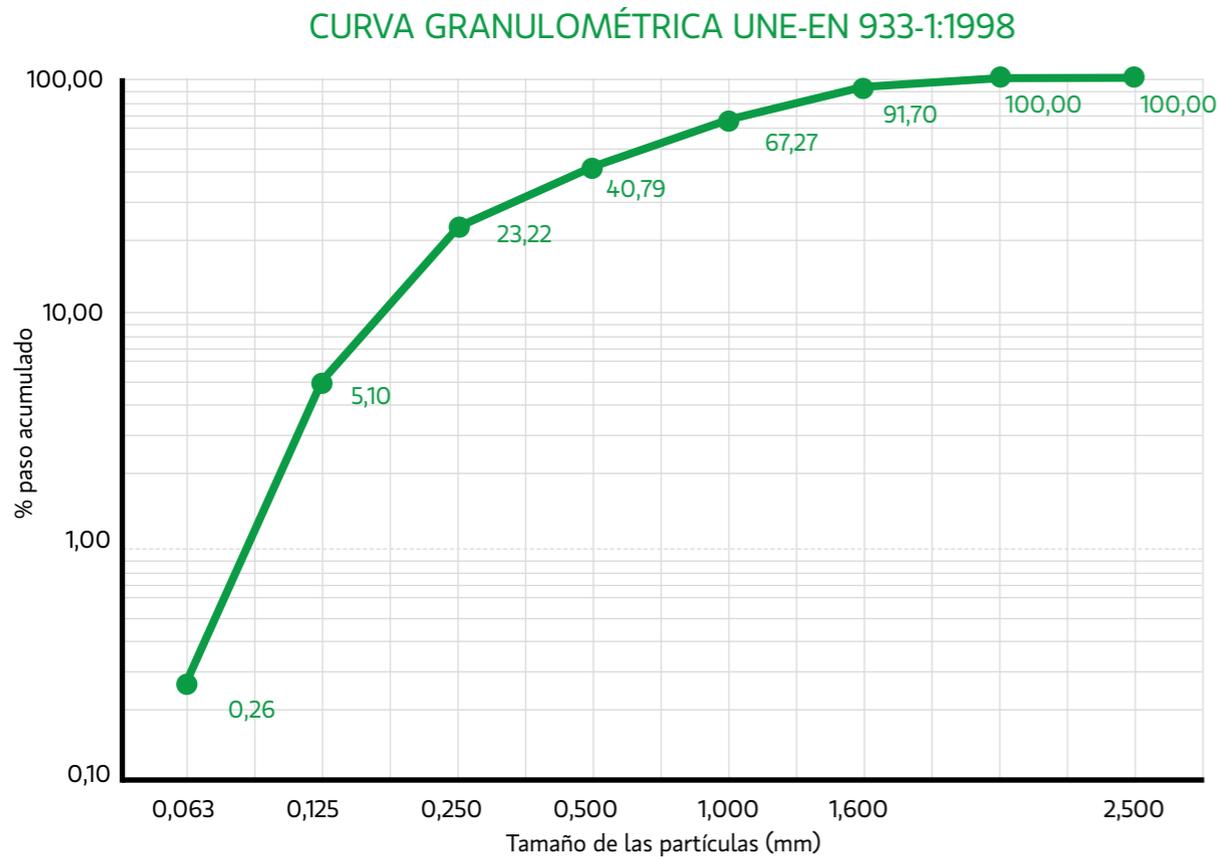


FIGURA 50. Curva granulométrica obtenida a partir del análisis de la arena normalizada (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

La curva representada en la figura 50 muestra la distribución regular de las partículas que conforman la arena normalizada, los porcentajes de finos presentes, a pesar de los controles de calidad a que son sometidos estos materiales, son debidos a desgastes físicos de las partículas de arena durante el proceso de transporte, almacenamiento y posterior manipulación para los diversos fines a que están destinadas.

El análisis granulométrico permite eliminar el material fino que pasa a través de los tamices de menor abertura y conservar los productos gruesos con diámetros parecidos, con lo cual se ciñe su empleo de acuerdo a lo indicado en las normas especializadas.

La granulometría gruesa es idónea para crear un cuerpo sólido en las mezclas de cementos y morteros y, aparejado a ello, mayor resistencia en el tiempo; sin embargo, el fundamento físico-químico se basa en que, a diferencia de los agregados ultrafinos que poseen gran propensión por el agua, los áridos naturales gruesos se hidratan lentamente, permitiendo que la reacción se prolongue en el tiempo. Durante este largo período de hidratación gran parte de la sílice contenida en la arena tendrá tiempo de reaccionar con la interfase cemento-agua, obteniéndose resistencias mecánicas elevadas (Gili, g., 2000; González, M., 1991; González, M., 2000; Costafreda, J.L., 2008).

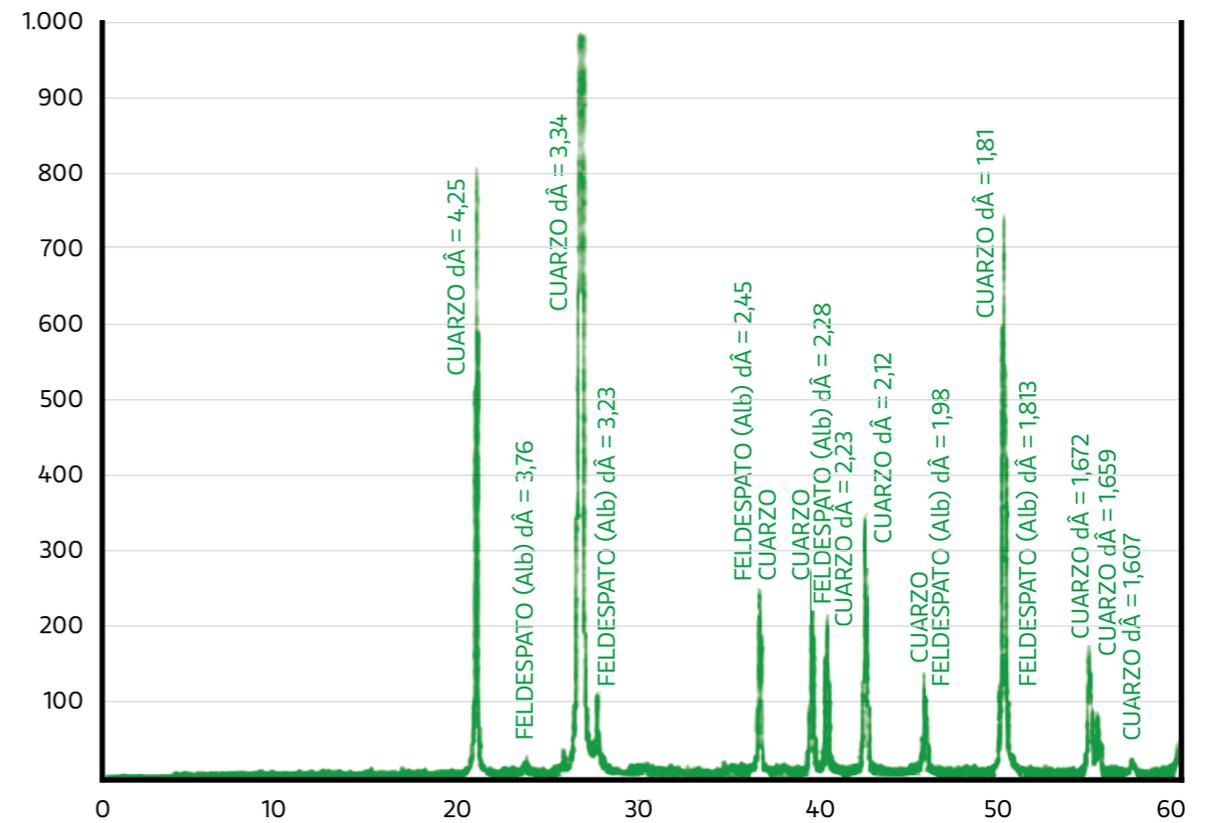


FIGURA 51. Derivatograma obtenido del análisis de las fases mineralógicas que componen la arena normalizada.

TABLA 4: Composición química de la arena normalizada empleada en el presente trabajo, determinada por fluorescencia de rayos x (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Compuestos en % de masa (árido natural anhidro)										PPC (%)	(%) Total
SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		
94,25	0,93	0,88	2,24	0,059	0,058	0,06	0,86	0,141	0,038	0,48	100

La *arena normalizada* empleada en las diversas investigaciones está por lo general constituida por dos fases mineralógicas: una mayoritaria, representada por la *sílice (cuarzo)* con una abundancia de alrededor del 95%, y una minoritaria, constituida por *feldespato* con contenido de alrededor del 5% (figura 51) (Costafreda, J.L., 2008).

Puede comprobarse, de este modo, que este material posee una indiscutible pureza y una elevada estabilidad tanto física como química, aportada por los minerales que la componen (figura 51 y tabla 4).

Los resultados de la composición química (tabla 4) establecidos para la *arena normalizada* suelen corroborar fielmente la presencia de las fases detectadas por *difracción de rayos x*, así como la abundancia de estas especies químicas en porcentaje de masa. El insignificante contenido en compuestos *alcalinos, alcalino-térreos, ferrosos y sulfatos* en su composición confirman la pureza de este material, como se ha apuntado anteriormente.

Del mismo modo que ocurre con la *arena normalizada*, es preciso tener en cuenta el comportamiento *granulométrico* de las partículas del *cemento* que se pretende emplear en la investigación (*norma UNE-EN 197-1:2000*). No es conveniente validar ciegamente las prescripciones tecnológicas que llegan de manos de los diversos fabricantes.

El *cemento*, precisamente por su naturaleza única e intrínseca, puede sufrir múltiples alteraciones relacionadas con su fabricación, transporte y almacenamiento, por lo que debe ser sometido a ensayos de control antes de su utilización definitiva.

En las investigaciones suele emplearse con bastante frecuencia el *cemento pórtland tipo I*, con clase de resistencia 42,5 R de elevada resistencia inicial, cuyo código se expresa como *CEM I 42,5 R*.

El análisis del *cemento* de referencia por el método “*filler*” demuestra que al absorberse 50,18 g de este material el 100% de su masa pasa a través de los tamices 0,125 mm y 0,063 mm, existiendo en todos los casos un porcentaje de retención nulo. Estos resultados indican entonces que este *cemento* posee una gran homogeneidad y regularidad *granulométrica* (tabla 5) (Costafreda, J.L., 2008).

El resultado del estudio de las fases mineralógicas del *cemento* de referencia indica la presencia de fases anhidras típicas de la composición del *clínker pórtland*, tales como *silicato bicálcico (C<sub>2</sub>S)*, *tricálcico (C<sub>3</sub>S)*, *aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A)*, *sílice* y *yeso* (figura 52).

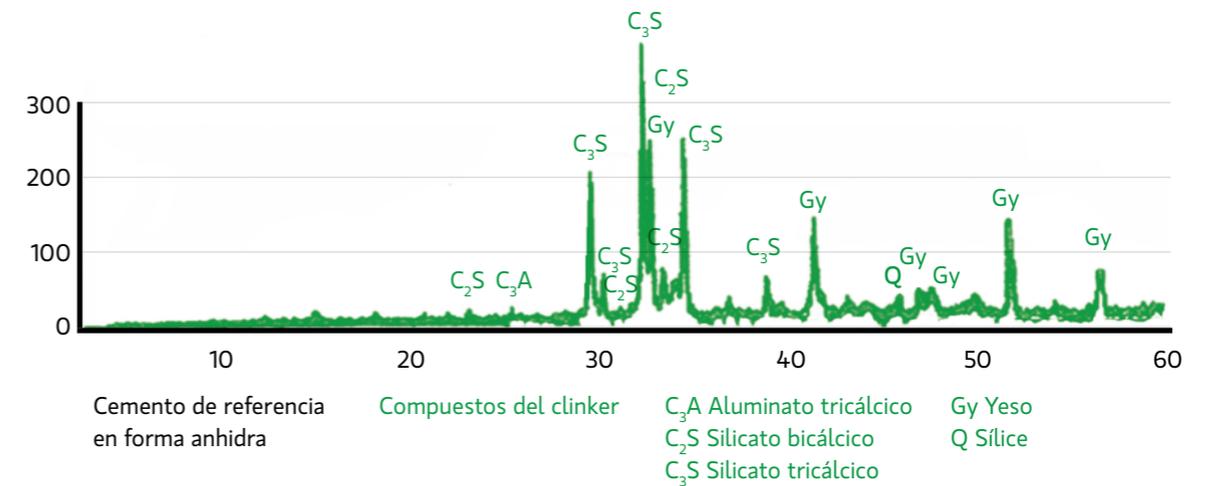
La existencia de estas fases en la composición mineralógica de un *cemento* asegura su resistencia física y gran parte de su estabilidad química.

**TABLA 5:** Resultados del análisis *granulométrico* de *fillers* por vía seca para un *cemento* de referencia (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Tamaño de abertura del tamiz (mm)	Masa de material retenido (Ri) (g)	Porcentaje de material retenido Ri/M1 x 100 (%)	Porcentajes acumulados que pasan 100 - S(Ri/M1 x 100) (%)
2,00	0,00	0,00	100,00
0,125	0,00	0,00	100,00
0,063	0,00	0,00	100,00

Masa seca total (M<sub>1</sub>) = 50,18 g

Porcentaje total de masa absorbida a través del tamiz 0,063 mm = 100% = 50,18 g



**FIGURA 52.** Derivatograma obtenido del análisis de las fases mineralógicas que componen un *cemento* de referencia (*CEM I 42,5 R*) anhidro (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

**En un cemento puzolánico la concentración de hidróxido de calcio en disolución es siempre menor que la concentración de saturación.**

**TABLA 6:** Composición química de un cemento pórtland de referencia anhidro determinada por fluorescencia de rayos x (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

MUESTRA	Compuestos en % de masa												P.P.C. (%)	% Total
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Cl	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	MnO		
Cemento de Referencia	17,45	5,59	1,37	0,091	0,641	3,35	64,04	-	0,326	0,072	4	0,094	2,43	99,454

La presencia de C<sub>3</sub>A puede provocar el desencadenamiento instantáneo de la reacción química de la interfase cemento pórtland-agua, hidratándose rápidamente e impidiendo la correcta hidratación de los silicatos (Sugita, S. et al., 1997); sin embargo, según la figura 52, la fase constituida por yeso serviría como regulador de fraguado que, en específico, ralentizaría notablemente la hidratación del C<sub>3</sub>A, haciéndola más lenta que la del resto de los compuestos anhidros, dando tiempo a que la reacción hidráulica sea un proceso global, uniforme y completo (Costafreda, J.L., 2008).

Según los resultados de la tabla 6, la composición química del cemento descrito corresponde a un aglomerante común de alta resistencia inicial, en conformidad con lo establecido en las normas correspondientes.

El cálculo de la relación CaO/SiO<sub>2</sub> da un resultado igual a 3,7%, por lo que se considera normal la proporción de estos compuestos en su composición, ya que, según la norma, no debe ser menor que el 2%. Por su parte, el contenido en MgO es de 0,641%, un valor evidentemente más bajo que el 5% contemplado como límite máximo en la citada norma.

El contenido en SO<sub>3</sub> es de 4%, que coincide con la medida exacta de este compuesto en el clínker pórtland de los cementos comunes; por tanto, es adecuado desde el punto de vista químico y posee capacidad para neutralizar los aluminatos en la reacción de hidratación.

En la tabla 6 se aprecia también que los compuestos alcalinos poseen contenidos inferiores a los normalizados; este déficit podría ralentizar la velocidad de la reacción hidráulica e impedir la formación de etringita, factor que por sí solo contribuye a la preservación de las resistencias. El intercambio iónico entre los compuestos alcalinos, cuyos productos de reacción generalmente carecen de resistencia mecánica apreciable, produce el debilitamiento de la red cristalina del gel precursor de la tobermorita (Valdez, P. et al., 2004).

## ANÁLISIS QUÍMICO DE PUZOLANICIDAD

Antes de elaborar el procedimiento para el uso industrial de un material natural en la fabricación de cementos puzolánicos es preciso determinar sus propiedades hidráulicas, es decir, su propensión a reaccionar con otros compuestos en presencia de agua, fenómeno conocido como puzolanicidad.

Uno de los métodos químicos más conocidos para determinar las propiedades puzolánicas de un material es el “Ensayo de puzolanicidad para los cementos puzolánicos”, cuyo principio básico se basa en la comparación de la cantidad de hidróxido de calcio

presente en una disolución acuosa que contiene cemento hidratado, con la cantidad de hidróxido de calcio capaz de saturar un medio de la misma alcalinidad (UNE-EN 196-5:2006). El ensayo se considera positivo si la concentración de hidróxido de calcio en disolución es inferior a la concentración de saturación (UNE-EN 196-5:2006) (Costafreda, J.L., 2008). Lo comentado puede ser representado gráficamente cuando los valores de concentración de iones hidroxilo y de óxido de calcio se sitúan por debajo de la isoterma de solubilidad a 40°C (figura 53). En este caso se dice que la muestra analizada es puzolánica (UNE-EN 196-5:2006).

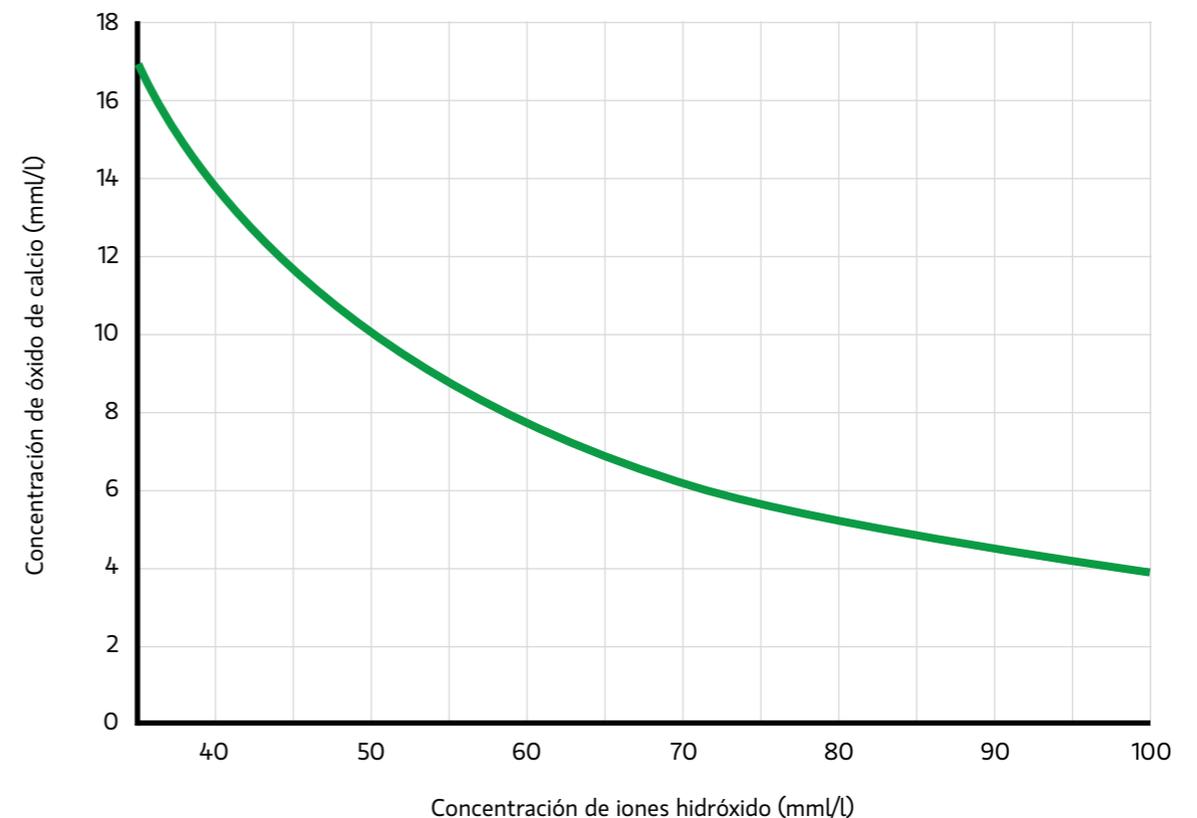


FIGURA 53. Diagrama para la representación gráfica de los resultados de la puzolanicidad para un período de tiempo de 7 días (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

En un cemento puzolánico la concentración de hidróxido de calcio en disolución es siempre menor que la concentración de saturación (UNE-EN 196-5:2006).

Los cementos puzolánicos son aquellos que están compuestos de clínker, puzolana y yeso; en ellos el porcentaje de puzolana está entre el 30 y el 50% (Calleja, J., 2002; Rosell, M. y Gayoso, R., 2001).

Los reactivos empleados en el ensayo químico de puzolanidad, según las especificaciones de la norma UNE-EN 196-5:2006, se relacionan a continuación:

- Ácido clorhídrico concentrado (HCl), aproximadamente, 12 mol/l ( $\rho = 1,18 \text{ g/cm}^3$  a  $1,19 \text{ g/cm}^3$ ).
- Ácido clorhídrico diluido, aproximadamente 0,1 mol/l.
- Ácido clorhídrico diluido (1 + 2).
- Naranja de metilo (dimetilaminoazobenzeno p-sulfonato de sodio).
- Indicador de naranja de metilo.
- Hidróxido de sodio (NaOH).
- Disolución de hidróxido de sodio.
- Carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) desecado a  $110^\circ\text{C}$ .
- Cloruro de potasio (KCl) desecado a  $110^\circ\text{C}$ .
- Murexida (purpurato de amonio).
- Indicador de murexida.
- EDTA (sal di-sodio, di-hidrato de ácido etilendiamotetraacético).
- Disolución de EDTA, aproximadamente, 0,025 mol/l.

- Carbonato de sodio ( $\text{NaCO}_3$ ) desecado a  $260^\circ\text{C}$ .
- Recipiente cilíndrico de polietileno de 500 ml de capacidad y unos 70 mm de diámetro, provisto de un tapón de estanqueidad a presión bloqueado por otro tapón de rosca.
- Embudo de vástago ancho.
- Embudos Buchner de porcelana y de unos 60 mm de diámetro interior.
- Papel de filtro de poro fino (diámetro medio de poro de unos  $2 \mu\text{m}$ ).
- Matraz para filtrado a vacío de 250 ml.
- Vasos de 250 ml y de 400 ml.
- Pipetas de precisión de 50 ml y de 100 ml.
- Buretas de precisión de 50 ml.
- Compartimiento termostático de temperatura uniforme regulada a  $40 \pm 0,5^\circ\text{C}$ .
- Matraces aforados de 500 ml y de 1.000 ml.
- Matraz cónico (erlenmeyer) de 250 ml.

La disolución se prepara introduciendo 100 ml de agua destilada en un recipiente de ensayo y se coloca en la estufa, a una temperatura constante de  $40^\circ\text{C}$ , donde se mantiene durante una hora en un régimen completamente cerrado.

A continuación se pesan  $20 \pm 0,01 \text{ g}$  de muestra de la mezcla seca (75% cemento de referencia, 25% material natural) en una balanza de alta precisión, y se deposita dentro del recipiente de ensayo, que se cierra herméticamente.

Se agita vigorosamente la mezcla durante 20 segundos, con movimientos giratorios horizontales, apoyando la base del recipiente sobre una superficie plana, y a continuación se coloca el recipiente con la muestra en la estufa, procurando mantener una perfecta posición horizontal.

Transcurridos 7 días, se extrae el recipiente y se filtra la disolución al vacío con el embudo Buchner, empleándose dos filtros de poros finos (figura 54). El filtrado al vacío se lleva a cabo con rapidez, dentro de un margen de tiempo de 30 segundos, con lo cual se evita la reabsorción del dióxido de carbono ambiental y el descenso de la temperatura de la disolución.



FIGURA 54. Equipo de vacío empleado para el filtrado (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Se cierran inmediatamente los dos orificios del matraz kitasato y se deja enfriar la disolución hasta que alcanza la temperatura ambiente.

El cálculo de la concentración de los iones hidroxilo  $[\text{OH}^-]$  se basa en la siguiente expresión:

$$[\text{OH}^-] = \frac{1.000 \times 0,1 \times V_3 \times f_2}{50} = 2 \times V_3 \times f_2$$

Donde:

- $[\text{OH}^-]$ : es la concentración en iones hidroxilo (mmol/l).
- $V_3$ : es el volumen de la disolución de ácido clorhídrico (0,1 mol/l) que se ha gastado en la valoración (mm).
- $f_2$ : es el factor de la disolución de ácido clorhídrico (0,1 mol/l).

Los pasos que deben seguirse para la determinación de la concentración de los iones hidroxilo son los siguientes:

1. Se homogeniza el líquido filtrado agitando el matraz kitasato con el agitador magnético ilustrado en la figura 55; a continuación se toman 50 ml de la disolución y se introducen en un vaso de 250 ml, empleando una pipeta para este fin. Se añade el indicador naranja de metilo hasta que la disolución se torna de color amarillo.

**El proceso de puzolanidad tiene dos tendencias principales: más fijación de cal libre y mayor neutralización de hidróxido de calcio en disolución.**



FIGURA 55. Agitador magnético "Bunsen". Se muestra la tonalidad amarilla luego de ser agregado el indicador de naranja de metilo (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Los pasos siguientes consisten en rellenar el vaso con ácido clorhídrico (0,1 mol/l), valorar la alcalinidad dejando caer gota a gota el HCl y agitar el conjunto de forma moderada hasta que el color de la disolución cambie de amarillo a rosa (figura 56).

La determinación de la concentración de óxido de calcio (CaO) se realiza según la fórmula siguiente:

$$[\text{CaO}] = \frac{1.000 \times 0,025 \times V_4 \times f_1}{50} = 2 \times V_4 \times f_1$$

Donde:

- [CaO]: es la concentración en óxido de calcio (mmol/l);
- $V_4$ : es el volumen de la disolución de EDTA que se ha gastado en la valoración (mm);
- $f_1$ : es el factor de la disolución de EDTA.

Los pasos seguidos para determinar la concentración de óxido de calcio (CaO) se detallan en las líneas siguientes:

Se añade a la disolución, valorada anteriormente, 5 ml de hidróxido de sodio al 10% y se mide el pH, que debe ser superior a 13. Si el valor del pH es inferior a 13 se debe añadir más cantidad de hidróxido de sodio hasta alcanzar el nivel deseado. El equipo empleado en la medición del pH es el pH-metro "Titrino", modelo 719S.

Se introduce en la disolución 0,0500 g de indicador de murexida y a continuación se añade, gota a gota, una disolución de EDTA a 0,025 mol/l; se procede a agitarla moderadamente hasta que su color cambie de púrpura a morado (figuras 57 y 58).

Una vez anotados los volúmenes de HCl y EDTA consumidos, se introducen en un software que proporciona los resultados en forma de valores medios de la concentración de iones hidroxilo y de óxido de calcio; para los cálculos se utiliza la curva isotérmica de solubilidad a 40 °C del hidróxido de calcio en presencia de álcalis. En la gráfica, en el eje de las abscisas, se relaciona la alcalinidad total con el contenido de CaO señalado en el eje de ordenadas. Si al representar un resultado, lo cual se hace mediante un punto que representa el valor medio de concentración aportado por la muestra, éste se ubica por debajo de la curva significa que la mezcla es puzolánica, siendo lo contrario si se ubica por encima de la misma (figura 53).

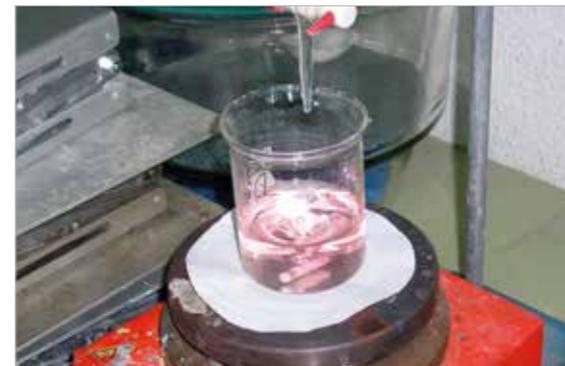


FIGURA 56. Aspecto de la muestra de tonalidad rosada clara tras su valoración con ácido clorhídrico (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).



FIGURA 57. Aspecto purpúreo de la muestra bajo la influencia del indicador de murexida (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).



FIGURA 58. Detalles de la tonalidad morada que adopta la muestra tras su valoración con la disolución de EDTA (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

## MATERIAS ORGÁNICAS

Generalmente, las rocas y minerales pueden estar contaminados de forma natural con *materias orgánicas* en su medio de yacencia, su deficiente gestión puede acarrear daños irreversibles en el fraguado de cementos, morteros y hormigones.

El contenido en *materias orgánicas* se determina de acuerdo con la norma EN-1744-1: 2010, según la cual el procedimiento se debe iniciar con el secado de la muestra en una estufa a temperatura constante de 50 °C, durante un período completo de 24 horas consecutivas.

Transcurrido ese tiempo, se escoge una probeta graduada con capacidad de 1 litro en la cual se vierte una disolución de hidróxido de sodio con concentración del 3%; el nivel de esta disolución debe alcanzar una marca previamente practicada en la escala de la probeta que coincide con la graduación de 275 ml. Se vierte la muestra en la probeta hasta que el nivel de la columna de la disolución, empujada hacia arriba por la fuerza de desplazamiento que infiere la masa sólida de la muestra, alcanza una segunda marca en la graduación correspondiente a los 400 ml.

A partir de aquí se agita vigorosamente el conjunto durante 1 minuto, procurando mantener el nivel de la masa dentro de la disolución perfectamente horizontal. Posteriormente, se deja reposar durante otras 24 horas.

Si la disolución en cuestión es capaz de adquirir una coloración similar o más intensa que la que posee la disolución patrón el resultado es negativo, dado que esta coloración es provocada por un contenido anómalo en *materias orgánicas* dentro de la muestra, lo cual interferirá negativamente en el *fraguado* normal. La descomposición ulterior de las sustancias orgánicas tiende a dañar los *morteros* y las estructuras consolidadas.

**TABLA 7:** Relación de muestras originales, submuestras y proporciones en gramo para la elaboración de los *morteros* (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

MUESTRA	SUBMUESTRA	DOSIFICACIÓN NORMALIZADA
Arcilla-1	Arcilla-1-28*	375 g Cemento de referencia 125 g de arcilla sepiolítica / roca volcánica 225 g de agua desmineralizada
Arcilla-2	Arcilla-2-28	
Arcilla-3	Arcilla-3-28	
Moka-1	Moka-1-28	
Moka-1a	Moka-1A-28	
Cemento de referencia	Cem-28	450 ± 2 g de cemento de referencia 1.350 ± 5 g de arena normalizada 225 ± 1 g de agua desmineralizada

(\*) Submuestras de *morteros* compuestas por *arcilla sepiolítica*, *roca volcánica*, *cemento pórtland*, *arena normalizada* y agua desmineralizada, para ser analizadas durante un período de 28 días de acuerdo a las dosificaciones que figuran en la tabla 7.

## PROCEDIMIENTOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL MORTERO. PROYECTOS DE DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS

El procedimiento seguido para la preparación de los *morteros* comunes y *puzolánicos* que se describen en este epígrafe se ha ceñido rigurosamente a las especificaciones de la norma *UNE-EN 196-1:2005*, para 28 días de *fraguado*. En este ensayo se estudian las muestras *arcilla-1*, *arcilla-2*, *arcilla-3*, *Moka-1* y *Moka-1a*. Se ha elegido un *cemento pórtland* como agente aglomerante patrón. Las distintas dosificaciones por muestras para elaborar los *morteros* normalizados se especifican con detalle en la tabla 7.

Para la elaboración de los *morteros* mixtos o *puzolánicos*, a partir de las mezclas de *arcilla sepiolítica / roca volcánica* con *cemento pórtland*, se prepara la siguiente proporción: *cemento pórtland* (75% = 375 g) y *arcilla sepiolítica / roca volcánica* (25% = 125 g) (tabla 7). De la dosificación mencionada se obtiene una masa total de 500 g, de la cual sólo se emplean 450 g (*UNE-EN 196-1:2005*) para la fabricación y enmoldado de los *morteros*, en una mezcla final con *arena normalizada* y agua.

La mezcla inicial de la interfase *cemento-arcilla sepiolítica / roca volcánica*, en su condición anhidra, se realiza manualmente, aplicando movimientos rotatorios al envase para lograr una homogeneización adecuada antes del amasado definitivo. Posteriormente, se pesan 225 g de agua desmineralizada que se vierten en el receptáculo de la máquina amasadora (figura 59), e inmediatamente después se deposita la mezcla compuesta por *cemento-arcilla sepiolítica / roca volcánica*. Paralelamente, se añaden 1.350 g de *arena normalizada* en una tolva adjunta al cabezal de la mencionada máquina.



↑ **FIGURA 59.** Máquina amasadora "Suzpecar" (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).



FIGURA 60. Compactadora de sacudidas "Bonfiglioli" (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

El segundo paso contempla la puesta en marcha de la máquina amasadora a velocidad lenta. Transcurridos 30 segundos, se añade automáticamente la arena normalizada al resto de la mezcla; esta adición se efectúa durante un período de tiempo igual a 30 segundos, durante el cual la máquina continúa en marcha lenta. Terminada esta operación se inicia la marcha rápida durante otros 30 segundos, tiempo tras el cual se detiene el amasado por espacio de 1 minuto y 30 segundos. En este intervalo de reposo se retira de las paredes del receptor, y con la ayuda de una espátula de caucho, el mortero fresco disperso que es reintegrado al área de influencia de la paleta mezcladora. La operación concluye con una última fase de amasado a velocidad rápida, durante 1 minuto (Costafreda, J.L., 2008).

Por la importancia que reviste, se anota en las fichas correspondientes la fecha y la hora exactas en que comienza el amasado, ya que representan el punto de partida o de referencia inicial a partir del cual se fijan los días en que serán ensayadas las probetas (Costafreda, J.L., 2008).

Las probetas son enmoldadas inmediatamente después de concluido el amasado total del mortero. En la plataforma de la máquina compactadora de sacudidas (figura 60) se fija firmemente el molde a una tolva colectora por medio de cuatro tornillos laterales. Se inicia el llenado del molde en varias fases hasta conformar el primer estrato de mortero, el cual se extiende uniformemente con el auxilio de una espátula de brazo largo, cuya configuración ayuda a mantenerla en posición vertical durante la distribución del material. La superficie de la capa de mortero debe ser plana y lisa.

El siguiente paso es la puesta en marcha de la máquina compactadora que transmite al molde 60 golpes normalizados, a razón de un golpe por segundo. En este proceso se cubre el molde con un lienzo que evita la proyección de partículas de mortero fuera de su receptor. Terminado este paso se completa el molde con una segunda capa de mortero; esta vez se emplea una espátula de brazo corto con la cual se moldea el material de la forma descrita en el párrafo anterior. Se compacta con otros 60 golpes de la máquina compactadora.

Por último, se retira con precaución el molde y la tolva de la mesa de compactación para evitar derrames innecesarios; se separa la tolva e inmediatamente, con el auxilio de una regla plana metálica, se enrasa el molde.

El enrasado se lleva a cabo desde el centro del molde hacia sus extremos, manteniendo la regla en posición vertical y moviéndola transversalmente a derecha e izquierda, de forma lenta y cortante. Con la ayuda de esta regla se concluye el alisado final de la superficie de las probetas; se limpian los bordes del molde, eliminando todo vestigio de mortero y seguidamente se cubre con una lámina gruesa de vidrio de 210 mm x 185 mm x 6 mm de espesor.

El número del molde, grabado en los bordes de éste, se registra en las fichas de amasado, quedando garantizada la correcta identificación posterior de las probetas. A continuación se introducen los moldes en la cámara húmeda y en posición horizontal, de manera que el aire húmedo acceda libremente a todos sus lados.

Veinticuatro horas después los moldes deben retirarse de la cámara húmeda para su desarme. Con un martillo de goma y una regla metálica se golpea suavemente en los bordes liberando de esta manera las probetas, en cuyos lados más lisos, con la ayuda de un lápiz especial, se graban las siguientes inscripciones: número de la probeta (según su posición relativa dentro del molde), día, mes y hora de rotura, y el número de la muestra natural a la cual corresponden dichas probetas (figura 61).



FIGURA 61. Probetas expuestas tras ser desprovistas de sus moldes (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Inmediatamente, las probetas son pesadas y registradas en las fichas de amasado, luego se introducen verticalmente en un tanque de agua a temperatura de  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con el extremo rotulado hacia arriba. Para dar a las probetas mayor estabilidad en su posición vertical, así como para permitir que el agua circule libremente a través de todos sus lados, se emplean emparrillados plásticos cuyas celdas se ajustan adecuadamente a la medida de las probetas. La columna de agua debe cubrir las caras superiores en más de 5 mm.

Los moldes metálicos se limpian cuidadosamente de los restos de mortero seco y se engrasan para sus usos ulteriores.

## TIEMPOS DE INICIO Y FINAL DE FRAGUADO Y ESTABILIDAD DE VOLUMEN

El *fraguado* es el proceso mediante el cual el *cemento* se endurece y comienza a ganar resistencia. El tiempo de *fraguado* de la pasta se define como *fraguado* inicial y *fraguado* final. Ambos son tiempos arbitrarios e indican el momento en que la pasta comienza a endurecerse considerablemente. El *fraguado* inicial ocurre, generalmente, entre 1-4 horas y el final entre 3 y  $\pm 7$  horas (O'Nelly, R. y Hill, R. 2001).

El tiempo de *fraguado* se afecta por los contenidos en compuestos minoritarios (álcalis y sulfatos), la finura del *cemento*, la relación *agua-cemento*, la presencia de *materias orgánicas* y la temperatura. Los *fraguados* anormales son: el falso *fraguado*, que es el rápido endurecimiento sin liberación de calor, y el *fraguado* instantáneo, que está acompañado de una liberación considerable de calor y muestra una gran plasticidad por remezclado (Malhotra, V. y Ramezani-pour A., 1994).

Las muestras se analizan por medio de la metodología explicada en la *norma UNE EN 196-3:1996*. Los equipos empleados son: balanzas de precisión, probeta graduada y máquina amasadora, mencionados en los párrafos anteriores. El equipo utilizado en la determinación del tiempo de *fraguado* es el aparato de *Vicat*.

El procedimiento consiste en mezclar 500 g de la mezcla *cemento-arcilla sepiolítica / roca volcánica* con 225 g de agua destilada en el receptáculo de la máquina amasadora; el agua y la mezcla se añaden cuidadosamente durante un tiempo comprendido entre los 5 y los 10 *seg*. Este tiempo final es anotado como *tiempo 0*, y se emplea como referencia para las medidas posteriores.

Las velocidades de amasado empleadas son: tiempo 1: 90 *seg* (*velocidad lenta*); tiempo 2: *parada* (15 *seg*); tiempo 3: 90 *seg* (*velocidad lenta*).

Para la determinación del tiempo de *fraguado* inicial se rellena un molde cónico con la pasta y se enrasa, sin compactar ni sacudir previamente, y se introduce en la cámara húmeda a 20°C y con una humedad relativa menor del 90%. La penetración se realiza haciendo descender la aguja del *Vicat*, previamente calibrado, a través del contenido del molde y se toma la lectura en la escala graduada.

El tiempo de *fraguado* final se realiza invirtiendo el molde, y se efectúa el ensayo por la cara del mismo que anteriormente estuvo apoyada. El tiempo de *fraguado* final es el transcurrido desde el tiempo de referencia cero hasta los 15 minutos, intervalo en el cual la aguja ha penetrado unos 0,5 mm en la pasta.

La *estabilidad de volumen* se determina con el empleo del molde de *Le Chatelier*, el cual se llena de pasta y se enrasa sin aplicación de golpes ni acciones de compactación. Se coloca en la cámara húmeda durante 24 horas, aproximadamente, a una temperatura de 20°C y humedad relativa del 90%.

El método se basa en la determinación de las variaciones del volumen de la pasta mediante su expansión, lo cual es detectado por medio de la separación que experimentan las dos agujas que se ubican en el borde del molde elástico de *latón*. Una muestra es expansiva cuando es capaz de separar los extremos de ambas agujas hasta una distancia aproximada de  $17,5 \pm 2,5$  mm.

## PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MORTERO

La determinación de la *consistencia* de los *morteros* se lleva a cabo con el auxilio de la *norma UNE-EN 1015-3*, una vez terminado el proceso de amasado.

El ensayo consiste en la determinación de la *consistencia* de la pasta por medio de golpes normalizados que se describen a continuación: en un recipiente cónico desmontable, con receptáculo interior cilíndrico de *bronce* (figura 62 a) que reposa sobre una plataforma de *acero* inoxidable de aproximadamente 40 cm de diámetro (figura 62 b), se deposita *mortero* fresco hasta el nivel donde comienza a ensancharse su abertura superior; el llenado se realiza en dos fases, en cada una de las cuales, con la ayuda de un *pisón* cilíndrico de *caucho* (figura 62 a), se compacta suavemente el contenido con 8 golpes.



FIGURA 62 (a, y b). Equipos y accesorios empleados en el ensayo para la determinación de la *consistencia* del *mortero* fresco. En (a) se muestra el recipiente cónico plegable de *bronce* que sirve de receptáculo inicial de la muestra; en (b) aparece la plataforma metálica provista de una manivela en su base para asestar golpes normalizados a la pasta desmoldada (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

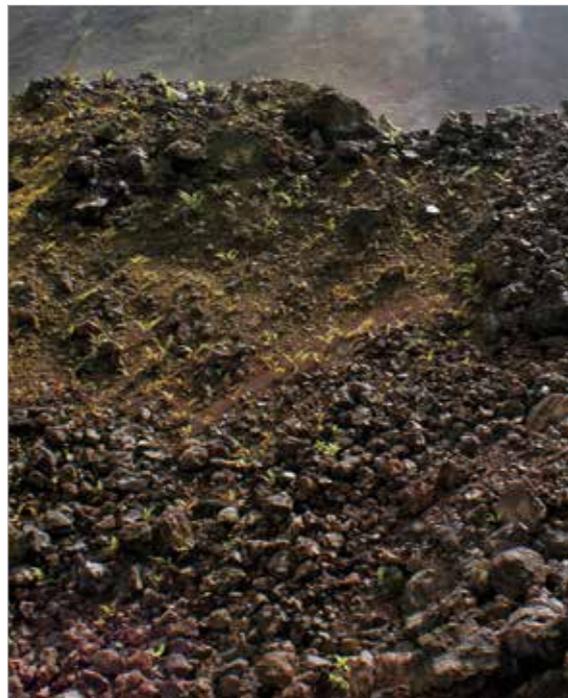
Terminadas estas dos fases de llenado y compactación previas, se retira la carcasa superior del envase cónico y se extrae el *mortero* sobrante con la ayuda de una regla metálica, con la cual se enrasa cuidadosamente la parte superior del material obteniéndose una superficie totalmente lisa y horizontal.

Al finalizar esta operación, se retira la segunda carcasa del envase quedando una masa de *mortero* con morfología *cónico-truncada*, y a continuación, con la ayuda de una manivela ubicada en la parte inferior de la plataforma metálica (figura 62 b), se aplican 15 golpes que provocan la expansión de la masa del *mortero* fresco en toda la superficie de la plataforma.

Algunos investigadores son propensos a considerar los resultados de las resistencias mecánicas en Megapascals (Mpa).

El paso final es la medida, en milímetros, del diámetro de la pasta extendida con la ayuda de una regla metálica. Se efectúan, de forma reglamentaria, dos medidas perpendiculares entre sí y se toma el valor medio de los resultados.

El valor en milímetros del diámetro obtenido es inversamente proporcional a la *consistencia* de la pasta.



### Densidad aparente del mortero fresco

Para la determinación de la *densidad aparente* del *mortero* fresco se utilizan las *normas UNE-EN 1015-2: 1999 y UNE-EN 1015-3: 2000*.

Se toma una cantidad determinada de *mortero* fresco, cuyo peso es conocido como  $m_1$ , y se vierte en un receptáculo metálico con forma cilíndrica, de acero inoxidable, a prueba de corrosión, con un diámetro interior equivalente a 125 mm y con capacidad de almacenamiento para 1 litro  $V_v$  de material.

Una vez vertido el *mortero* en este receptáculo se propinan algunos golpes para expulsar las burbujas de aire contenidas en el interior de la masa, y a continuación se enrasa la superficie del material con una regla metálica.

El siguiente paso consiste en pesar el recipiente lleno de pasta de *mortero* fresco, cuya medida se designa como  $m_2$ .

La *densidad aparente* del *mortero* fresco está dada por:

$$P_{af} = m_1 - m_2 / V_v$$

Para conocer las propiedades mecánicas de las probetas de morteros se suelen realizar ensayos de resistencia a flexión y a compresión

### Densidad aparente del mortero compactado

Los ensayos para la determinación de la *densidad aparente* del *mortero* compactado se realizan con el empleo de fragmentos recuperados de probetas sometidas a los ensayos destructivos de *resistencias mecánicas*. La metodología seguida en este ensayo es la siguiente:

- Los fragmentos son inicialmente secados en la estufa y posteriormente pesados ( $M_1$ )
- Se impermeabilizan cuidadosamente con una película de *parafina* líquida y a continuación se pesan ( $M_2$ ).
- Los fragmentos impermeabilizados son colocados en un recipiente perforado, cuyo orificio facilita la conexión con una balanza, y sumergidos en un tanque con agua con temperatura controlada. A continuación se determina  $M_3$ .

Con la diferencia ( $M_2 - M_1$ ) es posible realizar el cálculo del peso correspondiente a la película de *parafina*.

La *densidad aparente* del fragmento de probeta impermeabilizada está dada por la expresión:

$$P_{as} = [M_2 / (M_2 - (M_3 / P_3))]$$

Donde:

- $P_{as}$ : es la *densidad aparente* del fragmento de probeta impermeabilizado
- $P_3$ : es la *densidad aparente* del agua ( $0,9978 \text{ mg/m}^3$ ).

La *densidad aparente* del *mortero* compactado se obtiene al eliminar previamente el efecto de la película de *parafina*.



Puerto de Malabo

## Propiedades mecánicas del mortero

Para conocer las propiedades mecánicas de las probetas de morteros se suelen realizar los ensayos de resistencia a flexión y a compresión, fundamentalmente para un período normalizado de 28 días.

El cálculo de la resistencia a flexión  $R_f$  ( $N/mm^2$  o  $MPa$ ) se efectúa en base a la fórmula siguiente:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

Donde:

- $R_f$ : es la resistencia a flexión (en newton por  $mm^2$ ).
- $b$ : es el lado de la sección cuadrada de la probeta (en  $mm$ ).
- $F_f$ : es la carga aplicada en el centro de la probeta para su rotura (en newton).
- $l$ : es la distancia entre soportes (en  $mm$ ).

Para la determinación de la resistencia a flexión se utiliza el método de carga concentrada por medio de un flexímetro dotado de memoria de lectura (figura 63). Se coloca la probeta en la base del equipo de forma horizontal, centrada con la ayuda de dos goznes fijos; se aplica la carga verticalmente en el centro del prisma con un incremento uniforme, a una velocidad de  $50 N/s \pm 10 N/s$  hasta su rotura. Se toma la lectura y se anota en la ficha correspondiente.

Las mitades de cada una de las probetas se recogen y se mantienen húmedas para su ensayo de resistencia a compresión.

La resistencia a compresión se lleva a cabo sobre las mitades de las probetas resultantes del ensayo de resistencia a flexión.

El ensayo mecánico a compresión  $R_c$  ( $N/mm^2$  o  $MPa$ ) se calcula de acuerdo a la fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{1.600}$$

Donde:

- $R_c$ : es la resistencia a compresión (en newton por milímetro cuadrado).
- $F_c$ : es la carga máxima de rotura (en newton).
- $1.600$ :  $40 mm \times 40 mm$  es la superficie de los planos o placas auxiliares (en  $mm^2$ ).



FIGURA 63. Vista frontal del flexímetro "Ibertest" (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).



FIGURA 64. Vista de la máquina "S - 200 kN" empleada para realizar ensayos a compresión (Fuente: Costafreda, J.L., 2008).

Se colocan las mitades de la probeta, una a una, en los platos portamuestras de un equipo de resistencia a compresión, como el que se ilustra en la figura 64, conectado a un ordenador dotado de un programa especializado desde donde se monitorizan todas las operaciones de rotura y medición.

Las probetas se centran lateral y longitudinalmente con relación a los platos portamuestras a  $\pm 0,5 mm$ , de manera que la base de la probeta no sobresalga de éstos en más de  $10 mm$ . Se aumenta la carga uniformemente a una velocidad de  $2.400 N/s \pm 200 N/s$ , hasta que se produce la rotura.

Teniendo en cuenta que cada muestra está compuesta por tres probetas, de las cuales se originan seis mitades procedentes del ensayo de resistencia a flexión, se hace una cantidad igual de lecturas a compresión tomándose como valor final la media entre estos seis resultados. Algunos investigadores son propensos a considerar los resultados en megapascals ( $Mpa$ ).

Los restos de probetas ensayadas deben ser recogidos en bolsas plásticas rotuladas con las siguientes inscripciones: *ensayo realizado, período de ensayo y número de la muestra*, con la finalidad de someterlos a ensayos de otra naturaleza.

**El carácter puzolánico de las sustancias es directamente proporcional al incremento de las resistencias mecánicas que experimentan los morteros y hormigones.**

# RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES

## YACIMIENTO DE ARCILLAS SEPIOLÍTICAS DE SAN NICOLÁS

### Difracción de rayos x

Los picos originados del análisis de la muestra *Arcilla-1* corresponden al mineral *sepiolita*. Contiene otras fases subordinadas, representadas por picos débiles de *hematita* y trazas de *caolinita* (figura 65).

La detección de pequeños picos con valores  $d\text{\AA} = 2.5195$ ,  $1.6960$  y  $1.6755$  indica la presencia de *mica biotita*, *moscovita-illita*, *plagioclasa albitizada* y *ortoclasa* como fases subordinadas solapadas entre sí. La *moscovita-illita* ( $d\text{\AA} = 2.5195$ ) se enmascara con la *sepiolita*.

En la muestra *Arcilla-2* se detecta un pico de máxima intensidad relativa (100%) en el ángulo  $2\theta = 11.705$  y valor de espaciamento interplanar  $d\text{\AA} = 7.5543$ , que corresponde a una *arcilla* hidratada (*sepiolita*). Se detectan, además, picos débiles de *hematita* y *caolinita* en forma de trazas (figura 65).

Otras especies detectadas en esta muestra son las que representan la paragénesis *brucita-gibbsita* ( $d\text{\AA} = 4.453$ ) y *caolinita*.

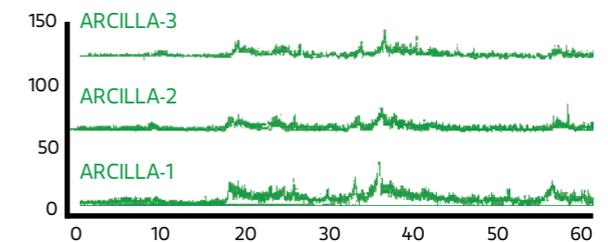


FIGURA 65. Derivatogramas mostrando los picos principales de la *sepiolita* y fases subordinadas en las muestras estudiadas (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

Se determinaron otras variedades mineralógicas, como *mica biotita* ( $d\text{\AA} = 1.6959$ ), *plagioclasa e illita* ( $d\text{\AA} = 2.5440$ ), *moscovita* ( $d\text{\AA} = 4.4503$  y  $2.5440$ ) y *calcita* ( $d\text{\AA} = 3.6666$ ).

En la muestra *Arcilla-3* la *sepiolita* forma un pico de máxima intensidad relativa (100%) en el tramo de sensibilidad de las *arcillas*, donde el ángulo  $2\theta = 11.635$  y el  $d\text{\AA} = 7.5996$ . El valor del espaciamento interplanar indica que es una *arcilla* hidratada en condiciones naturales (figura 65).

Las fases secundarias están representadas por picos débiles de *hematita* ( $d\text{\AA} = 3.6643$  y  $2.5479$ ,  $2\theta = 33.195$  y  $24.270$  e  $I/\text{M}\acute{a}x = 60.24\%$  y  $48.39\%$ , respectivamente) y *caolinita* como trazas.

Otras fases detectadas con el análisis son la *plagioclasa* ( $d\text{\AA} = 2.5479 - 1.7188$ ), la *brucita-gibbsita* y la *caolinita*.

La *plagioclasa* presenta fuertes rasgos de *albitización* ( $Ab = 70\% - An = 30\%$ ), indicando un posible efecto de alteración singenética por efecto hidrotermal. Este mismo proceso pudo haber provocado la formación de la *caolinita* a partir de los *feldespatos*.

### Microscopía electrónica de barrido

Los estudios de caracterización mediante el empleo del microscopio electrónico de barrido determinaron las características morfológicas de los constituyentes minerales de las muestras seleccionadas.

Con los resultados obtenidos se detecta la presencia mayoritaria de *sepiolita* de color blanco a gris claro, con típicos hábitos alargados y aciculares, entremezclados entre sí, que forman retículos, fibras y canales. Sin embargo, las observaciones de detalle establecen otras tendencias de estos minerales, como la formación de masas compactas, con texturas irregulares y muy porosas.

En la figura 66 *a* se aprecia *sepiolita* fibrosa de gran longitud, de hábito acicular. En 66 *b* y 66 *c*, con mayor aumento, se observa un desarrollo masivo de *sepiolita* que en ocasiones forma masas porosas compactas.

La figura 67 *a*, *b* y *c* muestra con claridad el desarrollo de individuos de *sepiolita* en forma de masas irregulares compactas y fibrosas.

En la figura 68 *a*, *b* y *c* se observa nuevamente la tendencia de la *sepiolita* a formar cúmulos compactos, fibrosos e irregulares.

**El diámetro de las partículas, como regla general, influye drásticamente en la velocidad e intensidad de las reacciones hidráulicas.**

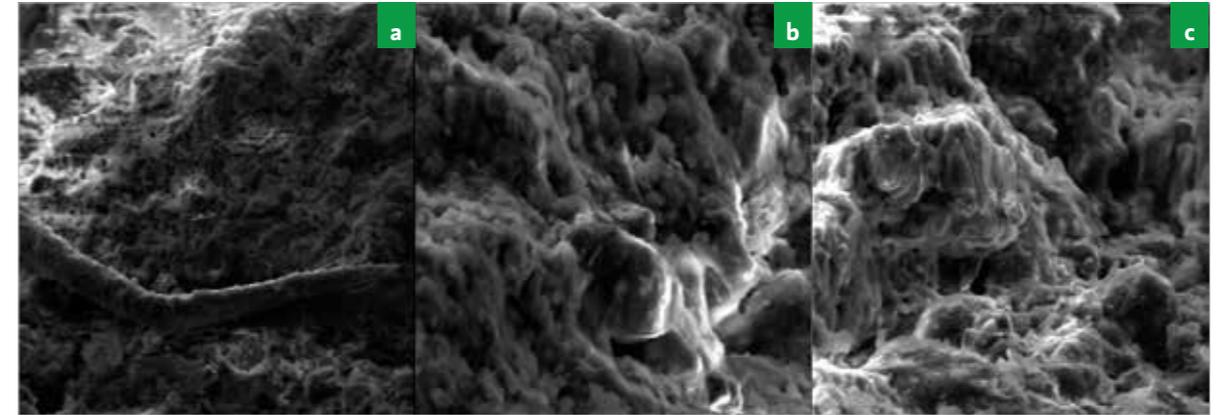


FIGURA 66 (*a*, *b* y *c*). Microfotografías de la muestra Arcilla - 1. En *a*, la muestra se examinó con aumento de  $800\times - 75\ \mu\text{m}$ , en *b*: con  $2.000\times - 10\ \mu\text{m}$  y en *c* con  $1.500\times - 40\ \mu\text{m}$  (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

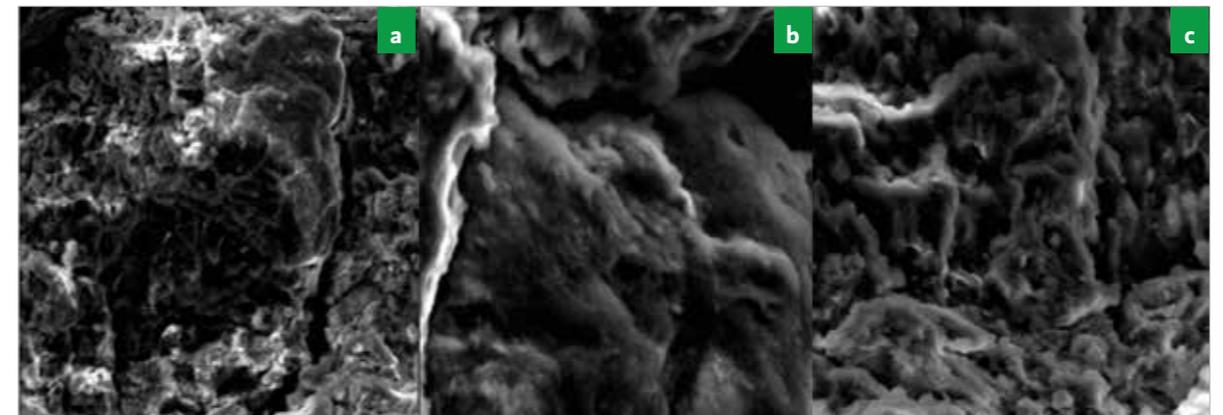


FIGURA 67 (*a*, *b* y *c*). Microfotografías de la muestra Arcilla - 2 con aumentos en *a*, *b* y *c* de  $1.000\times - 60\ \mu\text{m}$ ;  $2.900\times - 20,7\ \mu\text{m}$  y  $2.000\times - 30\ \mu\text{m}$ , respectivamente (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

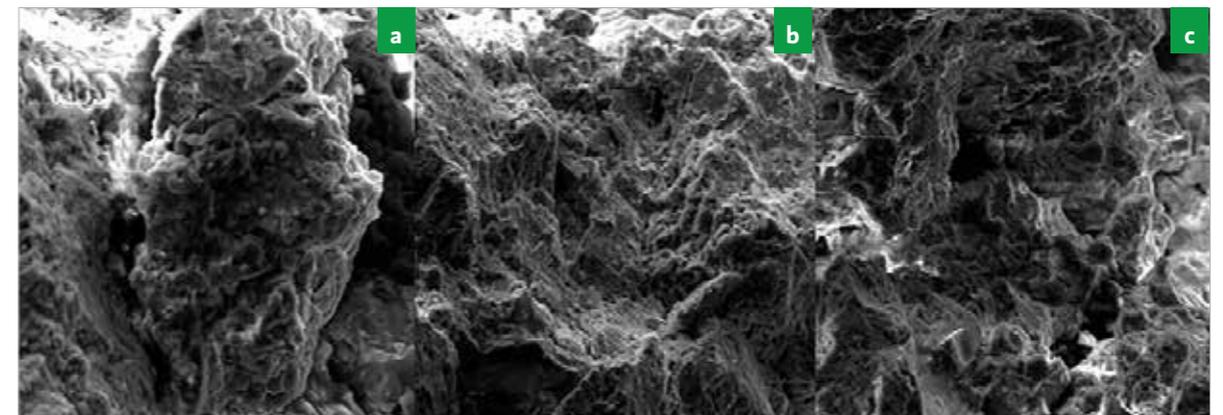


FIGURA 68 (*a*, *b* y *c*). Microfotografías de la muestra Arcilla - 3 con aumentos en *a*:  $1.000\times - 60\ \mu\text{m}$ ; en *b*:  $600\times - 100\ \mu\text{m}$  y en *c*:  $700\times - 36\ \mu\text{m}$  (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

## Análisis químicos

Los resultados de los análisis químicos demuestran que la composición de las muestras *Arcilla-1*, *Arcilla-2* y *Arcilla-3* es muy parecida. La comparación entre los porcentajes de la  $SiO_2$  total y la  $SiO_2$  reactiva, indica que tan sólo una pequeña cantidad de dióxido de silicio (*Arcilla-1*: 0,84%; *Arcilla-2*: 0,89% y *Arcilla-3*: 0,98%) se comporta como *residuo insoluble*, por lo que prácticamente toda la sílice es reactiva, factor que les aporta propiedades puzolánicas adecuadas (tabla 8). Al mismo tiempo, el contenido en  $SiO_2$  reactiva supera el 25% en las tres muestras, según las prescripciones de la norma UNE-EN 196-2:2006.

La relación  $SiO_2 / (CaO + MgO)$  ofrece valores del orden del 28,7% (*Arcilla-1*), 27,14% (*Arcilla-2*) y 29,84% (*Arcilla-3*), situación que demuestra que las arcillas estudiadas son aptas para ser incorporadas al clínker de los cementos puzolánicos. La norma UNE-EN 196-2:2006, que rige los parámetros a tener en cuenta a la hora de evaluar los materiales puzolánicos para su empleo conjunto en el clínker, indica un valor mínimo obligatorio del 3,5%, en relación a la masa total de la muestra que se analiza.

Los contenidos en  $CaO$  total respecto a la  $CaO$  reactiva señalan que las proporciones de  $CaO$  no reactiva (*Arcilla-1*: 0,09%, *Arcilla-2*: 0,1% y *Arcilla-3*: 0,11%) son insignificantes. Por su parte, los apreciables contenidos en  $Al_2O_3$  consignan las cualidades reactivas de estas arcillas en las mezclas con cementos.

## Contenido en materia orgánica

Los resultados de este análisis se interpretan por comparación visual directa entre una disolución patrón de color marrón típico y una mezcla compuesta por hidróxido de sodio y muestra natural, como indica la figura 69. Según esta figura la muestra analizada no toma, en ningún caso, coloraciones intensas y se mantiene relativamente limpia, sin llegar a la tonalidad translúcida, caracterizándole cierta transparencia visible; este hecho en sí establece que la muestra está desprovista de humus y otras materias orgánicas en general, elementos sumamente concluyentes para considerar positivos los correspondientes resultados.

**Algunas dosificaciones necesitan una cantidad adicional de agua, motivado por la alta capacidad de absorción de las muestras ensayadas.**



FIGURA 69. Comparación de visuales entre una muestra de arcilla sepiolítica sumergida en hidróxido de sodio al 3% de concentración y una disolución patrón (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

TABLA 8: Determinación de la composición química de las muestras *Arcilla-1*, *Arcilla-2* y *Arcilla-3* (UNE-EN 196-2:2006) (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS	MUESTRAS		
	Arcilla - 1 (%)	Arcilla - 2 (%)	Arcilla - 3 (%)
$SiO_2$ TOTAL	27,55	28,30	27,73
MgO	0,72	0,81	0,69
CaO TOTAL	0,33	0,30	0,35
CaO LIBRE	-	-	-
$Fe_2O_3$	27,44	28,22	27,37
$Al_2O_3$	22,59	22,33	22,22
$SiO_2$ REACTIVA	26,71	27,41	27,75
CaO REACTIVA	0,24	0,20	0,24
R.I.	4,13	4,05	4,13
$SiO_2 / (CaO + MgO)$	28,7	27,14	29,84

**TABLA 9:** Resultados de los ensayos de puzolanidad de la muestra Arcilla-1, para un período de 7 días (UNE-EN 196-5:2006) (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

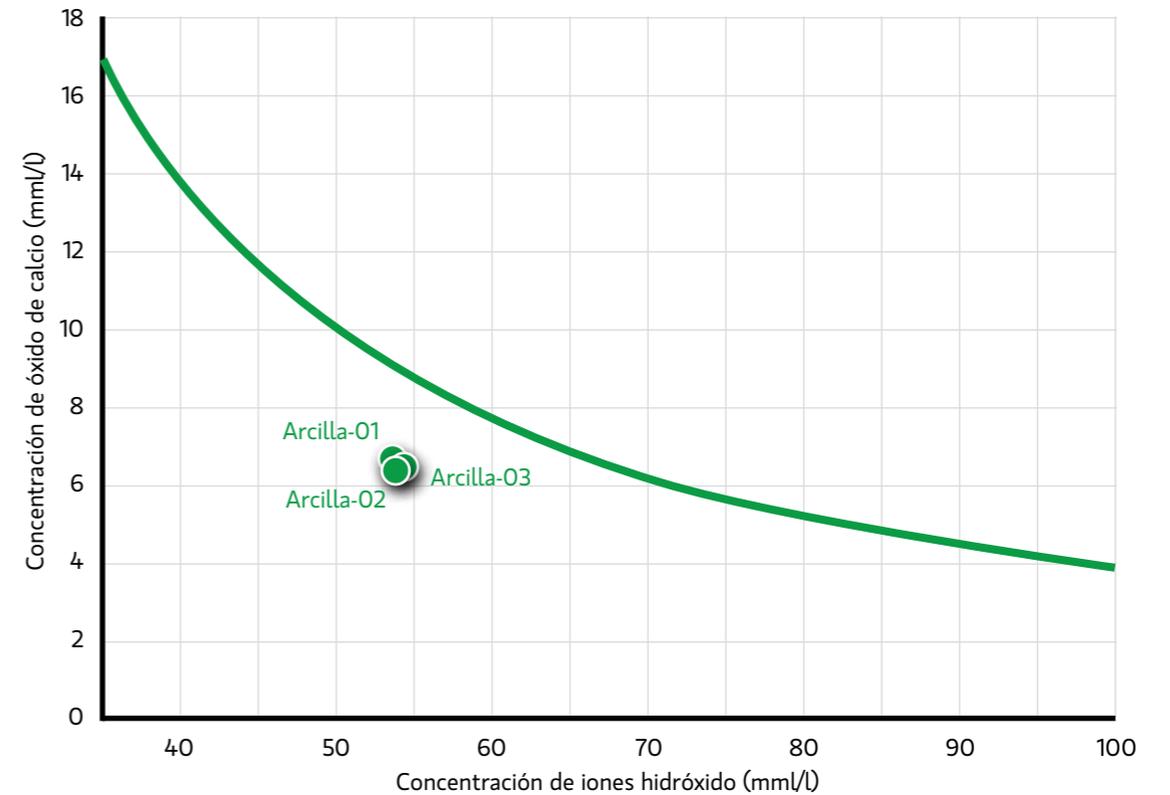
MUESTRA: ARCILLA-1			
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l
1	1,023	26,10	53,4
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,030 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l
1	0,985	10,69	6,3
RESULTADOS			
DÍAS	7	PUZOLÁNICO	SÍ

**TABLA 10:** Resultados de los ensayos de puzolanidad de la muestra Arcilla-2, para un período de 7 días (UNE-EN 196-5:2006) (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

MUESTRA: ARCILLA-2			
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l
1	1,023	26,14	54,0
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,030 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l
1	0,985	11,7	6,2
RESULTADOS			
DÍAS	7	PUZOLÁNICO	SÍ

**TABLA 11:** Resultados de los ensayos de puzolanidad de la muestra Arcilla-3, para un período de 7 días (UNE-EN 196-5:2006) (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

MUESTRA: ARCILLA-3			
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l
1	1,023	26,14	54,0
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,030 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l
1	0,985	11,7	6,2
RESULTADOS			
DÍAS	7	PUZOLÁNICO	SÍ



**FIGURA 70.** Representación gráfica de los resultados de los análisis químicos de puzolanidad de las muestras Arcilla – 1, Arcilla – 2 y Arcilla – 3, para un período de 7 días (UNE-EN 196-5:2006) (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

### Análisis químico de puzolanidad

Las muestras de arcillas sepiolíticas (Arcilla-1, Arcilla-2 y Arcilla-3) manifiestan un carácter puzolánico importante (tablas 9, 10 y 11, y figura 70). En la composición química de estas muestras hay un porcentaje apreciable de sílice reactiva (26,71 - 27,41%) y de alúmina (22,22 - 22,59%), compuestos que aceleran los procesos de reactividad hidráulica frente al  $Ca(OH)_2$  en mezclas altamente alcalinas.

El proceso de reacción puzolánica en la interfase sólido-líquido se verifica en varias etapas, tales como: difusión de los iones  $Ca^{2+}$  en la disolución hasta la superficie de las partículas de puzolanas, adsorción de los

iones  $Ca^{2+}$  en la superficie de estas partículas, difusión de los iones  $Ca^{2+}$  a través de las capas concéntricas del producto de reacción, conocido en este caso como tobermorita, y la interacción química entre los iones de  $Ca^{2+}$  y la muestra de puzolana, siendo la reactividad puzolánica una sucesión de etapas de tipo cinético-difusivo (Rabilero, A. 1988; Costafreda, J.L., 2008).

Al observar el diagrama de la figura 70 se hace evidente que las tres muestras poseen aproximadamente el mismo grado de reactividad puzolánica, ocupando una posición profunda en el área ubicada bajo la curva de la isoterma de solubilidad del hidróxido



FIGURA 71. Las condiciones de yacencia de las arcillas sepiolíticas pueden ser un indicativo de que al parecer las sepiolitas no fueron originadas por las emisiones del volcán Basilé, sino por la actividad de pequeños volcanes adventicios ubicados muy cerca de la línea de costa; en estas condiciones, se originaron volúmenes significativos de productos piroclásticos finos de cineritas, cenizas y lapilli, precursores de la sepiolita (Fotografía: J.L. Costafreda, 2012).

de calcio, con valores de consumo de iones hidroxilo de 53,4 a 54,0 mmol/l, y de fijación de óxido de calcio de 6,2 a 6,3 mmol/l.

En la tabla 8 se destacan los altos valores en  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que presentan las tres muestras de arcillas sepiolíticas, condición indispensable para que la reacción con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sea activa durante ese período de tiempo, dado que son compuestos ácidos, principalmente la alúmina, en contacto directo con un medio de alta alcalinidad (Costafreda, J.L., 2008). Según Calleja, J. (2002), el mecanismo de reacción puzolánica consiste en una difusión, posiblemente muy lenta, de los iones de  $\text{Ca}^{2+}$  a través de la capa del producto de reacción, es decir, de la tobermorita formada alrededor de las partículas de puzolana; esta reacción heterogénea entre la puzolana y el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  podría clasificarse como del tipo sólido-solución, en la cual el hidróxido de calcio reacciona con la puzolana en la interfase entre el reactivo (la puzolana) y el producto de reacción (tobermorita y otras fases), e inicialmente en la interfase sólido-disolución.

A lo largo de 7 días de reacción, las muestras de arcillas sepiolíticas exhiben propiedades puzolánicas intensas, distinguiéndose por su tendencia a formar una población de resultados de igual categoría. Este orden de descripción está dado por la ordenación de los valores que indican el consumo de iones hidroxilo, detectados en cada una de las muestras (figura 70).

Dada la posición que ocupan las muestras en la figura 70 se llega a la conclusión de que todas son puzolánicas, de gran reactividad frente al  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , considerándose positivos los resultados a los 7 días.

El carácter puzolánico de las muestras analizadas se refleja, como podrá comprobarse en un epígrafe posterior, en las propiedades mecánicas de los morteros preparados a base de estos materiales. Esta particularidad convierte a las arcillas sepiolíticas de la Isla de Bioko en materiales puzolánicos idóneos para la fabricación de cementos puzolánicos.

El carácter reactivo de estos materiales aumenta en la medida en que lo hace el grado de finura ( $< 63 \mu$ ), dado que el diámetro de las partículas, como regla general, influye drásticamente en la velocidad de la reacción (Costafreda, J.L., 2011). De cara a los procesos industriales, estos materiales podrían molerse hasta granulometrías cercanas a las que posee el clínker pórtland, para lograr fraguados óptimos y altas resistencias mecánicas en períodos relativamente cortos.

La acción de las arcillas sepiolíticas como puzolanas queda demostrada gracias a los experimentos descritos en este apartado, mediante una disminución sensible del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y de la cal libre en disolución a medida que transcurre el tiempo. Este hecho concede gran importancia industrial a estos extensos yacimientos, ya que se convierten en fuente de autoabastecimiento de materiales de calidad para las industrias cerámicas y cementeras ecuatoguineanas.

## Variabilidad granulométrica

Los resultados del ensayo de granulometría determinan que los mayores porcentajes de fracciones retenidas se ubican en los husos granulométricos 0,50, 0,16 y 0,80 mm, para las tres muestras de arcillas sepiolíticas analizadas. Sin embargo, la mayoría de las partículas se concentra en el tamiz de 0,16 mm, lo que demuestra la fina granulometría que caracteriza a estas arcillas (tablas 12 a, b y c, 13 a, b y c y figura 73 a, b y c).

Las fracciones más gruesas se localizan en el tamiz de 2,00 mm (Arcilla-2), donde se retiene cerca del 8,41% de las partículas. Las muestras Arcilla-1 y Arcilla-3 no contienen fracciones gruesas, con la excepción de un 0,17% (Arcilla-3) retenido en el tamiz de 1,0 mm.

Si se toman en consideración las coordenadas de los puntos de muestreos (tabla 2), se comprueba que la muestra con granulometría más gruesa (Arcilla-2) es, precisamente, la que se encuentra en una posición distal respecto al volcán Basilé, seguida por Arcilla-3; la muestra Arcilla-1 es la más proximal al piamonte, sin embargo, es la más fina.

El análisis geomorfológico del terreno donde se llevó a cabo la campaña de muestreos de esta investigación (figura 71), indica que, al parecer, los productos originales no se formaron por las emisiones del volcán Basilé, sino por pequeños estratovolcanes ubicados cerca de la línea de costa, cuyas erupciones arrojaron productos piroclásticos finos en forma de cineritas, cenizas y lapilli que posteriormente se alteraron a sepiolita.

**TABLA 12 (a, b y c):** Variación de los porcentajes de material retenido y pasante en relación con la abertura de los tamices y la masa original de las muestras Arcilla- 1, Arcilla- 2 y Arcilla- 3.

TABLA 12 a – ARCILLA-1				
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO		PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN
	Ri (g)		[Ri / M1 x 100] (%)	[100 - S(Ri / M1 x 100)] (%)
90	R <sub>1</sub>	0	0,00	100,00
63	R <sub>2</sub>	0	0,00	100,00
50	R <sub>3</sub>	0	0,00	100,00
40	R <sub>4</sub>	0	0,00	100,00
32	R <sub>5</sub>	0	0,00	100,00
25	R <sub>6</sub>	0	0,00	100,00
20	R <sub>7</sub>	0	0,00	100,00
16	R <sub>8</sub>	0	0,00	100,00
14	R <sub>9</sub>	0	0,00	100,00
12,5	R <sub>10</sub>	0	0,00	100,00
10,0	R <sub>11</sub>	0	0,00	100,00
8,0	R <sub>12</sub>	0	0,00	100,00
6,3	R <sub>13</sub>	0	0,00	100,00
5,0	R <sub>14</sub>	0	0,00	100,00
4,0	R <sub>15</sub>	0	0,00	100,00
3,2	R <sub>16</sub>	0	0,00	100,00
2,5	R <sub>17</sub>	0	0,00	100,00
2,0	R <sub>18</sub>	0	0,00	100,00

TABLA 12 a – ARCILLA-1				
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO		PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN
	Ri (g)		[Ri / M1 x 100] (%)	[100 - S(Ri / M1 x 100)] (%)
1,6	R <sub>19</sub>	0	0,00	100,00
1,25	R <sub>20</sub>	0	0,00	100,00
1,00	R <sub>21</sub>	0	0,00	100,00
0,80	R <sub>22</sub>	0	0,00	100,00
0,63	R <sub>23</sub>	0	0,00	100,00
0,50	R <sub>24</sub>	28,9	15,54	84,46
0,40	R <sub>25</sub>			
0,32	R <sub>26</sub>			
0,25	R <sub>27</sub>			
0,20	R <sub>28</sub>			
0,16	R <sub>29</sub>	67,1	36,08	48,39
0,125	R <sub>30</sub>			
0,100	R <sub>31</sub>			
0,080	R <sub>32</sub>	66,4	35,70	12,69
0,063	R <sub>33</sub>			
MATERIAL TAMIZADO QUE QUEDA EN LA BANDEJA DEL FONDO		P (g)		21
PORCENTAJE DE FINOS QUE PASA POR EL TAMIZ DE 0,063 mm		$[(M_1 - M_2) + P] / M_1 \times 100$		11,29
VALIDACIÓN DEL ENSAYO	SRi + P	183,40	$\frac{M_2 - (SRi + P)}{M_2} \times 100$	1,3978
				<1%

TABLA 12 b – ARCILLA-2				
MASA SECA TOTAL		M <sub>1</sub>	(g)	378
MASA SECA TRAS LAVADO (Si aplica)		M <sub>2</sub>	(g)	378
MASA SECA DE LOS FINOS ELIMINADOS MEDIANTE LAVADO		M <sub>1</sub> - M <sub>2</sub>	(g)	0
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN	
	R <sub>i</sub> (g)	[R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100] (%)	[100 - S(R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100)] (%)	
90	R <sub>1</sub>	0	0,00	100,00
63	R <sub>2</sub>	0	0,00	100,00
50	R <sub>3</sub>	0	0,00	100,00
40	R <sub>4</sub>	0	0,00	100,00
32	R <sub>5</sub>	0	0,00	100,00
25	R <sub>6</sub>	0	0,00	100,00
20	R <sub>7</sub>	0	0,00	100,00
16	R <sub>8</sub>	0	0,00	100,00
14	R <sub>9</sub>	0	0,00	100,00
12,5	R <sub>10</sub>	0	0,00	100,00
10,0	R <sub>11</sub>	0	0,00	100,00
8,0	R <sub>12</sub>	0	0,00	100,00
6,3	R <sub>13</sub>	0	0,00	100,00
5,0	R <sub>14</sub>	0	0,00	100,00
4,0	R <sub>15</sub>	0	0,00	100,00
3,2	R <sub>16</sub>	0	0,00	100,00
2,5	R <sub>17</sub>	0	0,00	100,00
2,0	R <sub>18</sub>	31,8	0,00	91,59

TABLA 12 b – ARCILLA-2				
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN	
	R <sub>i</sub> (g)	[R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100] (%)	[100 - S(R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100)] (%)	
1,6	R <sub>19</sub>	10,5	2,78	88,81
1,25	R <sub>20</sub>			
1,00	R <sub>21</sub>	39,1	10,34	78,47
0,80	R <sub>22</sub>			
0,63	R <sub>23</sub>			
0,50	R <sub>24</sub>	83,5	22,09	56,38
0,40	R <sub>25</sub>			
0,32	R <sub>26</sub>			
0,25	R <sub>27</sub>			
0,20	R <sub>28</sub>			
0,16	R <sub>29</sub>	112	29,63	26,75
0,125	R <sub>30</sub>			
0,100	R <sub>31</sub>			
0,080	R <sub>32</sub>	56	14,81	11,93
0,063	R <sub>33</sub>			
MATERIAL TAMIZADO QUE QUEDA EN LA BANDEJA DEL FONDO		P (g)	44,3	
PORCENTAJE DE FINOS QUE PASA POR EL TAMIZ DE 0,063 mm		[(M <sub>1</sub> - M <sub>2</sub> ) + P] / M <sub>1</sub> x 100		11,72
VALIDACIÓN DEL ENSAYO	SR <sub>i</sub> + P	377,20	$\frac{M_2 - (SR_i + P)}{M_2} \times 100$	0,2116
				<1%

TABLA 12 c – ARCILLA-3				
MASA SECA TOTAL		M <sub>1</sub>	(g)	407
MASA SECA TRAS LAVADO (Si aplica)		M <sub>2</sub>	(g)	407
MASA SECA DE LOS FINOS ELIMINADOS MEDIANTE LAVADO		M <sub>1</sub> - M <sub>2</sub>	(g)	0
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO		PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN
	R <sub>i</sub> (g)	[R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100] (%)		[100 - S(R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100)] (%)
90	R <sub>1</sub>	0	0,00	100,00
63	R <sub>2</sub>	0	0,00	100,00
50	R <sub>3</sub>	0	0,00	100,00
40	R <sub>4</sub>	0	0,00	100,00
32	R <sub>5</sub>	0	0,00	100,00
25	R <sub>6</sub>	0	0,00	100,00
20	R <sub>7</sub>	0	0,00	100,00
16	R <sub>8</sub>	0	0,00	100,00
14	R <sub>9</sub>	0	0,00	100,00
12,5	R <sub>10</sub>	0	0,00	100,00
10,0	R <sub>11</sub>	0	0,00	100,00
8,0	R <sub>12</sub>	0	0,00	100,00
6,3	R <sub>13</sub>	0	0,00	100,00
5,0	R <sub>14</sub>	0	0,00	100,00
4,0	R <sub>15</sub>	0	0,00	100,00
3,2	R <sub>16</sub>	0	0,00	100,00
2,5	R <sub>17</sub>	0	0,00	100,00
2,0	R <sub>18</sub>	0	0,00	100,00

TABLA 12 c – ARCILLA-3				
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO		PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN
	R <sub>i</sub> (g)		[R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100] (%)	[100 - S(R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100)] (%)
1,6	R <sub>19</sub>	0	0,00	100,00
1,25	R <sub>20</sub>	0	0,00	100,00
1,00	R <sub>21</sub>	0,7	0,17	99,83
0,80	R <sub>22</sub>			
0,63	R <sub>23</sub>			
0,50	R <sub>24</sub>	99,4	24,42	75,41
0,40	R <sub>25</sub>			
0,32	R <sub>26</sub>			
0,25	R <sub>27</sub>			
0,20	R <sub>28</sub>			
0,16	R <sub>29</sub>	169	41,52	33,88
0,125	R <sub>30</sub>			
0,100	R <sub>31</sub>			
0,080	R <sub>32</sub>	94,1	23,12	10,76
0,063	R <sub>33</sub>			
MATERIAL TAMIZADO QUE QUEDA EN LA BANDEJA DEL FONDO		P (g)		44
PORCENTAJE DE FINOS QUE PASA POR EL TAMIZ DE 0,063 mm		[(M <sub>1</sub> - M <sub>2</sub> ) + P] / M <sub>1</sub> x 100		10,81
VALIDACIÓN DEL ENSAYO	SR <sub>i</sub> + P	407,20	$\frac{M_2 - (SR_i + P)}{M_2} \times 100$	0,0491
				<1%

**TABLA 13 (a, b y c):** Resultados del ensayo *granulométrico* mediante vía seca realizado sobre las muestras Arcilla- 1, Arcilla- 2 y Arcilla- 3.

<b>TABLA 13 a – ARCILLA-1</b>		
GRANULOMETRÍA DE PARTÍCULAS: MÉTODO DEL TAMIZADO (UNE-EN 933-1:1998 Y A1:2006)		
MÉTODO DE ANÁLISIS: LAVADO Y TAMIZADO	TAMIZADO VIA SECA	X
CONTENIDO EN FINOS (%)	11,29	
TABLA DE RESULTADOS		
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	PASO ACUMULADO (%)	
90,00	100,00	
63,00	100,00	
50,00	100,00	
40,00	100,00	
32,00	100,00	
25,00	100,00	
20,00	100,00	
16,00	100,00	
14,00	100,00	
12,50	100,00	
10,00	100,00	
8,00	100,00	
6,30	100,00	
5,00	100,00	
4,00	100,00	
3,20	100,00	
2,50	100,00	
2,00	100,00	
1,60	100,00	
1,25	100,00	
1,00	100,00	
0,800	100,00	
0,630	100,00	
0,500	84,46	
0,400	-	
0,320	-	
0,250	-	
0,200	-	
0,160	48,39	
0,125	-	
0,100	-	
0,080	12,69	
0,063	-	

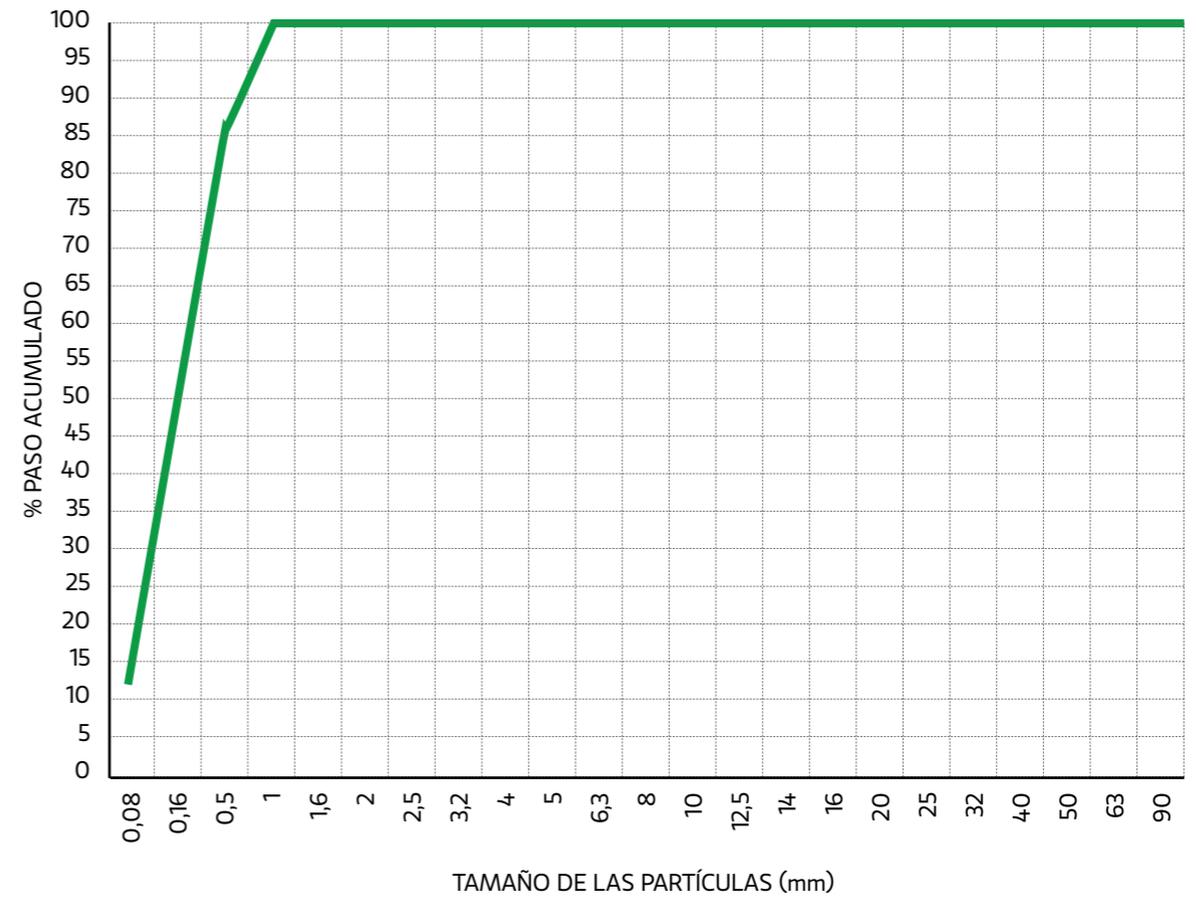
<b>TABLA 13 b – ARCILLA-2</b>		
GRANULOMETRÍA DE PARTÍCULAS: MÉTODO DEL TAMIZADO (UNE-EN 933-1:1998 Y A1:2006)		
MÉTODO DE ANÁLISIS: LAVADO Y TAMIZADO	TAMIZADO VIA SECA	X
CONTENIDO EN FINOS (%)	11,72	
TABLA DE RESULTADOS		
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	PASO ACUMULADO (%)	
90,00	100,00	
63,00	100,00	
50,00	100,00	
40,00	100,00	
32,00	100,00	
25,00	100,00	
20,00	100,00	
16,00	100,00	
14,00	100,00	
12,50	100,00	
10,00	100,00	
8,00	100,00	
6,30	100,00	
5,00	100,00	
4,00	100,00	
3,20	100,00	
2,50	100,00	
2,00	91,59	
1,60	88,81	
1,25	-	
1,00	78,47	
0,800	-	
0,630	-	
0,500	56,38	
0,400	-	
0,320	-	
0,250	-	
0,200	-	
0,160	26,75	
0,125	-	
0,100	-	
0,080	11,93	
0,063	-	

TABLA 13 c – ARCILLA-3		
GRANULOMETRÍA DE PARTÍCULAS: MÉTODO DEL TAMIZADO (UNE-EN 933-1:1998 Y A1:2006)		
MÉTODO DE ANÁLISIS: LAVADO Y TAMIZADO	TAMIZADO VIA SECA	X
CONTENIDO EN FINOS (%)	10,81	
TABLA DE RESULTADOS		
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	PASO ACUMULADO (%)	
90,00	100,00	
63,00	100,00	
50,00	100,00	
40,00	100,00	
32,00	100,00	
25,00	100,00	
20,00	100,00	
16,00	100,00	
14,00	100,00	
12,50	100,00	
10,00	100,00	
8,00	100,00	
6,30	100,00	
5,00	100,00	
4,00	100,00	
3,20	100,00	
2,50	100,00	
2,00	100,00	
1,60	100,00	
1,25	100,00	
1,00	99,83	
0,800	-	
0,630	-	
0,500	75,41	
0,400	-	
0,320	-	
0,250	-	
0,200	-	
0,160	33,88	
0,125	-	
0,100	-	
0,080	10,76	
0,063	-	

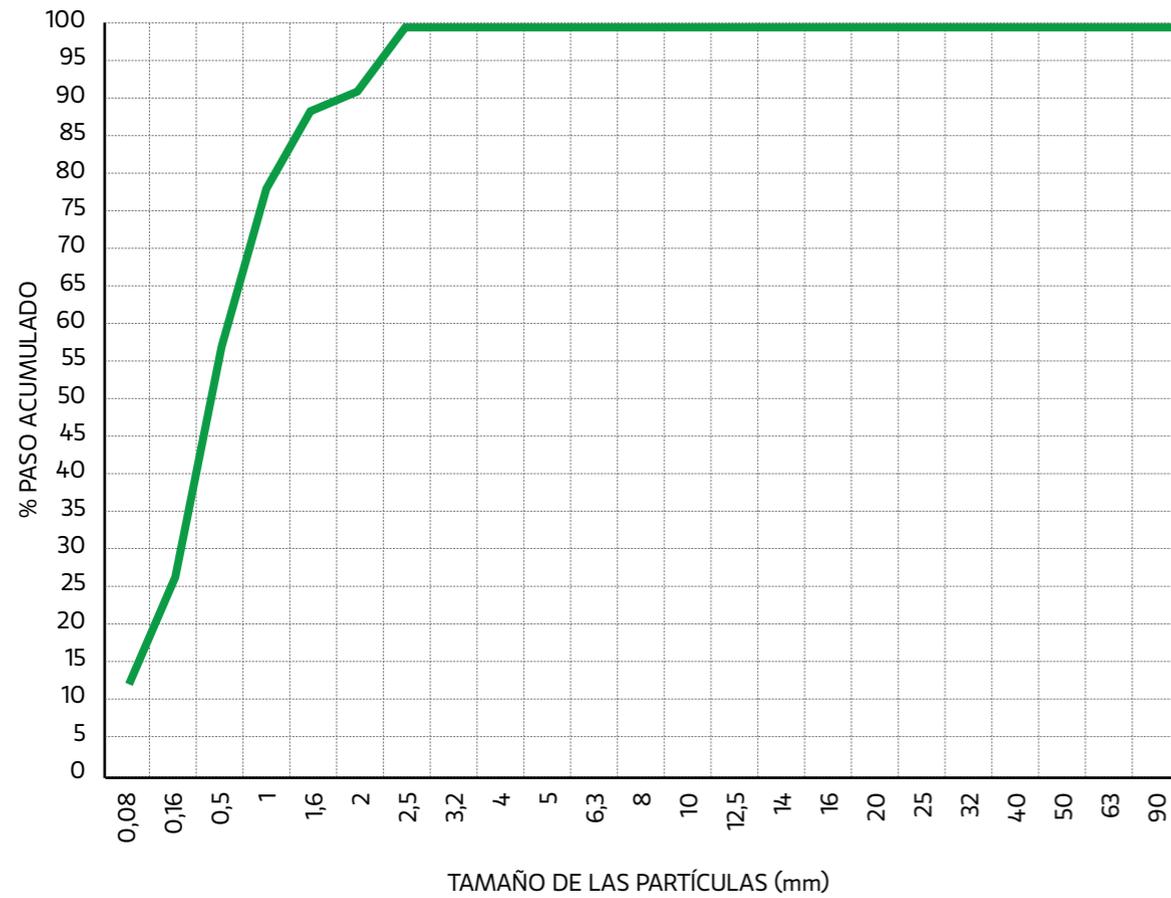
FIGURA 73 (a, b y c). Representación gráfica de la distribución granulométrica de las partículas de las muestras Arcilla-1, Arcilla-2 y Arcilla-3, obtenida mediante el método del tamizado en seco.

GRANULOMETRÍA DE PARTÍCULAS: MÉTODO DEL TAMIZADO (UNE-EN 933-1:1998 Y A1:2006)

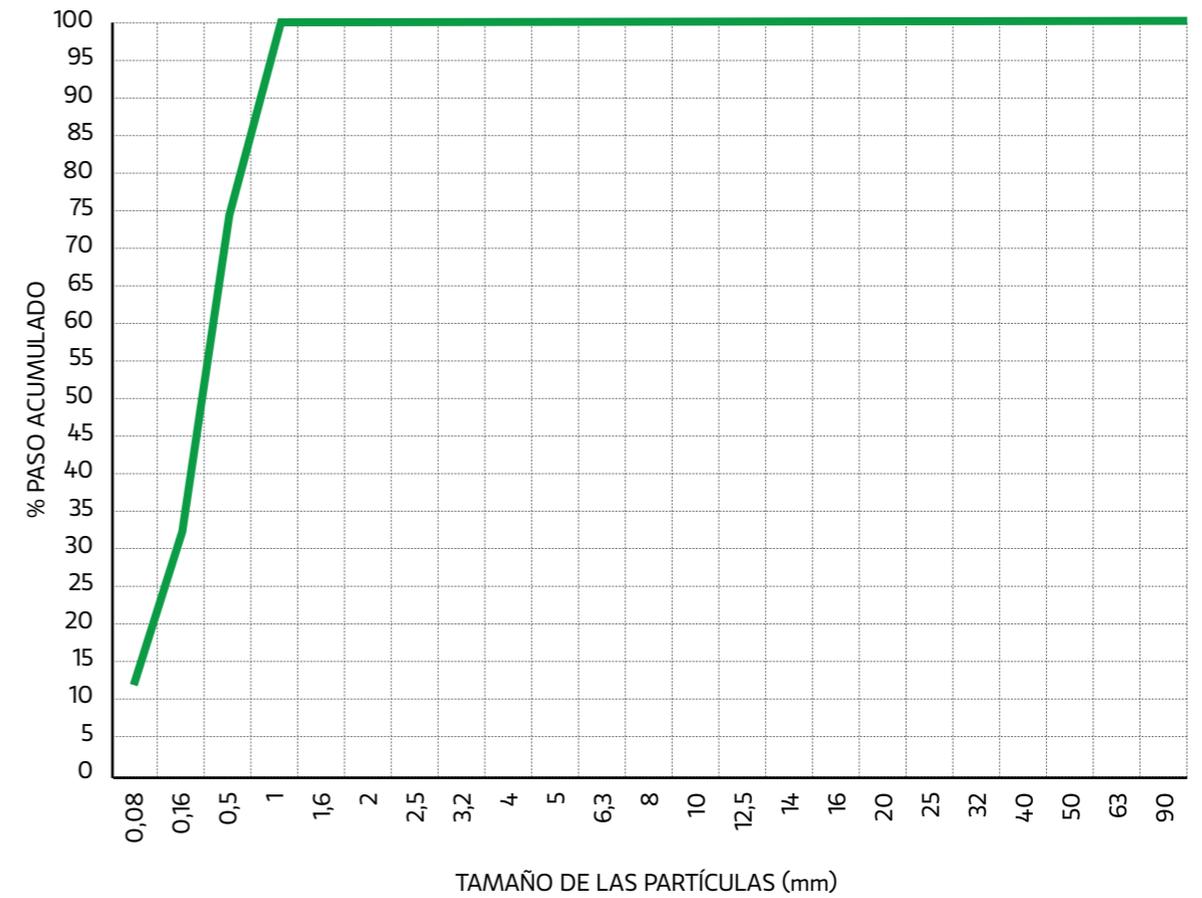
CURVA GRANULOMÉTRICA ARCILLA-1



CURVA GRANULOMÉTRICA ARCILLA-2



CURVA GRANULOMÉTRICA ARCILLA-3



El grado de finura de las partículas es de suma importancia, ya que cuanto menor es el tamaño del grano, tanto mayor es su capacidad de hidratación y la resistencia alcanzada.



**FIGURA 72.** Vista parcial de la bahía de Malabo (Guinea Ecuatorial). Al fondo se aprecia parte del borde norte-noreste de la protocaldera, constituido por materiales volcanosedimentarios muy finos, dispuestos con yacencia monoclinal muy suave hacia el norte. Prácticamente la mitad de esta caldera fue erosionada por el mar, formando una amplia ensenada en forma de herradura, abierta en dirección norte-noroeste (Fotografía: J.L. Costafreda, 2012).

**TABLA 14:** Detalles sobre la dosificación de morteros para la determinación de la consistencia (UNE-EN 1015-3).

DOSIFICACIÓN DEL MORTERO		PESO DE LA ARENA (g)	DIÁMETRO DE ESCURRIMIENTO (mm)	
1	100% Cemento pórtland + Arena normalizada + 225 g de Agua destilada <b>(MUESTRA PATRÓN)</b>	1348.6	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 180
			Diámetro 2: 180	
4	75% Cemento pórtland + 25% Arcilla-1 + Arena normalizada + 290 g de Agua destilada.	1350.4	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 180
			Diámetro 2: 180	
5	75% Cemento pórtland + 25% Arcilla-2 + Arena normalizada + 290 g de Agua destilada.	1349.6	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 180
			Diámetro 2: 180	
6	75% Cemento pórtland + 25% Arcilla-3 + Arena normalizada + 290 g de Agua destilada.	1350.4	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 180
			Diámetro 2: 180	

Los edificios volcánicos se erigieron a pocos metros por encima del nivel del mar, sobre un andamiaje de materiales inconsistentes e inestables que más tarde colapsaron, originando pequeñas calderas cuyos bordes no alcanzaron los 40 metros de altura. Los derrumbes sucesivos abrieron vías que favorecieron la irrupción del mar en el interior de las calderas; de este modo se originó la bahía de Malabo (figura 72).

De acuerdo con los razonamientos expuestos, la muestra Arcilla-2 podría ser de la categoría de las arcillas sepiolíticas formadas a partir de materiales piroclásticos gruesos que se depositaron cerca de los centros de emisión ubicados en la bahía de Malabo; mientras que las muestras Arcilla-1 y Arcilla-3, respectivamente, pudieron originarse a partir de la alteración de productos volcánicos muy finos que viajaron en suspensión, cubriendo distancias más o menos significativas.

**La cantidad de agua absorbida por los materiales puzolánicos es cedida lentamente a la pasta, conforme ésta lo demande.**

## Consistencia del mortero fresco

Una vez establecidas las poblaciones granulométricas, y elegida la fracción más adecuada ( $63\mu$ ) para la elaboración de las mezclas de morteros, se precisa un ensayo más: la *determinación de la consistencia del mortero fresco*. Este ensayo se lleva a cabo en un régimen de temperatura ambiental cercana a los  $19,9^{\circ}\text{C}$ , con humedad del 76.8% y temperatura del agua de ensayo de  $18,6^{\circ}\text{C}$ . Se emplea el método de *sacudidas*, descrito en la norma UNE-EN 1015-3.

La dosificación del mortero elaborado para este fin se detalla de forma pormenorizada en la tabla 14.

En todos los ensayos de consistencia la densidad aparente del mortero fresco supera los  $1.200\text{ Kg}/\text{m}^3$ , por lo que, según la norma UNE-EN 1015-3, el valor del escurrimiento corresponde a  $175 \pm 5\text{ mm}$ , cifra que se toma como referencia a la hora de evaluar los resultados obtenidos mediante este método.

Según los resultados de la tabla 14, los morteros elaborados con arcillas sepiolíticas poseen buena consistencia, lo que se traduce en una buena trabajabilidad.

Como puede observarse, algunas dosificaciones necesitan una cantidad adicional de agua, motivado por la alta capacidad de absorción de las muestras ensayadas.

## Resistencias mecánicas

Los más altos valores de resistencias mecánicas, según la tabla 15 y la figura 74, corresponden, en primer lugar, a la muestra *Arcilla-1* (48,5 Mpa); en segundo lugar, a la muestra *Arcilla-3* (48,2 Mpa), seguida por *Arcilla-2* (46,9 Mpa). Los resultados obtenidos están comprendidos dentro de las especificaciones de la norma UNE-EN 196-3: 2005 + A1:2009, que formula la validez de aquellos valores de resistencia normal que para un período de 28 días se ubican dentro del rango  $\geq 42,5 - \leq 62,5$  Mpa, cuando se emplea un cemento de alta resistencia inicial (42,5 R). Al mismo tiempo, se deduce un detalle interesante cuando se comparan todos los valores, incluyendo los de referencia, que consiste en que todas las probetas elaboradas con arcillas sepiolíticas superan en resistencia a la muestra patrón.

Lo expresado anteriormente confirma y establece, evidentemente, la capacidad reactiva y las propiedades cementicias de las muestras estudiadas. Los resultados que se reflejan en la tabla 15, así como los que se representan en la figura 74, son si lugar a dudas argumentos que afianzan este testimonio y permiten consignar que prácticamente la totalidad de la sílice contenida en estas arcillas es reactiva.

El factor conocido como Índice de Actividad Resistente (IAR), calculado individualmente para cada valor aportado por los ensayos mecánicos, generó valores positivos en todos los casos; por ejemplo, *Arcilla-1*: 105,20%, *Arcilla-2*: 101,73% y *Arcilla-3*: 104,55%.

**TABLA 15:** Resultados de los ensayos mecánicos a flexión y a compresión a partir de probetas elaboradas con arcillas sepiolíticas del yacimiento San Nicolás, Guinea Ecuatorial, para un período de curado de 28 días (UNE-EN 196-3: 2005 + A1:2009).

MUESTRA	RESISTENCIA A FLEXIÓN (Mpa)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Mpa)
<i>CemRef</i>	7,4	46,1
<i>Arcilla-1</i>	7,5	48,5
<i>Arcilla-2</i>	6,4	46,9
<i>Arcilla-3</i>	7,0	48,2



**FIGURA 74.** Representación gráfica de la evolución de las resistencias mecánicas a compresión de las probetas ensayadas a 28 días.

Los datos que se muestran en la tabla 16 han sido extraídos de los registros de pesaje de las probetas, veinticuatro horas tras el desmolde y veintiocho días después del curado normalizado en la cámara húmeda. Según estos resultados, las muestras *Arcilla-2* y *Arcilla-3* son menos densas y, por consiguiente, menos pesadas que la probeta patrón (*CemRef*). Entre las probetas de morteros elaborados con arcillas sepiolíticas, la muestra *Arcilla-1* es la que aporta la más alta densidad, incluso si es comparada con el mortero patrón.

La razón de este comportamiento puede encontrarse en la alta capacidad de absorción de las sepiolitas; indudablemente, la muestra *Arcilla-1*, además de manifestar esta propiedad, es también la que posee la menor granulometría (tabla 13 a y figura 73

a) y, por consiguiente, la mayor superficie específica activa que la convierte en la más reactiva. Es también la muestra que aporta las mayores resistencias mecánicas normales a 28 días (tabla 15 y figura 74), así como los máximos valores del Índice de Actividad Resistente.

De acuerdo con la experiencia, la cantidad de agua absorbida por los materiales puzolánicos se cede lentamente a la pasta, conforme la misma lo demande para completar las reacciones hidráulicas de los silicatos, esto puede implicar ciertas pérdidas de peso con el transcurso del tiempo, factor que no altera en modo alguno la coherencia del mortero (Costafreda, J.L. et al., 2011). Esta reflexión se asume en la presente obra para considerar a estas arcillas especiales como áridos ligeros.

**TABLA 16:** Registro del pesaje de las probetas de morteros para los periodos de 24 horas y 28 días de curado.

		MUESTRAS			
		CemRef	Arcilla-1	Arcilla-2	Arcilla-3
PESO DE LAS PROBETAS (g)	A 24 horas de curado	588,8	601,9	573,9	580,2
		591,2	601,9	572,4	579,4
		591,8	601,6	575,9	579,5
		Media	Media	Media	Media
		590,6	601,8	574,06	579,7
	A 28 días de curado	596,5	609,1	580,0	586,4
		596,1	608,9	578,6	586,3
		593,8	608,4	582,0	585,9
		Media	Media	Media	Media
		595,5	608,8	580,2	586,2



Catedral de Malabo



Arbol de la Papaya

## YACIMIENTO DE ARENAS SILÍCEAS EL CACAHUAL

### Variabilidad granulométrica

Los ensayos permiten distinguir la presencia de varias poblaciones *granulométricas* en las muestras de *arenas silíceas* analizadas, lo que se interpreta como un conjunto de amplia variabilidad en lo que al diámetro de las partículas se refiere. Los mayores y más frecuentes porcentajes de material retenido se registran en las aberturas 0,50 mm y 0,16 mm (tabla 17 a, b y c).

Un detalle a tener en cuenta es el mayor diámetro que acusan las partículas de *arenas* de la muestra *Cacahual-3* (tabla 17 b), seguida muy de cerca por la muestra *Cacahual-4* y confirmado por los porcentajes de retención que experimentan en los tamices 2,0, 1,6 y 1,0 mm, en relación con la muestra *Cacahual-2*. Efectivamente, las dos muestras mencionadas exhiben granos morfológicamente mayores que *Cacahual-2* en las microfotografías obtenidas con el microscopio electrónico (figuras 77, 78 y 79).

Se deduce, por tanto, que la muestra *Cacahual-3* representa la parte menos friable del yacimiento *El Cacahual*, y constituye el posible casquete apical de un supuesto protolito subyacente en proceso de alteración y disgregación.

La muestra *Cacahual-4* corresponde, posiblemente, a un estadio intermedio de alteración y disgregación mecánica entre *Cacahual-3* y *Cacahual-2*. La gran similitud que se aprecia en las curvas *granulométricas* determinadas para las muestras *Cacahual-2* y *Cacahual-4* (figura 75 a, b y c) consigna esta interpretación.

De forma inversa, la muestra *Cacahual-2* (tabla 17 a), con menor *granulometría*, posee el mayor porcentaje (70,39%) de partículas retenidas en los tamices de menor luz (0,16 mm); mientras que las muestras *Cacahual-4* (53,27%) y *Cacahual-3* (21,13%) se ubican en el segundo y tercer orden, respectivamente.

En las *arenas normalizadas* (UNE-EN 933-1:1998 y A1:2006) los mayores porcentajes de material retenido se producen en los tamices 1,00 y 0,50 mm, aunque aparecen retenciones más o menos significativas entre 0,250 mm y 0,125 mm (Costafreda, J.L., 2008).

**TABLA 17 (a, b y c):** Variación de los porcentajes de material retenido y pasante en relación con la abertura de los tamices y la masa original de las muestras Cacahual-2, Cacahual-3 y Cacahual-4.

TABLA 17 a – CACAHUAL-2				
MASA SECA TOTAL		M <sub>1</sub>	(g)	1164
MASA SECA TRAS LAVADO (Si aplica)		M <sub>2</sub>	(g)	1164
MASA SECA DE LOS FINOS ELIMINADOS MEDIANTE LAVADO		M <sub>1</sub> - M <sub>2</sub>	(g)	0
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN	
	R <sub>i</sub> (g)	[R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100] (%)	[100 - S(R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100)] (%)	
90	R <sub>1</sub>	0	0,00	100,00
63	R <sub>2</sub>	0	0,00	100,00
50	R <sub>3</sub>	0	0,00	100,00
40	R <sub>4</sub>	0	0,00	100,00
32	R <sub>5</sub>	0	0,00	100,00
25	R <sub>6</sub>	0	0,00	100,00
20	R <sub>7</sub>	0	0,00	100,00
16	R <sub>8</sub>	0	0,00	100,00
14	R <sub>9</sub>	0	0,00	100,00
12,5	R <sub>10</sub>	0	0,00	100,00
10,0	R <sub>11</sub>	0	0,00	100,00
8,0	R <sub>12</sub>	0	0,00	100,00
6,3	R <sub>13</sub>	0	0,00	100,00
5,0	R <sub>14</sub>	0	0,00	100,00
4,0	R <sub>15</sub>	0	0,00	100,00
3,2	R <sub>16</sub>	0	0,00	100,00
2,5	R <sub>17</sub>	0	0,00	100,00
2,0	R <sub>18</sub>	44,9	3,86	96,14

TABLA 17 a – CACAHUAL-2					
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN		
	R <sub>i</sub> (g)	[R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100] (%)	[100 - S(R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100)] (%)		
1,6	R <sub>19</sub>	13,3	1,14	95,00	
1,25	R <sub>20</sub>				
1,00	R <sub>21</sub>	60,5	5,20	89,80	
0,80	R <sub>22</sub>				
0,63	R <sub>23</sub>				
0,50	R <sub>24</sub>	135,5	11,64	78,16	
0,40	R <sub>25</sub>				
0,32	R <sub>26</sub>				
0,25	R <sub>27</sub>				
0,20	R <sub>28</sub>				
0,16	R <sub>29</sub>	819,3	70,39	7,77	
0,125	R <sub>30</sub>				
0,100	R <sub>31</sub>				
0,080	R <sub>32</sub>	49	4,21	3,57	
0,063	R <sub>33</sub>				
MATERIAL TAMIZADO QUE QUEDA EN LA BANDEJA DEL FONDO		P (g)	19,1		
PORCENTAJE DE FINOS QUE PASA POR EL TAMIZ DE 0,063 mm		[(M <sub>1</sub> - M <sub>2</sub> ) + P] / M <sub>1</sub> x 100		1,64	
VALIDACIÓN DEL ENSAYO	SR <sub>i</sub> + P	1141,60	$\frac{M_2 - (SR_i + P)}{M_2} \times 100$	1,9244	<1%

TABLA 17 b – CACAHUAL-3				
MASA SECA TOTAL		M <sub>1</sub>	(g)	1457
MASA SECA TRAS LAVADO (Si aplica)		M <sub>2</sub>	(g)	1457
MASA SECA DE LOS FINOS ELIMINADOS MEDIANTE LAVADO		M <sub>1</sub> - M <sub>2</sub>	(g)	0
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO		PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN
	R <sub>i</sub> (g)	[R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100] (%)		[100 - S(R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100)] (%)
90	R <sub>1</sub>	0	0,00	100,00
63	R <sub>2</sub>	0	0,00	100,00
50	R <sub>3</sub>	0	0,00	100,00
40	R <sub>4</sub>	0	0,00	100,00
32	R <sub>5</sub>	0	0,00	100,00
25	R <sub>6</sub>	0	0,00	100,00
20	R <sub>7</sub>	0	0,00	100,00
16	R <sub>8</sub>	0	0,00	100,00
14	R <sub>9</sub>	0	0,00	100,00
12,5	R <sub>10</sub>	0	0,00	100,00
10,0	R <sub>11</sub>	0	0,00	100,00
8,0	R <sub>12</sub>	0	0,00	100,00
6,3	R <sub>13</sub>	0	0,00	100,00
5,0	R <sub>14</sub>	0	0,00	100,00
4,0	R <sub>15</sub>	0	0,00	100,00
3,2	R <sub>16</sub>	0	0,00	100,00
2,5	R <sub>17</sub>	0	0,00	100,00
2,0	R <sub>18</sub>	613,5	42,11	57,89

TABLA 17 b – CACAHUAL-3				
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO		PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN
	R <sub>i</sub> (g)	[R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100] (%)		[100 - S(R <sub>i</sub> / M <sub>1</sub> x 100)] (%)
1,6	R <sub>19</sub>	74,5	5,11	52,78
1,25	R <sub>20</sub>			
1,00	R <sub>21</sub>	142,7	9,79	42,99
0,80	R <sub>22</sub>			
0,63	R <sub>23</sub>			
0,50	R <sub>24</sub>	158,8	10,90	32,09
0,40	R <sub>25</sub>			
0,32	R <sub>26</sub>			
0,25	R <sub>27</sub>			
0,20	R <sub>28</sub>			
0,16	R <sub>29</sub>	307,9	21,13	10,95
0,125	R <sub>30</sub>			
0,100	R <sub>31</sub>			
0,080	R <sub>32</sub>	106,9	7,34	3,62
0,063	R <sub>33</sub>			
MATERIAL TAMIZADO QUE QUEDA EN LA BANDEJA DEL FONDO		P (g)		32,1
PORCENTAJE DE FINOS QUE PASA POR EL TAMIZ DE 0,063 mm		[(M <sub>1</sub> - M <sub>2</sub> ) + P] / M <sub>1</sub> x 100		2,20
VALIDACIÓN DEL ENSAYO	SR <sub>i</sub> + P	1436,40	$\frac{M_2 - (SR_i + P)}{M_2} \times 100$	1,4139
				<1%

TABLA 17 c – CACAHUAL-4				
MASA SECA TOTAL		M <sub>1</sub>	(g)	1070
MASA SECA TRAS LAVADO (Si aplica)		M <sub>2</sub>	(g)	1070
MASA SECA DE LOS FINOS ELIMINADOS MEDIANTE LAVADO		M <sub>1</sub> - M <sub>2</sub>	(g)	0
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN	
	Ri (g)	[Ri / M1 x 100] (%)	[100 - S(Ri / M1 x 100)] (%)	
90	R <sub>1</sub>	0	0,00	100,00
63	R <sub>2</sub>	0	0,00	100,00
50	R <sub>3</sub>	0	0,00	100,00
40	R <sub>4</sub>	0	0,00	100,00
32	R <sub>5</sub>	0	0,00	100,00
25	R <sub>6</sub>	0	0,00	100,00
20	R <sub>7</sub>	0	0,00	100,00
16	R <sub>8</sub>	0	0,00	100,00
14	R <sub>9</sub>	0	0,00	100,00
12,5	R <sub>10</sub>	0	0,00	100,00
10,0	R <sub>11</sub>	0	0,00	100,00
8,0	R <sub>12</sub>	0	0,00	100,00
6,3	R <sub>13</sub>	0	0,00	100,00
5,0	R <sub>14</sub>	0	0,00	100,00
4,0	R <sub>15</sub>	0	0,00	100,00
3,2	R <sub>16</sub>	0	0,00	100,00
2,5	R <sub>17</sub>	0	0,00	100,00
2,0	R <sub>18</sub>	153	14,30	85,70

TABLA 17 c – CACAHUAL-4					
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN		
	Ri (g)	[Ri / M1 x 100] (%)	[100 - S(Ri / M1 x 100)] (%)		
1,6	R <sub>19</sub>	15	1,40	84,30	
1,25	R <sub>20</sub>				
1,00	R <sub>21</sub>	64,4	6,02	78,28	
0,80	R <sub>22</sub>				
0,63	R <sub>23</sub>				
0,50	R <sub>24</sub>	110,5	10,33	67,95	
0,40	R <sub>25</sub>				
0,32	R <sub>26</sub>				
0,25	R <sub>27</sub>				
0,20	R <sub>28</sub>				
0,16	R <sub>29</sub>	570	53,27	14,68	
0,125	R <sub>30</sub>				
0,100	R <sub>31</sub>				
0,080	R <sub>32</sub>	131	12,24	2,44	
0,063	R <sub>33</sub>				
MATERIAL TAMIZADO QUE QUEDA EN LA BANDEJA DEL FONDO		P (g)	12,3		
PORCENTAJE DE FINOS QUE PASA POR EL TAMIZ DE 0,063 mm		$[(M_1 - M_2) + P] / M_1 \times 100$	1,15		
VALIDACIÓN DEL ENSAYO	SRi + P	1056,20	$\frac{M_2 - (SRi + P)}{M_2} \times 100$	1,2897	<1%

**TABLA 18 (a, b y c):** Distribución granulométrica de las partículas que componen las muestras *Cacahual-2*, *Cacahual-3* y *Cacahual-4* (UNE-EN 933-1:1998 y A1:2006)

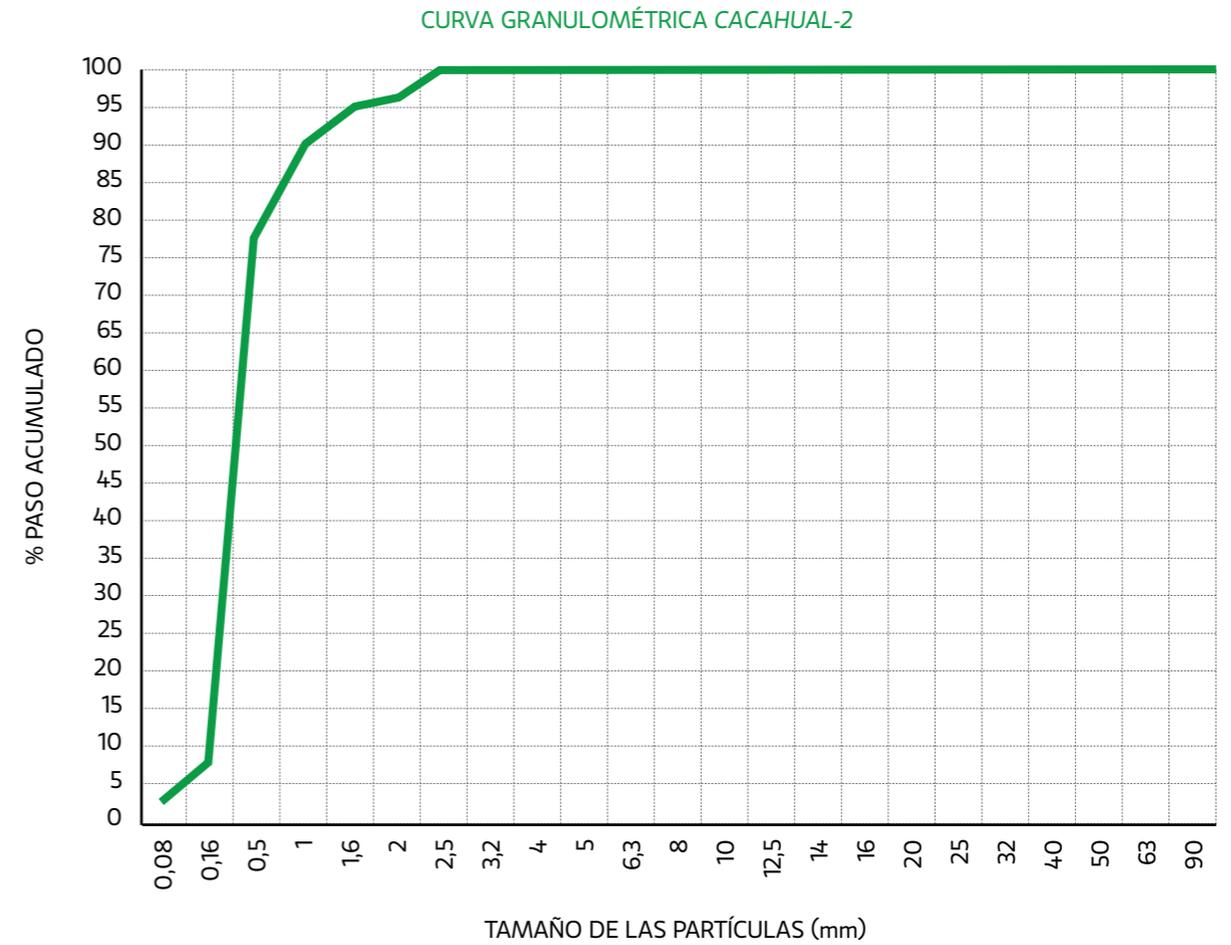
<b>TABLA 18 a – CACAHUAL-2</b>		
GRANULOMETRÍA DE PARTÍCULAS: MÉTODO DEL TAMIZADO (UNE-EN 933-1:1998 Y A1:2006)		
MÉTODO DE ANÁLISIS: LAVADO Y TAMIZADO	TAMIZADO VIA SECA	X
CONTENIDO EN FINOS (%)	1,64	
TABLA DE RESULTADOS		
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	PASO ACUMULADO (%)	
90,00	100,00	
63,00	100,00	
50,00	100,00	
40,00	100,00	
32,00	100,00	
25,00	100,00	
20,00	100,00	
16,00	100,00	
14,00	100,00	
12,50	100,00	
10,00	100,00	
8,00	100,00	
6,30	100,00	
5,00	100,00	
4,00	100,00	
3,20	100,00	
2,50	100,00	
2,00	96,14	
1,60	95,00	
1,25	-	
1,00	89,80	
0,800	-	
0,630	-	
0,500	78,16	
0,400	-	
0,320	-	
0,250	-	
0,200	-	
0,160	7,77	
0,125	-	
0,100	-	
0,080	3,57	
0,063	-	

<b>TABLA 18 b – CACAHUAL-3</b>		
GRANULOMETRÍA DE PARTÍCULAS: MÉTODO DEL TAMIZADO (UNE-EN 933-1:1998 Y A1:2006)		
MÉTODO DE ANÁLISIS: LAVADO Y TAMIZADO	TAMIZADO VIA SECA	X
CONTENIDO EN FINOS (%)	2,20	
TABLA DE RESULTADOS		
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	PASO ACUMULADO (%)	
90,00	100,00	
63,00	100,00	
50,00	100,00	
40,00	100,00	
32,00	100,00	
25,00	100,00	
20,00	100,00	
16,00	100,00	
14,00	100,00	
12,50	100,00	
10,00	100,00	
8,00	100,00	
6,30	100,00	
5,00	100,00	
4,00	100,00	
3,20	100,00	
2,50	100,00	
2,00	57,89	
1,60	52,78	
1,25	-	
1,00	42,99	
0,800	-	
0,630	-	
0,500	32,09	
0,400	-	
0,320	-	
0,250	-	
0,200	-	
0,160	10,95	
0,125	-	
0,100	-	
0,080	3,62	
0,063	-	

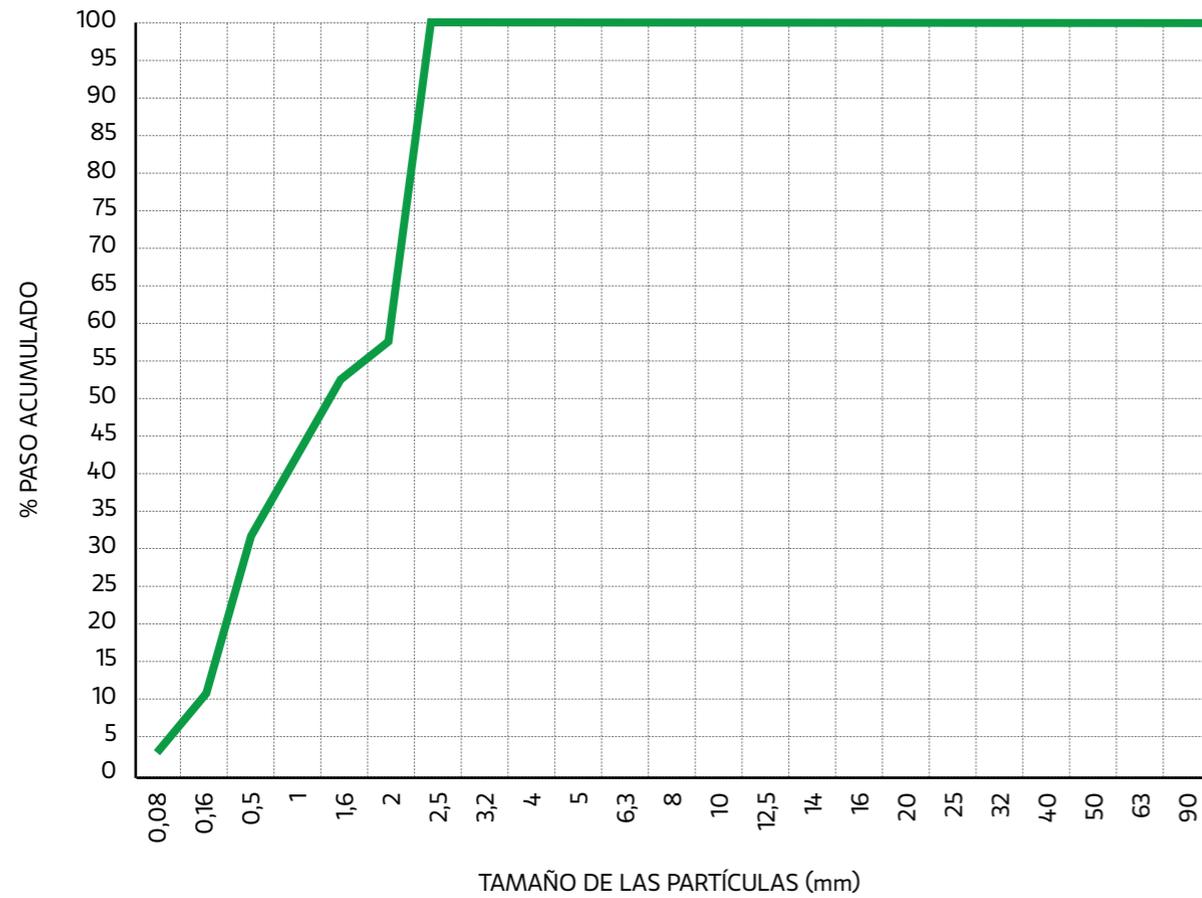
TABLA 18 c – CACAHUAL-4		
GRANULOMETRÍA DE PARTÍCULAS: MÉTODO DEL TAMIZADO (UNE-EN 933-1:1998 Y A1:2006)		
MÉTODO DE ANÁLISIS: LAVADO Y TAMIZADO	TAMIZADO VIA SECA	X
CONTENIDO EN FINOS (%)	1,15	
TABLA DE RESULTADOS		
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	PASO ACUMULADO (%)	
90,00	100,00	
63,00	100,00	
50,00	100,00	
40,00	100,00	
32,00	100,00	
25,00	100,00	
20,00	100,00	
16,00	100,00	
14,00	100,00	
12,50	100,00	
10,00	100,00	
8,00	100,00	
6,30	100,00	
5,00	100,00	
4,00	100,00	
3,20	100,00	
2,50	100,00	
2,00	85,70	
1,60	84,30	
1,25	-	
1,00	78,28	
0,800	-	
0,630	-	
0,500	67,95	
0,400	-	
0,320	-	
0,250	-	
0,200	-	
0,160	14,68	
0,125	-	
0,100	-	
0,080	2,44	
0,063	-	

FIGURA 75 (a, b y c). Representación gráfica de la distribución granulométrica de las partículas de arenas en las muestras Cacahual-2, Cacahual-3 y Cacahual-4, obtenida mediante el método del tamizado en seco.

GRANULOMETRÍA DE PARTÍCULAS: MÉTODO DEL TAMIZADO (UNE-EN 933-1:1998 Y A1:2006)

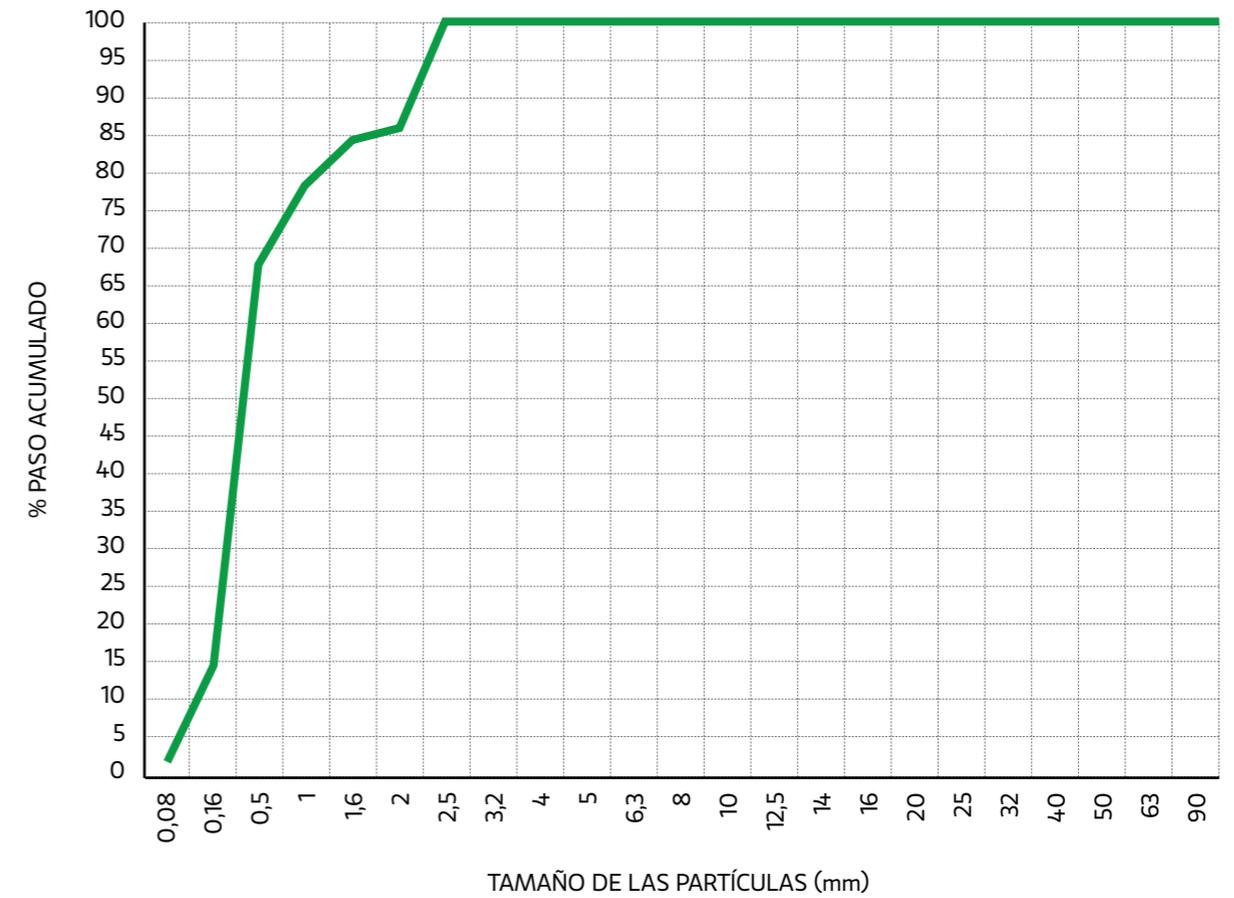


CURVA GRANULOMÉTRICA CACAHUAL-3



En las arenas normalizadas, los mayores porcentajes de material retenido se producen en los tamices 1,00 y 0,50 mm.

CURVA GRANULOMÉTRICA CACAHUAL-4



A diferencia de las partículas ultrafinas que poseen gran propensión por el agua, los productos gruesos se hidratan lentamente, permitiendo que la reacción de hidratación se prolongue en el tiempo.

## Difracción de rayos x

Según los resultados del análisis de las fases mediante *difracción de rayos x*, las muestras *Cacahual-2*, *Cacahual-3* y *Cacahual-4* poseen contenidos apreciables en *cuarzo*, a juzgar por los máximos valores de  $d\text{\AA}$  (3.3349 - 3.3790), de *máxima intensidad relativa* (100%), y corroborados por comparación con los valores normalizados (Bayliss, P. *et al.*, 1986; Treacy, M. M. J. y Higgins, J. B., 2001) (figura 76 a, b y c).

Otros valores de  $d\text{\AA}$  (4.3154 - 4.2439; 2.4542-2.4768; 2.2997; 2.2784-2.2525; 2.1424-2.1265; 1.8294-1.8125; 1.6811-1.6713; 1.6584 y 1.5495) indican que el *cuarzo* es la fase dominante. Las fases secundarias están representadas por *feldespato* y por trazas de *caolinita* y *dolomita*.

La presencia de *caolinita* en las *arenas silíceas* de *El Cacahual* puede interpretarse como un producto de reacción secundario formado a partir de disoluciones hidrotermales precedentes que lixivieron y disolvieron a los *feldespatos*, aunque ciertas cantidades pudieron haberse originado a partir de la alteración de la *moscovita* y la *biotita* en contacto con esas disoluciones.

El *feldespato* ( $d\text{\AA} = 2.2784$  y  $2.4552$ ) consiste en una *plagioclasa* de composición *sódico-cálcica* (*andesina*) ( $Ab = 71\%$  -  $An = 29\%$ ) que se originó por *albitización* de especímenes más cálcicos, posiblemente *anortíticos* y *bytowníticos*.

El porcentaje en *cuarzo* calculado para estas muestras alcanza prácticamente el 90%, las restantes cantidades están representadas por *feldespato*.

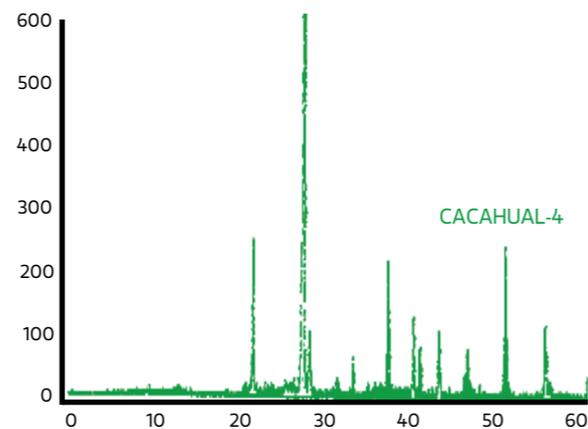
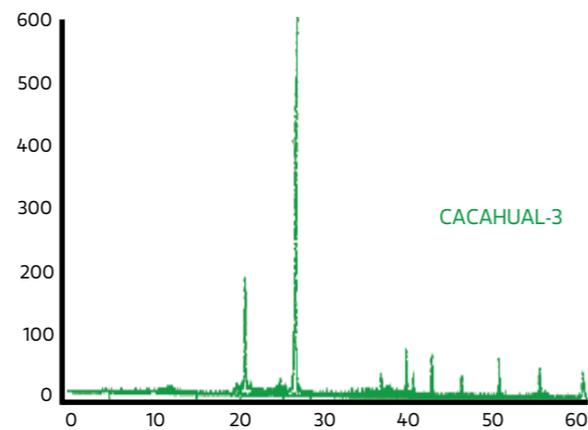
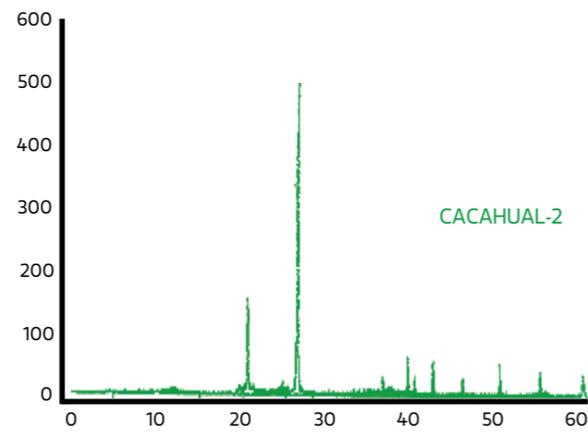


FIGURA 76. Derivatogramas que exhiben los picos principales reflejados por los componentes mayoritarios de las muestras *Cacahual-2* (a), *Cacahual-3* (b) y *Cacahual-4* (c).

## Microscopía electrónica de barrido

La figura 77 muestra una secuencia de microfotografías (a, b, c, d, e y f) donde se aprecian granos de *cuarzo* inequigranulares, fundamentalmente angulosos y subangulosos, sin redondeamiento acentuado.

No hay presencia de *cemento* intergranular, por lo que cada grano entra en contacto directo con su vecino. Es posible observar la fractura concoidea típica del *cuarzo* en la mayoría de los granos.

En algunos casos pueden destacarse especies minerales distintas alojadas entre los granos de *cuarzo*; posiblemente, son

productos secundarios de *hematita* y *dolomita* procedentes de la alteración de minerales máficos, así como por la acción de ciclos previos de alteración hidrotermal.

La muestra *Cacahual-3* representa la parte menos friable de las *arenas silíceas* del yacimiento *El Cacahual*, las microfotografías de la figura 78 (a, b, c, d, e y f) demuestran este hecho. Por ejemplo, en a y b, tomadas a 500 y 1.000 aumentos, respectivamente, se puede observar una masa compacta, parcialmente lixiviada, donde destacan los contornos de los granos de *cuarzo* adheridos aún a dicha *matriz*.

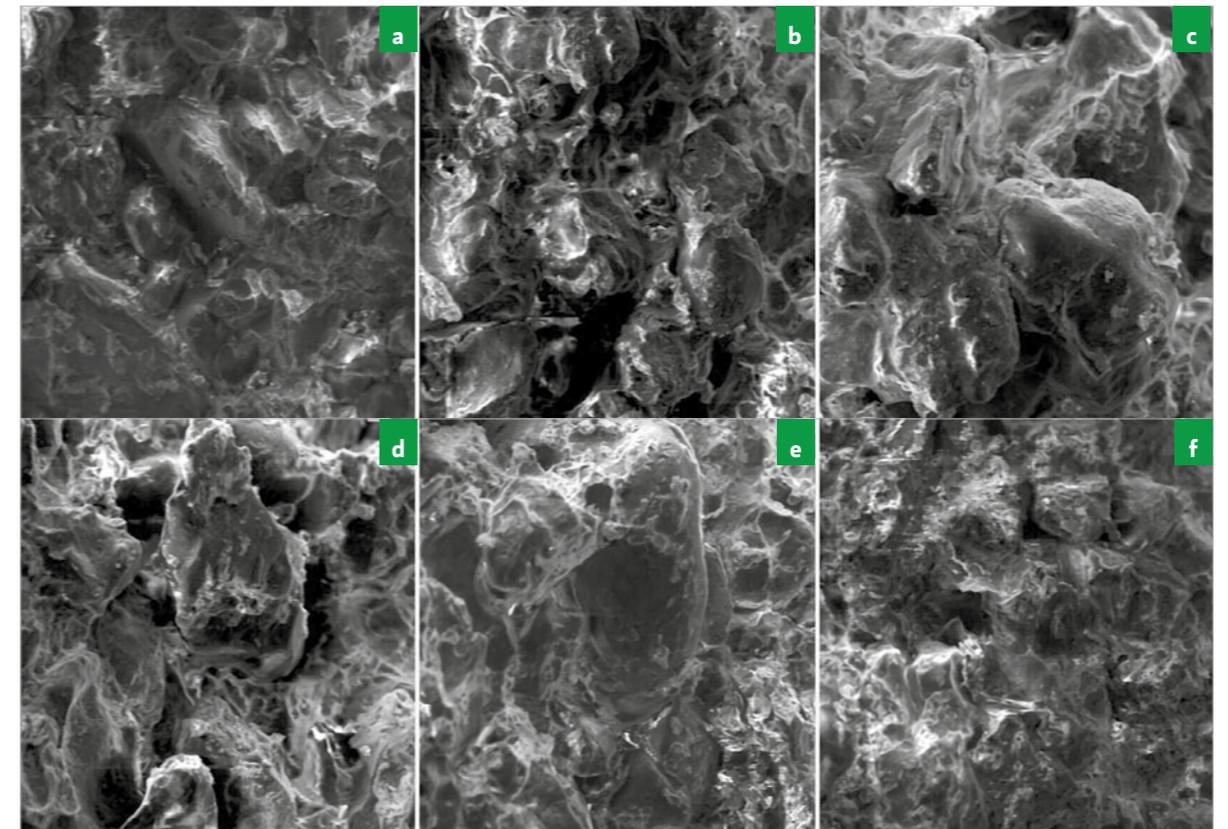


FIGURA 77. Secuencias de microfotografías de la muestra *Cacahual-2* tomadas mediante *microscopía electrónica de barrido*.

Hay una marcada angulosidad en las facetas y aristas de los granos, y, por otro lado, no se aprecian signos de redondeamiento.

En los intersticios dejados por los granos de *cuarzo* desprendidos se ha depositado, muy escasamente, *caolinita* residual.

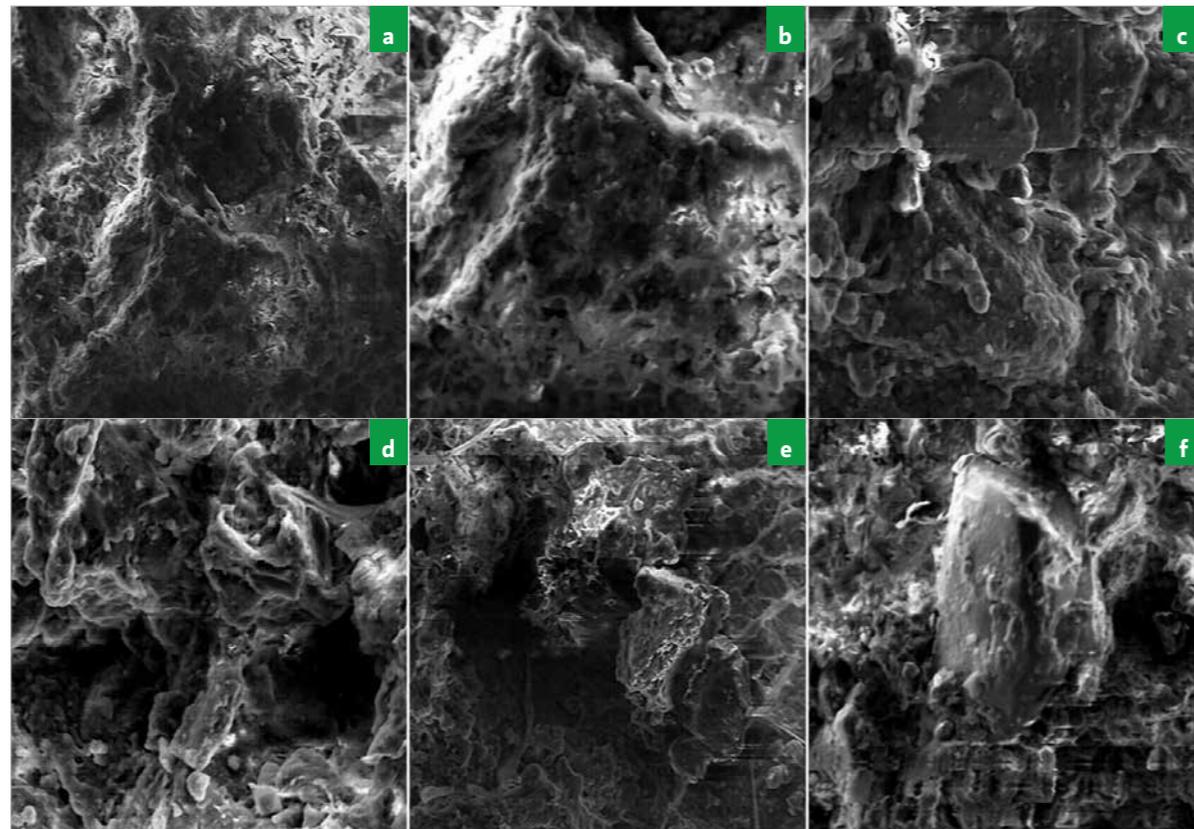
Es posible distinguir pequeños cristales idiomórficos e hipidiomórficos de *feldespato*, que se disponen con cierta regularidad en el campo visual.

En las microfotografías *c*, *d* y *e*, tomadas a 1.200 y 600 aumentos, respectivamente, se observan granos de *cuarzo* unidos entre sí, sin presencia de compuestos cementantes.

Sus aristas son claramente irregulares y angulosas. En *d* se aprecian escasos cristales de *mica*, así como agujeros formados por la remoción de granos preexistentes.

La muestra *Cacahual-3*, que analizada *de visu* tiene el aspecto de una roca intemperizada, posee la misma composición mineralógica que las muestras *Cacahual-2* y *Cacahual 4*, con muy pocas variaciones, según datos de los ensayos de *difracción de rayos x*.

La secuencia de microfotografías exhibidas en la figura 79 (*a*, *b*, *c*, *d*, *e* y *f*), correspondiente a la muestra *Cacahual-3*, permite definir claramente la morfología de los



↑ FIGURA 78. Series de microfotografías de la muestra *Cacahual-3* captadas con la ayuda del microscopio electrónico.

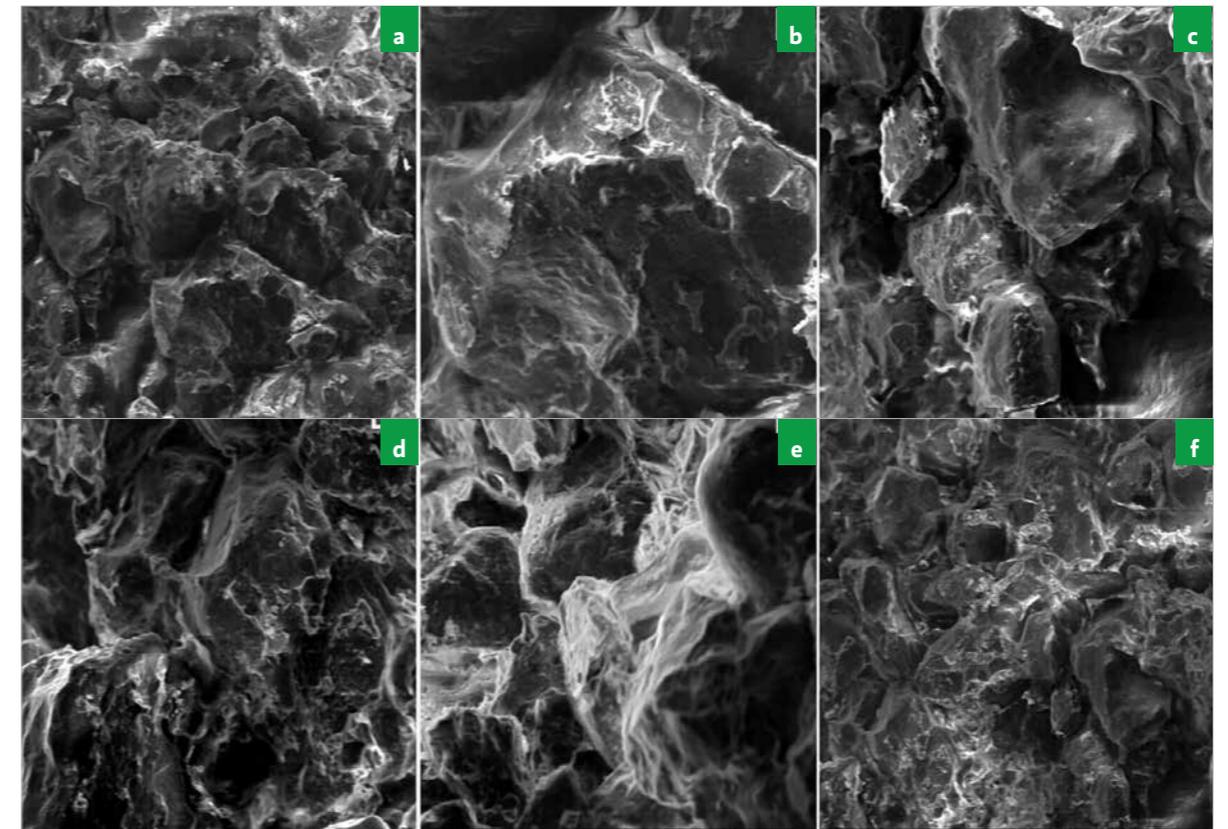
granos de *cuarzo*, destacando los planos de la fractura concoidea, las aristas angulosas, la diversidad de tamaños y la ausencia de material secundario cementante.

El color blanco de la muestra *Cacahual-4*, según el estudio *de visu*, puede ser causado por la presencia de *illita* como producto de alteración de la *moscovita*, la cual se presenta exclusivamente como indicio en esta muestra. También podría ser consecuencia, aunque en muy poco grado, de la presencia de *caolinita* y *dolomita*.

Las pequeñas variaciones que presenta la composición mineralógica de las tres muestras, *Cacahual-2*, *Cacahual-3* y *Cacahual-4*,

indican una zonalidad local en los rasgos producidos por los procesos de alteración. En las determinaciones *de visu* ninguna de ellas reaccionó con el ácido clorhídrico, a pesar de las leves trazas de *dolomita* que contienen; sin embargo, es posible que la sustitución catiónica del *calcio* por el *magnesio* haya sido muy marcada a causa de factores externos relacionados con el aumento de la temperatura en ese ambiente volcánico.

Naturalmente, es lógico pensar que la *dolomitización* se pudo originar por procesos hidrotermales y metasomáticos relacionados con la actividad magmática que originó la *Isla de Bioko*; de hecho, la *albitización*



↑ FIGURA 79. Microfotografías de la muestra *Cacahual-4* obtenidas con el microscopía electrónica de barrido.

intensa que experimentan los *feldespatos* que componen las tres muestras es un testimonio de la actividad hidrotermal que afectó a estas formaciones.

Se han integrado en esta investigación los resultados del análisis por *microscopía electrónica de barrido* de una muestra de *cuarzo* relicto interdigitada en las *arenas silíceas* del yacimiento *El Cacahual* (figura 80 *a, b, c, d, e y f*).

En las microfotografías mostradas en la figura 80 (*a, b, c, d, e y f*) y en la figura 81 *a*, se observa un espécimen de *cuarzo* con superficie fuertemente lixiviada, posiblemente por la acción de los fluidos

hidrotermales químicamente activos, o por su posición original cerca de los orificios que sirvieron de vías de escape a los gases ácidos relacionados con la actividad volcánica.

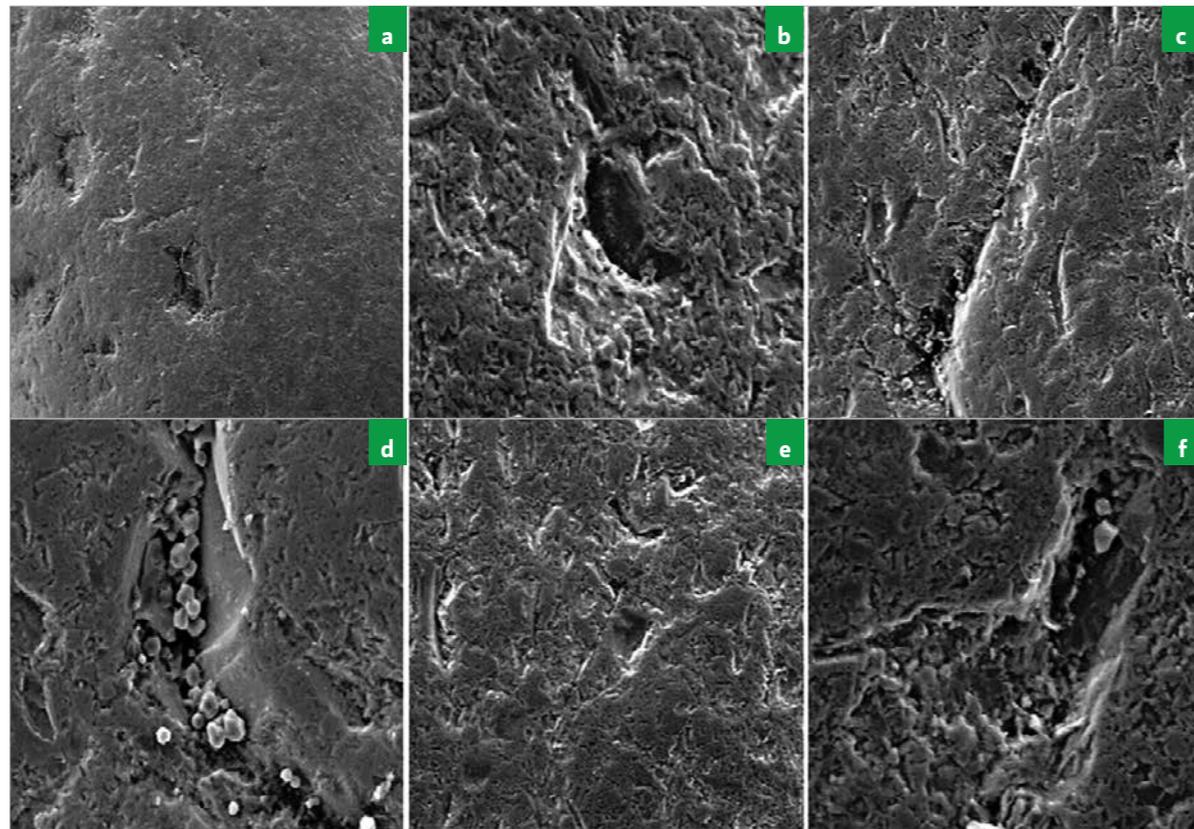
Vale destacar el crecimiento incipiente de pequeños cristales de neoformación en una hendidura de la muestra (figura 80 *d*).

Las microfotografías de la figura 81 (*a, b, c, d, e y f*) permiten apreciar una muestra cuya superficie se encuentra ampliamente afectada por procesos de lixiviación intensa. En *b* se observa una vesícula vacía con mayor aumento, indudablemente originada por agentes lixiviantes.

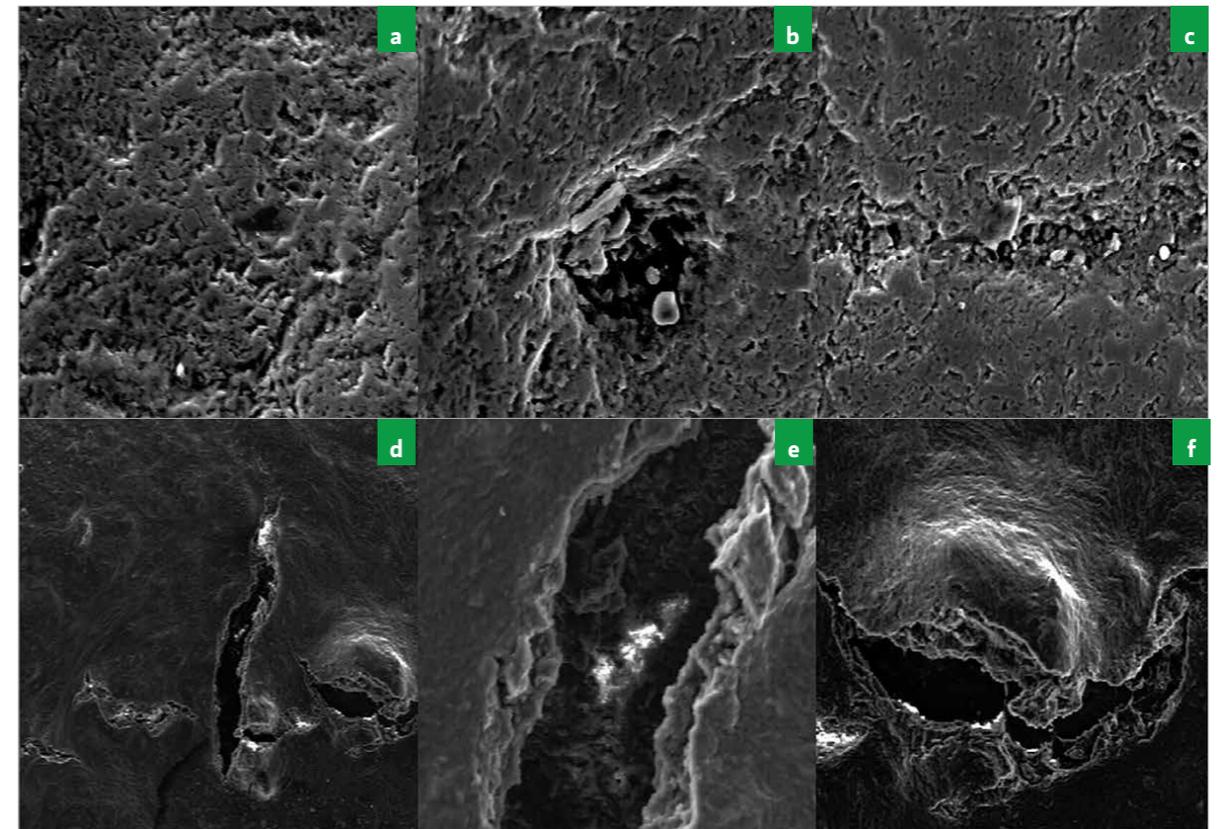
La figura 81 (microfotografías *d, e y f*, de menor a mayor aumento), exhibe el crecimiento de especies minerales de *cuarzo* de neoformación en el interior y bordes de las vesículas, formando pequeñas geodas bien definidas.

Es difícil definir la verdadera naturaleza de este *cuarzo* en su posición actual dentro del yacimiento *El Cacahual*. El estudio *de visu* lo describe como un espécimen de morfología redondeada y, en contraste con las *arenas* que se investigan y entre las cuales está interdigitado como una facies aparentemente foránea, posee un acusado grado de transporte.

Los trabajos de *reconocimiento geológico* llevados a cabo en los alrededores de este yacimiento no revelaron la existencia de afloramientos de *cuarzo* de esta naturaleza, lo cual infiere aparentes contradicciones a la hora de formular los criterios genéticos de ambos litotipos.



↑ FIGURA 80. Secuencias de microfotografías tomadas durante la investigación de una muestra de *cuarzo* relicto por *microscopía electrónica de barrido*.



↑ FIGURA 81. Microfotografías tomadas con gran aumento mostrando detalles morfológicos de la superficie de una muestra de *cuarzo* relicto.

## Análisis químico

La expresión de los resultados del análisis químico (UNE-EN 196-2:2006 // UNE 80225:1993) para las muestras de arenas silíceas del yacimiento *El Cacahual* indica porcentajes singularmente elevados en  $\text{SiO}_2$  (*Cacahual-2*: 88,18%; *Cacahual-3*: 88,23% y *Cacahual-4*: 89,01%), que contrastan drásticamente con los bajos valores determinados para la  $\text{SiO}_2$  reactiva (8,76%, 8,70% y 8,76%), respectivamente (tabla 19 a, b y c).

Se deduce, de este modo, que el 79,42% (*Cacahual-2*), el 79,53% (*Cacahual-3*) y el 80,25% (*Cacahual-4*) de la sílice que compone las respectivas muestras se encuentra en el residuo insoluble no reactivo.

Lo expresado anteriormente permite argumentar que las arenas silíceas de *El Cacahual* están compuestas por granos de cuarzo cristalino, en los que no se ha determinado la presencia de fases amorfas reactivas. Este hecho, por sí solo, permite establecer el carácter no puzolánico de estas arenas.

De acuerdo con la norma UNE-EN 196-2:2006, ninguna de las muestras analizadas cumple con las prescripciones establecidas para el contenido mínimo en  $\text{SiO}_2$  reactiva (25%) (tabla 19 a, b y c); sin embargo, pueden ser adecuadas para el uso como arena normalizada en mezclas de morteros y hormigones.

Los discretos contenidos en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgO}$  (tabla 19 a, b y c) señalan que estas arenas están compuestas, además de cuarzo, por otras fases minerales minoritarias, como *feldespato*, *hematita* y *dolomita*, confirmado previamente con los estudios de difracción de rayos x.



Plantas exóticas de la Isla de Bioko

**TABLA 19:** Representación de los porcentajes de compuestos detectados en el estudio de las muestras *Cacahual-2* (a), *Cacahual-3* (b) y *Cacahual-4* (c) (Normas UNE-EN 196-2:2006 // UNE 80225:1993 EX // UNE EN 451-1:2006).

TABLA 19 a - CACAHUAL-2	
DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS	(%)
$\text{SiO}_2$ TOTAL	88,18
MgO	0,24
CaO TOTAL	0,64
CaO Libreo	-
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,51
$\text{Al}_2\text{O}_3$	7,67
$\text{SiO}_2$ REACTIVA	8,76
CaO REACTIVA	0,46
R.I.	82,92

TABLA 19 b - CACAHUAL-3	
DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS	(%)
$\text{SiO}_2$ TOTAL	88,23
MgO	0,22
CaO TOTAL	0,66
CaO Libreo	-
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,42
$\text{Al}_2\text{O}_3$	6,47
$\text{SiO}_2$ REACTIVA	8,70
CaO REACTIVA	0,37
R.I.	85,13

TABLA 19 c - CACAHUAL-4	
DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS	(%)
$\text{SiO}_2$ TOTAL	89,01
MgO	0,32
CaO TOTAL	0,40
CaO Libreo	-
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,40
$\text{Al}_2\text{O}_3$	7,80
$\text{SiO}_2$ REACTIVA	8,76
CaO REACTIVA	0,46
R.I.	83,75

## Materias orgánicas

Las características físicas de las *arenas silíceas* del yacimiento *El Cacahual*, como la friabilidad y su posible capacidad para albergar materiales foráneos más o menos contaminantes y dañinos, exigen el empleo del método de determinación del contenido en *materias orgánicas* (EN-1744-1:2010). Como se ha puntualizado antes, el carácter singularmente nocivo de estos compuestos, que pueden ser ciertas *arcillas* y restos de vegetales, se puede traducir como la causa directa de una adhesión débil del *cemento* con los áridos, y en una descompensación del carácter *alcalino* de la masa cementicia que altera los mecanismos responsables de la hidratación del *cemento*.

Las muestras de *arenas silíceas* (*Cacahual-2*, *Cacahual-3* y *Cacahual-4*) deben secarse convenientemente a una temperatura sostenida de 50°C durante 24 horas; posteriormente, se mezclan con una disolución de *hidróxido de sodio* al 3%, según el procedimiento explicado para el yacimiento *San Nicolás*.

La comparación *de visu* entre la *disolución patrón* (de color rojo oscuro) y la mezcla de *hidróxido de sodio* con las *arenas silíceas* no exhibe variación cromática alguna en dicha mezcla, llegándose a la conclusión de que estas *arenas* son prácticamente puras.

Los criterios expuestos confirman la aptitud de las *arenas silíceas* del yacimiento *El Cacahual* para ser empleadas como áridos finos en las mezclas de *morteros* y *hormigones*.

## Preparación y elaboración de morteros con arenas silíceas

En los proyectos de mezclas para la elaboración de *morteros*, cuyo árido fino (*arena normalizada*) es sustituido completamente por *arenas silíceas* del yacimiento *El Cacahual*, se han tenido en cuenta los procedimientos indicados en la *norma UNE-EN 196-1:2005*.

De este modo, las proporciones de *cemento pórtland*, agua destilada y la masa requerida de *arena* se mantienen constantes (tabla 20). La finalidad de este procedimiento es comprobar que las *arenas silíceas* de este yacimiento son capaces de aportar resistencia mecánica a la masa del *mortero*.

Los *morteros* preparados de acuerdo con este proyecto de mezcla permanecen en la cámara húmeda durante un período de 28 días. Tras este tiempo, las probetas son ensayadas con la metodología recogida en la *norma UNE-EN 196-1:2005*, con el propósito de obtener los correspondientes valores de resistencias normales.

Los datos representados en la tabla 21 dan testimonio de la aptitud de las *arenas silíceas* para ser empleadas en la elaboración de *morteros*. Las resistencias normales obtenidas (34,8-39,7 *Mpa*) alcanzan valores que superan incluso el límite inferior establecido en la *norma UNE-EN 196-1:2005* ( $\geq 32,5 - \leq 52,5$  *Mpa*) a 28 días, para *cementos* con resistencia inicial ordinaria de 32,5 N, 32,5 R, 42,5 N, 42,5 R y los comprendidos en la relación de valores  $\geq 42,5 - \leq 62,5$  *Mpa*).

**TABLA 20:** Dosificación de *morteros* elaborados específicamente con *arenas silíceas* del yacimiento *El Cacahual* en relación con el *mortero* de referencia (UNE-EN 196-1:2005).

DOSIFICACIÓN DEL MORTERO		PESO DE LA ARENA (g)	DIÁMETRO DE ESCURRIMIENTO (mm)	
1	100% <i>Cemento pórtland</i> + <i>Arena normalizada</i> + 225 g de <i>Agua destilada</i> <b>(MUESTRA PATRÓN)</b>	1349,6	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 180
			Diámetro 2: 180	
2	100% <i>Cemento pórtland</i> + <i>Arena Cacahual- 2</i> + 225 g de <i>Agua destilada</i> .	1349,4	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 180
			Diámetro 2: 180	
3	100% <i>Cemento pórtland</i> + <i>Arena Cacahual- 3</i> + 225 g de <i>Agua destilada</i> .	1349,5	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 180
			Diámetro 2: 180	
4	100% <i>Cemento pórtland</i> + <i>Arena Cacahual- 4</i> + 225 g de <i>Agua destilada</i> .	1350,4	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 180
			Diámetro 2: 180	

**TABLA 21:** Resultados de las resistencias a *flexión* y a *compresión* para un período de 28 días de curado (UNE-EN 196-1:2005).

MUESTRA	RESISTENCIA A FLEXIÓN (Mpa)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Mpa)
<i>CemRef</i>	7,4	46,1
<i>Cacahual-2</i>	5,4	39,5
<i>Cacahual-3</i>	5,3	34,8
<i>Cacahual-4</i>	5,5	39,7

**El cálculo del Índice de Actividad Resistente pone de manifiesto que las arenas silíceas aportan valores de resistencias mecánicas capaces de superar el 75% de la resistencia de la probeta patrón.**

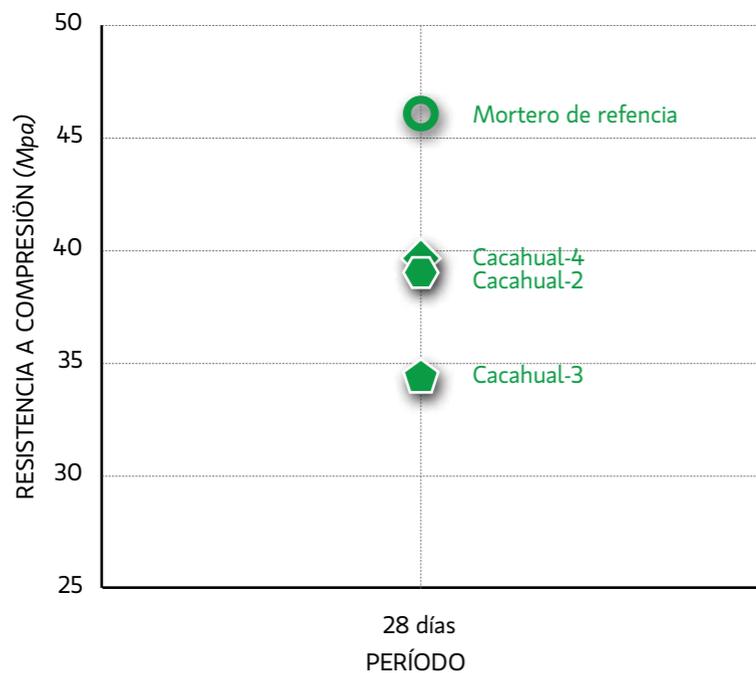


FIGURA 82. Representación gráfica de los resultados de la resistencia mecánica a compresión para un período de 28 días.

TABLA 22: Resultados del cálculo del Índice de Actividad Resistente para las probetas de morteros elaboradas con arenas silíceas del yacimiento El Cacahual, en relación al 75% del valor de resistencia mecánica del mortero de referencia para un período de curado de 28 días (UNE-EN 196-1:2005).

MUESTRA	RESISTENCIA A FLEXIÓN (Mpa a 28 días)	ÍNDICE DE ACTIVIDAD RESISTENTE (%)
CemRef	46,1	-
Cacahual-2	39,5	85,7
Cacahual-3	34,8	75,5
Cacahual-4	39,7	86,1

El alto contenido en sílice, la apreciable presencia de alúmina y la ausencia de materias orgánicas son premisas determinantes para el empleo de las arenas silíceas

En la figura 82 se confirma de manera gráfica la serie de criterios que se acaban de exponer.

El cálculo del Índice de Actividad Resistente pone de manifiesto que las tres muestras de arenas silíceas ensayadas aportan valores de resistencias mecánicas capaces de superar el 75% de la resistencia aportada por las probetas del mortero patrón (tabla 22).

Las muestras estudiadas (Cacahual-2, Cacahual-3 y Cacahual-4) poseen idéntica composición, tanto desde el punto de vista mineralógico como químico, a pesar de que exhiben una ligera zonación cromática que va desde el pardo, el ocre y el amarillo hasta el gris claro y el blanco, producida por la insignificante presencia (trazas) de illita, caolinita y dolomita. Por otra parte, hay entre ellas una pequeña diferencia en lo relativo a la zonalidad granulométrica y al grado de disgregación mecánica, en virtud de lo cual la muestra Cacahual-3 representa la facies más gruesa, Cacahual-4, la de granos medio-finos, mientras que Cacahual-2 la de tamaños aún más finos. Estos detalles deben tenerse en cuenta en la proyección de futuras explotaciones, sobre todo dependiendo del destino que se dará a las materias primas, lo cual determinará, por una parte, la explotación intensiva del todo uno, y por otra, la extracción selectiva ajustada al tipo de demanda que exija el mercado.

Existen muchas controversias sobre la posible génesis de este yacimiento, pero por lo general todas las hipótesis tienen un carácter eminentemente especulativo y teórico. La falta de sondeos y de estudios geofísicos del subsuelo impide el conocimiento sobre la potencia vertical, las variaciones faciales y las relaciones del material friable con las rocas consolidadas del infrayacente. Asimismo, la carencia de estudios en superficie, como los itinerarios geológicos con una red razonablemente densa, no arroja ninguna luz sobre la extensión lateral de este yacimiento, más allá de los estrechos límites ofrecidos por la actual cantera.

Tomando en consideración las nociones que se acaban de exponer, los autores afianzan su criterio genético en la similitud composicional, tanto mineralógica como química, en el escaso grado de redondeamiento, en la poca uniformidad granulométrica y en la insignificante presencia de especies minerales foráneas, aspectos que permiten deducir, presumiblemente, que este yacimiento pudo haberse originado *in situ*, a partir de la erosión y redeposición eluvial de un protolito cuyos niveles más frescos yacen en la profundidad. Este protolito pudo ser parte de una serie volcánica más diferenciada con un quimismo cercano tanto al de los granitoides como al de las andesitas y las dacitas, testimonio que se consigna a través del tamaño gradacional que va desde el grueso al muy fino, detectado gracias al estudio granulométrico de estas arenas.

## YACIMIENTOS DE ROCAS VOLCÁNICAS DE LUBA-MOKA

### Variabilidad granulométrica

El estudio de las fracciones *granulométricas* (UNE-EN 933-1:1998 y A1:2006) de las muestras *Moka-1* y *Moka-1a* detecta poblaciones mayoritarias en el *huso* 1,0 mm - 0,080 mm, aunque las máximas retenciones tienen lugar en el intervalo *granulométrico* de 0,50 mm - 0,16 mm (tablas 23 a, b y 24 a, b).

Como puede observarse, las curvas obtenidas en cada caso acusan una evidente similitud que indica el parentesco petrogenético de ambas muestras (figura 83 a y b).

El análisis culmina con la obtención de fracciones pasantes por el tamiz de 0,063 mm, deseables por constituir el estándar *granulométrico* de numerosos ensayos sucesivos.



Pescadores de la Isla de Bioko

**TABLA 23 (a y b):** Variación de los porcentajes de material retenido y pasante en relación con la abertura de los tamices y la masa original de las muestras *Moka-1* y *Moka-1a*.

TABLA 23 a – MOKA-1				
MASA SECA TOTAL		$M_1$	(g)	1067
MASA SECA TRAS LAVADO (Si aplica)		$M_2$	(g)	1067
MASA SECA DE LOS FINOS ELIMINADOS MEDIANTE LAVADO		$M_1 - M_2$	(g)	0
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN	
	$R_i$ (g)	$[R_i / M_1 \times 100]$ (%)	$[100 - S(R_i / M_1 \times 100)]$ (%)	
90	$R_1$	0	0,00	100,00
63	$R_2$	0	0,00	100,00
50	$R_3$	0	0,00	100,00
40	$R_4$	0	0,00	100,00
32	$R_5$	0	0,00	100,00
25	$R_6$	0	0,00	100,00
20	$R_7$	0	0,00	100,00
16	$R_8$	0	0,00	100,00
14	$R_9$	0	0,00	100,00
12,5	$R_{10}$	0	0,00	100,00
10,0	$R_{11}$	0	0,00	100,00
8,0	$R_{12}$	0	0,00	100,00
6,3	$R_{13}$	0	0,00	100,00
5,0	$R_{14}$	0	0,00	100,00
4,0	$R_{15}$	0	0,00	100,00
3,2	$R_{16}$	0	0,00	100,00
2,5	$R_{17}$	0	0,00	100,00
2,0	$R_{18}$	0	0,00	100,00

TABLA 23 a – MOKA-1					
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN		
	$R_i$ (g)	$[R_i / M_1 \times 100]$ (%)	$[100 - S(R_i / M_1 \times 100)]$ (%)		
1,6	$R_{19}$	0	0,00	100,00	
1,25	$R_{20}$	0	0,00	100,00	
1,00	$R_{21}$	64,2	6,02	93,98	
0,80	$R_{22}$				
0,63	$R_{23}$				
0,50	$R_{24}$	636,5	59,65	34,33	
0,40	$R_{25}$				
0,32	$R_{26}$				
0,25	$R_{27}$				
0,20	$R_{28}$				
0,16	$R_{29}$	684,1	64,11	-29,78	
0,125	$R_{30}$				
0,100	$R_{31}$				
0,080	$R_{32}$	160,6	15,05	-44,84	
0,063	$R_{33}$				
MATERIAL TAMIZADO QUE QUEDA EN LA BANDEJA DEL FONDO		$P$ (g)	45		
PORCENTAJE DE FINOS QUE PASA POR EL TAMIZ DE 0,063 mm		$[(M_1 - M_2) + P] / M_1 \times 100$	4,22		
VALIDACIÓN DEL ENSAYO	$SR_i + P$	1590,40	$\frac{M_2 - (SR_i + P)}{M_2} \times 100$	-49,0534	<1%

TABLA 23 b – MOKA-1a				
MASA SECA TOTAL		M <sub>1</sub>	(g)	1449
MASA SECA TRAS LAVADO (Si aplica)		M <sub>2</sub>	(g)	1449
MASA SECA DE LOS FINOS ELIMINADOS MEDIANTE LAVADO		M <sub>1</sub> - M <sub>2</sub>	(g)	0
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN	
	Ri (g)	[Ri / M1 x 100] (%)	[100 - S(Ri / M1 x 100)] (%)	
90	R <sub>1</sub>	0	0,00	100,00
63	R <sub>2</sub>	0	0,00	100,00
50	R <sub>3</sub>	0	0,00	100,00
40	R <sub>4</sub>	0	0,00	100,00
32	R <sub>5</sub>	0	0,00	100,00
25	R <sub>6</sub>	0	0,00	100,00
20	R <sub>7</sub>	0	0,00	100,00
16	R <sub>8</sub>	0	0,00	100,00
14	R <sub>9</sub>	0	0,00	100,00
12,5	R <sub>10</sub>	0	0,00	100,00
10,0	R <sub>11</sub>	0	0,00	100,00
8,0	R <sub>12</sub>	0	0,00	100,00
6,3	R <sub>13</sub>	0	0,00	100,00
5,0	R <sub>14</sub>	0	0,00	100,00
4,0	R <sub>15</sub>	0	0,00	100,00
3,2	R <sub>16</sub>	0	0,00	100,00
2,5	R <sub>17</sub>	0	0,00	100,00
2,0	R <sub>18</sub>	0	0,00	100,00

TABLA 23 b – MOKA-1a					
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN		
	Ri (g)	[Ri / M1 x 100] (%)	[100 - S(Ri / M1 x 100)] (%)		
1,6	R <sub>19</sub>	0	0,00	100,00	
1,25	R <sub>20</sub>	0	0,00	100,00	
1,00	R <sub>21</sub>	30,8	2,13	97,87	
0,80	R <sub>22</sub>				
0,63	R <sub>23</sub>				
0,50	R <sub>24</sub>	349,8	24,14	73,73	
0,40	R <sub>25</sub>				
0,32	R <sub>26</sub>				
0,25	R <sub>27</sub>				
0,20	R <sub>28</sub>				
0,16	R <sub>29</sub>	741,9	51,20	22,53	
0,125	R <sub>30</sub>				
0,100	R <sub>31</sub>				
0,080	R <sub>32</sub>	233,8	16,14	6,40	
0,063	R <sub>33</sub>				
MATERIAL TAMIZADO QUE QUEDA EN LA BANDEJA DEL FONDO		P (g)	77,3		
PORCENTAJE DE FINOS QUE PASA POR EL TAMIZ DE 0,063 mm		$[(M_1 - M_2) + P] / M_1 \times 100$	5,33		
VALIDACIÓN DEL ENSAYO	SRi + P	1433,60	$\frac{M_2 - (SRi + P)}{M_2} \times 100$	1,0628	<1%

**TABLA 24 (a y b):** Distribución granulométrica de las partículas que componen las muestras Moka-1 y Moka-1a (UNE-EN 933-1:1998 y A1:2006).

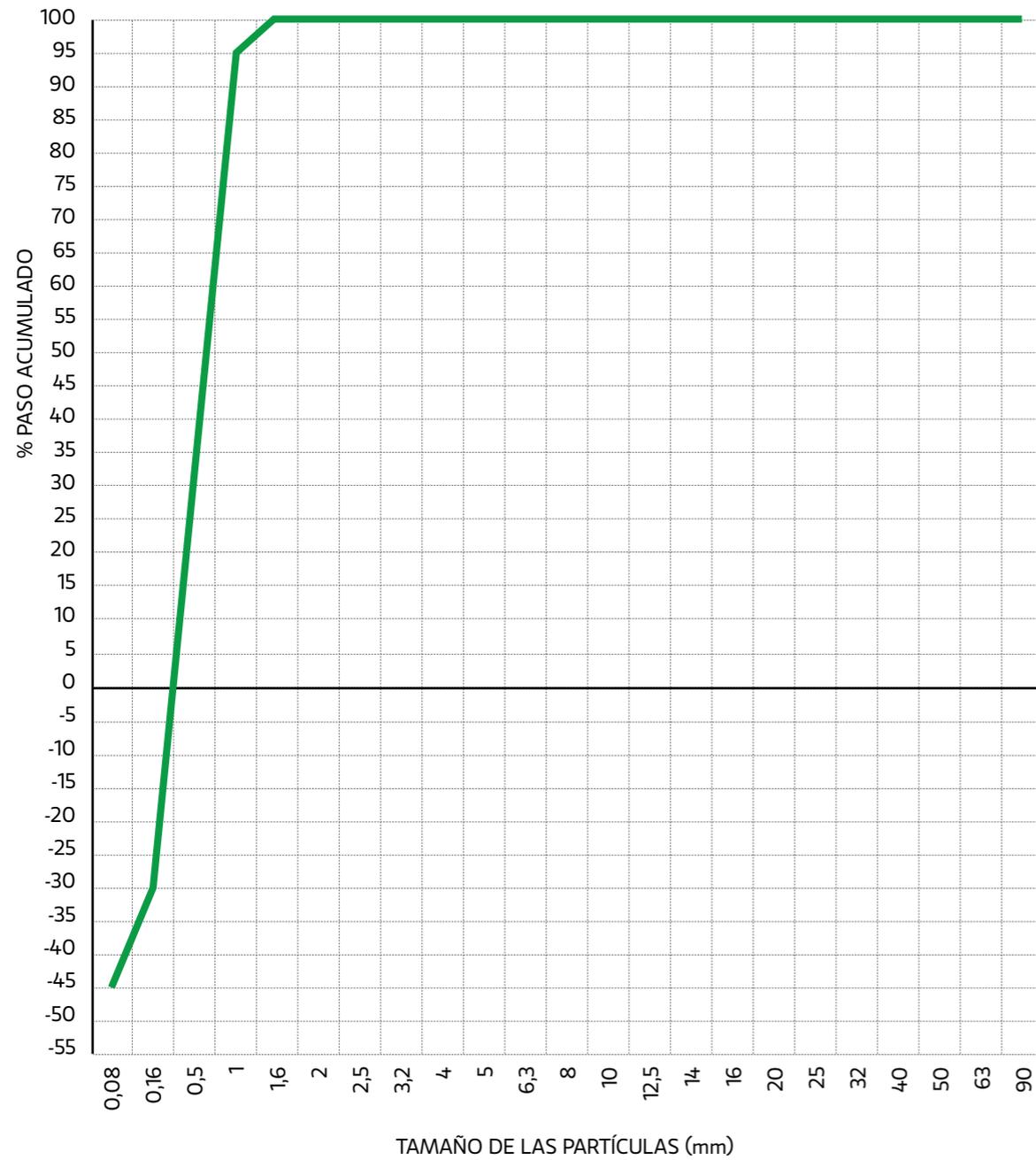
<b>TABLA 24 a – MOKA-1</b>		
GRANULOMETRÍA DE PARTÍCULAS: MÉTODO DEL TAMIZADO (UNE-EN 933-1:1998 Y A1:2006)		
MÉTODO DE ANÁLISIS: LAVADO Y TAMIZADO	TAMIZADO VIA SECA	X
CONTENIDO EN FINOS (%)	1,64	
TABLA DE RESULTADOS		
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	PASO ACUMULADO (%)	
90,00	100,00	
63,00	100,00	
50,00	100,00	
40,00	100,00	
32,00	100,00	
25,00	100,00	
20,00	100,00	
16,00	100,00	
14,00	100,00	
12,50	100,00	
10,00	100,00	
8,00	100,00	
6,30	100,00	
5,00	100,00	
4,00	100,00	
3,20	100,00	
2,50	100,00	
2,00	100,00	
1,60	100,00	
1,25	100,00	
1,00	93,98	
0,800	-	
0,630	-	
0,500	34,33	
0,400	-	
0,320	-	
0,250	-	
0,200	-	
0,160	-29,78	
0,125	-	
0,100	-	
0,080	-44,84	
0,063	-	

<b>TABLA 24 b – MOKA-1a</b>		
GRANULOMETRÍA DE PARTÍCULAS: MÉTODO DEL TAMIZADO (UNE-EN 933-1:1998 Y A1:2006)		
MÉTODO DE ANÁLISIS: LAVADO Y TAMIZADO	TAMIZADO VIA SECA	X
CONTENIDO EN FINOS (%)	2,20	
TABLA DE RESULTADOS		
TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	PASO ACUMULADO (%)	
90,00	100,00	
63,00	100,00	
50,00	100,00	
40,00	100,00	
32,00	100,00	
25,00	100,00	
20,00	100,00	
16,00	100,00	
14,00	100,00	
12,50	100,00	
10,00	100,00	
8,00	100,00	
6,30	100,00	
5,00	100,00	
4,00	100,00	
3,20	100,00	
2,50	100,00	
2,00	100,00	
1,60	100,00	
1,25	100,00	
1,00	97,87	
0,800	-	
0,630	-	
0,500	73,73	
0,400	-	
0,320	-	
0,250	-	
0,200	-	
0,160	22,53	
0,125	-	
0,100	-	
0,080	6,40	
0,063	-	

**FIGURA 83 (a y b).** Representación gráfica de la distribución granulométrica de las partículas de las muestras Moka-1 y Moka-1a, obtenida mediante el método del tamizado en seco.

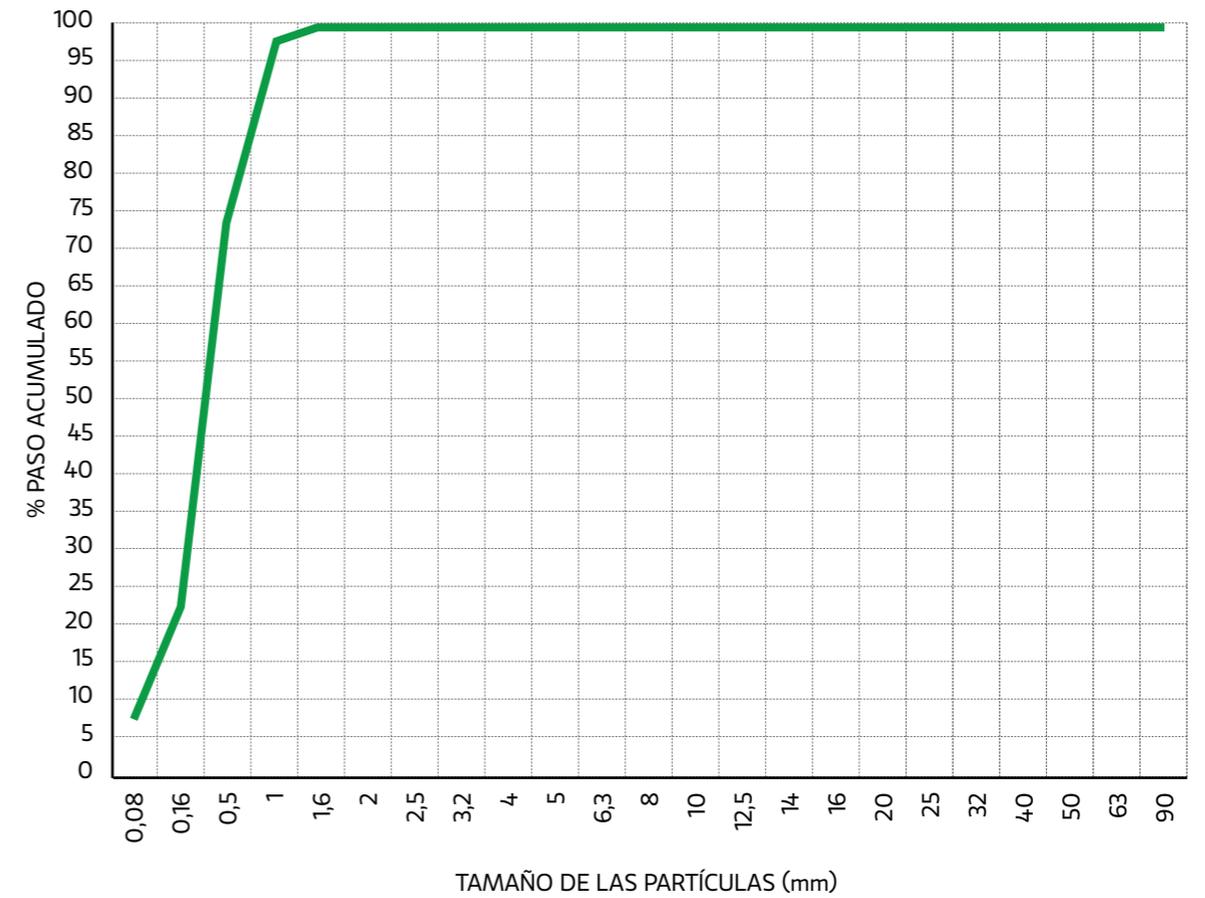
GRANULOMETRÍA DE PARTÍCULAS: MÉTODO DEL TAMIZADO (UNE-EN 933-1:1998 Y A1:2006)

CURVA GRANULOMÉTRICA MOKA-1



GRANULOMETRÍA DE PARTÍCULAS: MÉTODO DEL TAMIZADO (UNE-EN 933-1:1998 Y A1:2006)

CURVA GRANULOMÉTRICA MOKA-1A



## Materias orgánicas

Las muestras de este yacimiento están exentas de *materias orgánicas* en todos los casos.

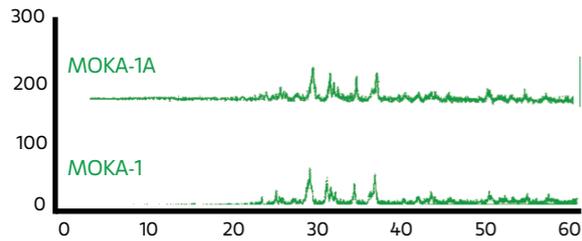


FIGURA 84. Representación de los difractogramas a partir del análisis de las muestras Moka-1 y Moka-1a mediante difracción por rayos x.

## Difracción de rayos x

Los resultados de los análisis por *difracción de rayos x* de las muestras Moka-1 y Moka-1a revelan la presencia de una fase mayoritaria compuesta por *feldespato* ( $d\text{Å} = 3,20$ ;  $2\theta = 27.770$  e  $I/\text{Máx} = 100\%$ ), con visible *albitización* ( $Ab: 71\% - An: 19\%$ ) (figura 84). Esta alteración pudo tener un carácter local, relacionado con el *auto-metasomatismo* producido en el seno del flujo de lava.

Las fases subordinadas corresponden a *cuarzo*, *hematita* y *dolomita*. La presencia de *dolomita* y *hematita*, específicamente en estas muestras, también puede ser un indicativo de cierto efecto hidrotermal que afectó a estas formaciones volcánicas.



Ciudad de Moka - Bioko Sur

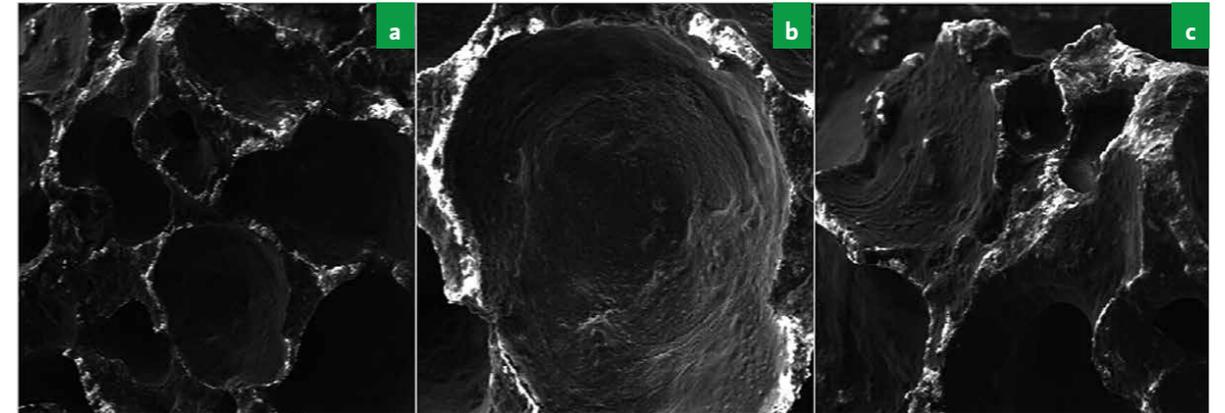


FIGURA 85 (a, b y c). Microfotografías de la muestra Moka-1 con diferentes aumentos mostrando detalles de las estructuras de una lava procedente del collado de Biaó-Belebú, muy próximo a la ciudad de Moka, en Bioko Sur.

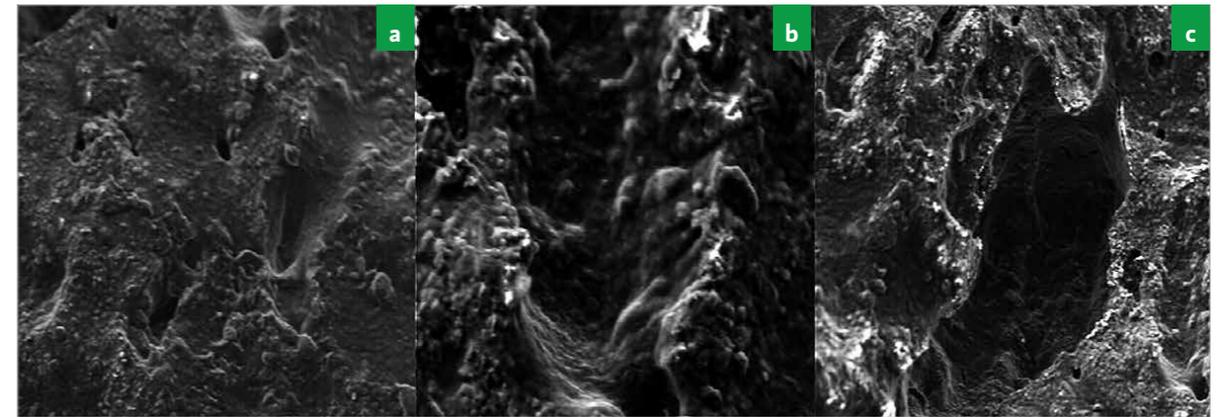


FIGURA 86 (a, b y c). Microfotografías tomadas con el microscopio electrónico donde se observan detalles de la micromorfología de la muestra Moka-1a.

Las rocas volcánicas tienen aspecto escoriáceo, con desarrollo de vesículas alargadas que indican el movimiento de la lava en las etapas previas a su enfriamiento.

## Microscopía electrónica de barrido

El análisis de la muestra *Moka-1* con el microscopio electrónico ofrece microfotografías que muestran una típica *escoria* volcánica de composición básica, con carácter prácticamente criptocristalino, con grandes vesículas vacías y de gran permeabilidad, testimonio del rápido escape de los gases. Presenta bordes irregulares, indicando un estado en el cual la *lava* se mantuvo en fusión y ebullición durante un tiempo significativo, tras alcanzar la superficie terrestre (figura 85).

Las microfotografías de la muestra *Moka-1a* (figura 86 *a, b y c*) permiten describir una roca volcánica con aspecto escoriáceo, con desarrollo de vesículas alargadas que indican el movimiento de la *lava* en las etapas previas a su enfriamiento.

En ninguna de las muestras analizadas se encuentra material secundario rellenando las vesículas, con lo cual podría interpretarse el carácter tardío de las erupciones que originaron estas *lavas*, donde no ha tenido lugar aún la formación de compuestos secundarios, como *zeolitas* y *arcillas*.

La *microscopía electrónica de barrido* tampoco detecta la presencia de especies vítreas, ni frescas ni desvitrificadas, lo que insta a interpretar la petrogénesis de estas rocas como productos de una *lava* basáltica fluida, cuyo calor intrínseco no se perdió bruscamente, sino de forma gradual, dando lugar a la formación de pequeños cristales. De este modo, no se dieron las condiciones para que se formara la fase vítrea, por tanto, las muestras analizadas están constituidas mayormente por cristales formados por una fase importante de sílice (44,39 - 44,40%), de la cual sólo es reactiva una porción comprendida entre el 15,60 y el 15,64%, respectivamente (ver tabla 25).

Esta es una de las razones por la cual los materiales volcánicos de la localidad de *Luba-Moka* se comportan como *puzolanas* de reactividad moderada a baja.

**La reactividad puzolánica de las rocas volcánicas de Moka tiene un carácter lento en el tiempo, pero con tendencia a desarrollarse en períodos cercanos a los 28 días.**

**TABLA 25:** Resultados de los análisis químicos arrojados por las muestras Moka-1 y Moka-1a (UNE-EN 196-2:2006).

DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS	MUESTRAS	
	Moka-1 (%)	Moka-1A (%)
SiO <sub>2</sub> TOTAL	44,40	44,39
MgO	4,22	4,25
CaO TOTAL	9,32	9,30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,63	13,63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,58	15,53
SiO <sub>2</sub> REACTIVA	15,64	15,68
CaO REACTIVA	9,24	9,21
R.I.	54,91	54,88
SiO <sub>2</sub> /(CaO + MgO)	3,8	3,5



**Flora y litología de Moka**

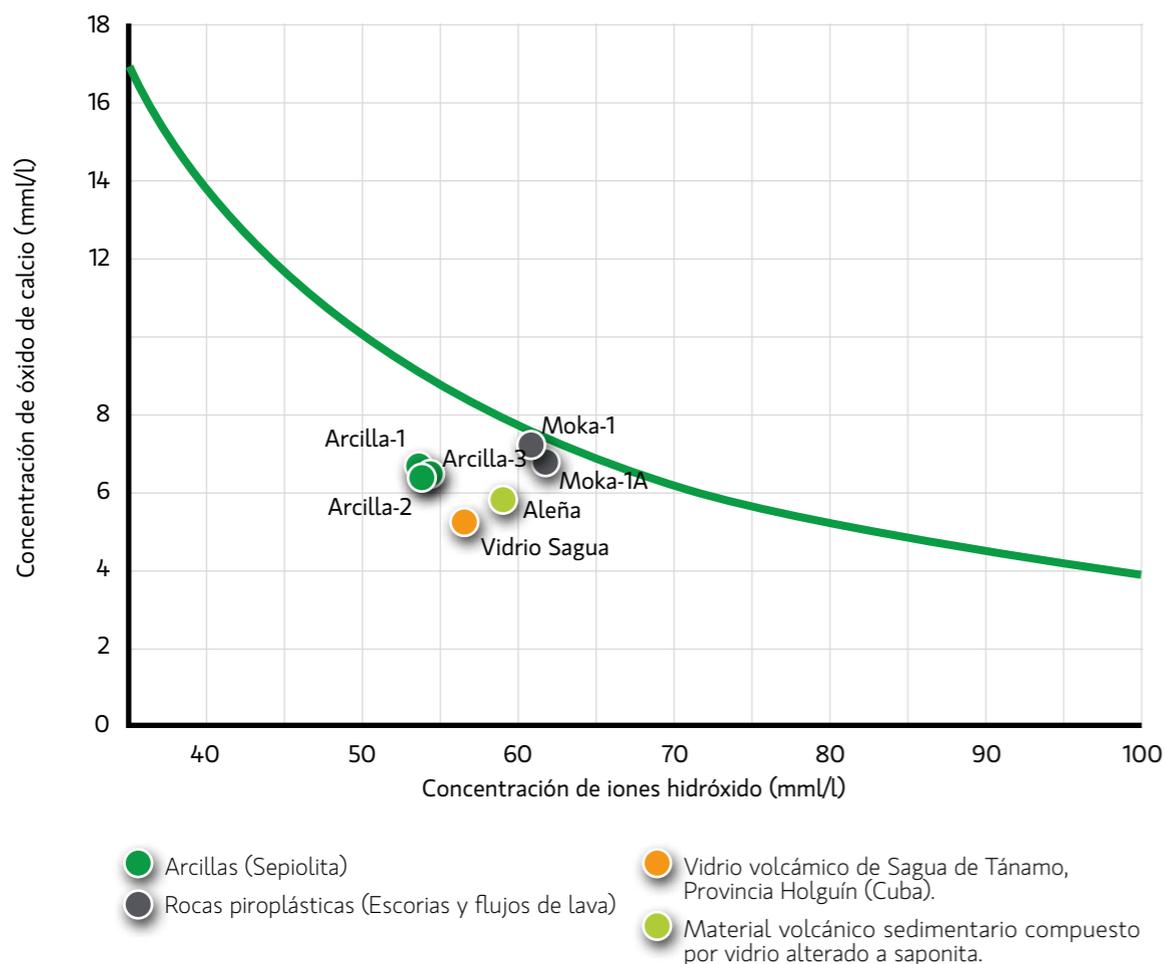


FIGURA 87. Representación gráfica del comportamiento puzolánico de las muestras *Moka-1* y *Moka-1a*, en relación con otras *puzolanas* procedentes de los yacimientos de *Guinea Ecuatorial* y de *Cuba*.

## Análisis químicos

Los resultados de los análisis químicos ubican estas rocas extrusivas entre los productos de categoría media en la evaluación cualitativa como posibles agregados del *clínker* de los *cementos puzolánicos*; es decir, la actividad de la *sílice reactiva* está por debajo del 25% (*UNE-EN 196-2:2006*) en las dos muestras analizadas. No obstante, el cálculo de la relación  $SiO_2 / (CaO + MgO)$  (*Moka-1*: 3,8% y *Moka-1a*: 3,5%) arroja valores que las ubican justamente en el límite (3,5%), incluso por encima de éste, marcado por la citada *norma* (tabla 25).

La discreta reactividad de la componente silícea ( $SiO_2$  reactiva) de estas muestras (tabla 25) no debe considerarse como una incapacidad de estos materiales para desarrollar reactividad hidráulica con el *cemento* en presencia de agua; al contrario, indica que su reacción tiene un carácter *lento* en el tiempo, pero con tendencia a la reactivación cuando se alcanzan períodos cercanos a los 28 días (Costafreda, J.L., 2008). Esto se corrobora con los resultados obtenidos a partir de los análisis químicos de *puzolanidad* a 7 días (*UNE-EN 196-5: 2006*), según los cuales estas muestras son *puzolánicas*; aunque exhiben los valores más bajos de concentración en *iones hidroxilo* y en *óxido de calcio* en relación a la *isoterma de solubilidad* (figura 87).

## Análisis químico de puzolanidad

Durante la ejecución de los análisis químicos de *puzolanidad* se testaron otras *puzolanas* a fin de establecer una comparación razonada con las muestras *Moka-1* y *Moka-1a*, llegándose a la conclusión de que estas últimas son las que poseen menor reactividad puzolánica para un período de 7 días (figura 87). Existe una lógica coincidencia entre este hecho y la evidencia que ofrecen los resultados de la composición química detallados en la tabla 25, donde los contenidos en compuestos reactivos de *Moka-1* y *Moka-1a* son sensiblemente bajos, respecto a los determinados en las otras muestras.

La duración de los ensayos de *puzolanidad* comprende un período normalizado de 7 días (*UNE-EN 196-5: 2006*) (tabla 26), sin embargo, las muestras pueden testarse opcionalmente durante un período más prolongado que pueda llegar incluso a los 15 días; este detalle podría tenerse en cuenta, a manera de recomendación, para seguir ensayando las *rocas volcánicas* de la localidad de *Luba-Moka*, con la seguridad de que sus propiedades puzolánicas podrían acentuarse con el transcurso del tiempo.

De acuerdo con la interpretación de los resultados que aparecen en la tabla 26 y en la figura 87, las muestras *Moka-1* y *Moka-1a* poseen reactividad puzolánica frente al  $Ca(OH)_2$ .

**TABLA 26:** Resultados de los análisis químicos de *puzolanidad* para las muestras *Moka-1* y *Moka-1a*.

MUESTRA: MOKA-1			
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l
1	1,023	29,70	60,8
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,030 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l
1	0,985	11,77	7,0
RESULTADOS			
DÍAS	7	PUZOLÁNICO	SÍ

MUESTRA: MOKA-1a			
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l
1	1,023	29,0	61,6
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,030 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l
1	0,985	11,80	6,6
RESULTADOS			
DÍAS	7	PUZOLÁNICO	SÍ

**TABLA 27:** Resultados de los ensayos físicos para la determinación de los tiempos de inicio y final de *fraguados*, así como la *estabilidad de volumen* de la masa de *morteros* elaborados a base de *rocas volcánicas* de la zona *Luba-Moka* (UNE-EN 196-3:2005+A1: 2009).

MUESTRA	HORA (h)	AGUA (%)	FRAGUADOS			ESTABILIDAD DE VOLUMEN/EXPANSIVIDAD (mm)	
			PRINCIPIO (horas)	FINAL (horas)	TOTAL (minutos)		
Moka-1	8:40	123	11:35	12:10	PF 175 min	1	0,0 mm
					FF 210 min	2	
						3	0,0 mm
Moka-1a	12:42	123	15:37	16:12	PF 175 min	1	0,0 mm
					FF 210 min	2	
						3	0,0 mm

### Tiempos de inicio y final de fraguado y estabilidad de volumen

Para la evaluación de la calidad y posible aplicación de las *rocas volcánicas* de los yacimientos de la *Isla de Bioko* se llevó a cabo el estudio de los tiempos de principio y final de *fraguado*, así como la determinación de posibles expansiones de la masa de los *morteros* elaborados con parte de estas *puzolanas*, en un régimen de humedad relativa del 67,9% y temperatura ambiental cercana a los 19,1°C (UNE-EN 196-3: 2005+A1: 2009). La tabla 27 ofrece una información detallada sobre los resultados obtenidos.

Los tiempos de inicio y final de *fraguado* son visiblemente mayores que los calculados para un *cemento pórtland*, esto es consecuencia de la naturaleza y el comportamiento de los materiales *puzolánicos* empleados en este ensayo. Para un *cemento pórtland* ordinario, el *tiempo de fraguado* inicial varía entre 1 y 4 horas, aproximadamente, mientras que el *tiempo de fraguado* final se completa entre las 3 y las 7 horas.

No se determinan valores positivos en el estudio de la *estabilidad de volumen*, por lo que se concluye que las mezclas elaboradas con las muestras *Moka-1* y *Moka-1a* son estables y no producen *expansividad* ni *retracción*.

La norma UNE EN 196-1:2005 señala como válidos aquellos valores de *expansividad* que son menores o iguales que 10 mm y los del tiempo de *fraguado* inicial que superen los 75 minutos. De acuerdo con estas aseveraciones, los resultados presentados en este epígrafe son positivos.

### Consistencia del mortero fresco

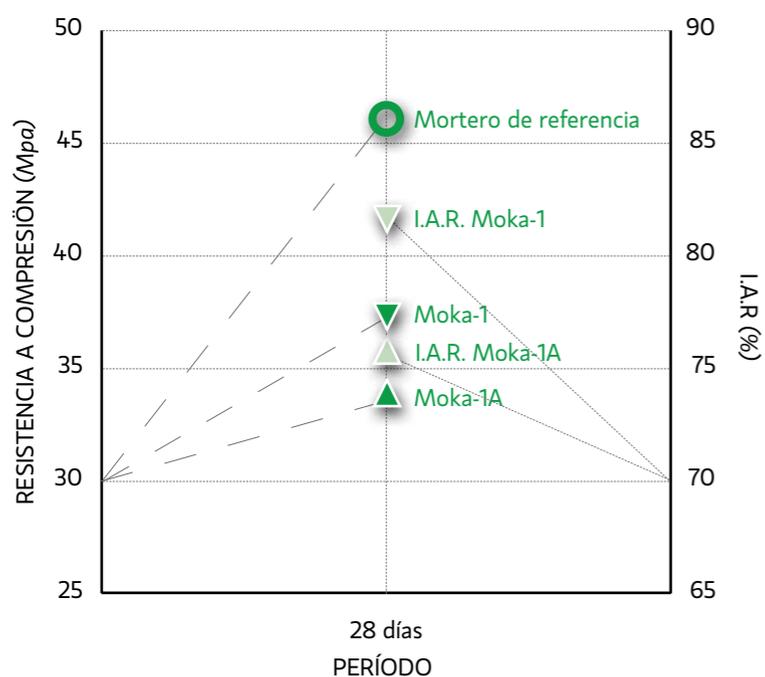
Para la realización de este ensayo se fabrican previamente tres tipos de mezclas de *morteros* en condiciones normalizadas como una temperatura ambiental en torno a los 19,9°C, *humedad relativa* cercana al 76,8% y agua cuya temperatura ronde los 18,6°C (UNE-EN 1015-3).

En la denominada muestra *patrón* el *cemento pórtland* representa el 100%, con las correspondientes cantidades de *arena normalizada* y agua destilada. En las muestras que resultan de la dosificación de mezclas mixtas, el *cemento pórtland* está presente en un 75%, mientras que las *puzolanas* constituyen el 25%, además de las porciones normalizadas de *agua* y *arena*.

En todos los ensayos de *consistencia* para este tipo de material la *densidad aparente* del *mortero* fresco suele ser mayor de 1.200 Kg/m<sup>3</sup> por lo que, según la norma UNE-EN 1015-3, el valor del *escurrimiento* debe ser 175 ±5 mm.

**TABLA 28:** Detalles de la dosificación de los tres tipos de muestras de morteros para la determinación de la consistencia en estado fresco. Se aporta información sobre el peso de la arena normalizada y el valor del diámetro del escurrimiento mediante sacudidas (UNE-EN 1015-3).

	DOSIFICACIÓN DEL MORTERO	PESO DE LA ARENA (g)	DIÁMETRO DE ESCURRIMIENTO (mm)	
			Diámetro 1	Diámetro 2
1	100% Cemento p <sup>o</sup> rtland + Arena normalizada + 225 g de Agua destilada (MUESTRA PATRÓN)	1348,6	Diámetro 1: 180 Diámetro 2: 180	Diámetro medio 180
4	75% Cemento p <sup>o</sup> rtland + 25% Roca volcánica (Moka-1) + 230 g de Agua destilada.	1349,4	Diámetro 1: 180 Diámetro 2: 185	Diámetro medio 182,5
5	75% Cemento p <sup>o</sup> rtland ++ 25% Roca volcánica (Moka-1a) + 230 g de Agua destilada.	1348,6	Diámetro 1: 180 Diámetro 2: 175	Diámetro medio 177,5



**FIGURA 88.** Evolución de las resistencias mecánicas normales y comportamiento del Índice de Actividad Resistente, calculado para un período de 28 días.

La tabla 28 muestra con pormenorizado detalle los elementos de los morteros mixtos así como del patrón e incluye, además, los resultados del escurrimiento mediante el empleo del método de sacudidas (UNE-EN 1015-3).

Según estos resultados, los morteros frescos elaborados con las muestras Moka-1 y Moka-1a poseen una adecuada consistencia que les da el carácter de mezclas con buena trabajabilidad.

**TABLA 29:** Resultados de las resistencias mecánicas, del cálculo del Índice de Actividad Resistente y del pesaje de las probetas, para un período de 28 días.

CEMREF	MOKA-1	MOKA-1A
<b>RESISTENCIA MECÁNICA A COMPRESIÓN (Mpa)</b>		
A 28 días		
46,1	37,6	34,7
<b>ÍNDICE DE ACTIVIDAD RESISTENTE (%)</b>		
-	81,6	75,3
<b>PESO DE LAS PROBETAS</b>		
A 24 horas		
588,8	595,2	599,2
591,2	596,7	600,8
591,8	597,0	601,3
A 28 días		
596,5	601,2	602,8
596,1	602,0	604,3
593,8	601,7	604,8

## Resistencias mecánicas

Los diseños de mezclas descritos en el epígrafe anterior se han empleado también en la elaboración de probetas para obtener informaciones relativas al comportamiento mecánico de morteros elaborados con adiciones de las muestras Moka-1 y Moka-1a.

En este estudio se prescinde del cálculo de las resistencias iniciales a 2 y 7 días, y se centra en la determinación de las resistencias normales, calculadas para 28 días de curado.

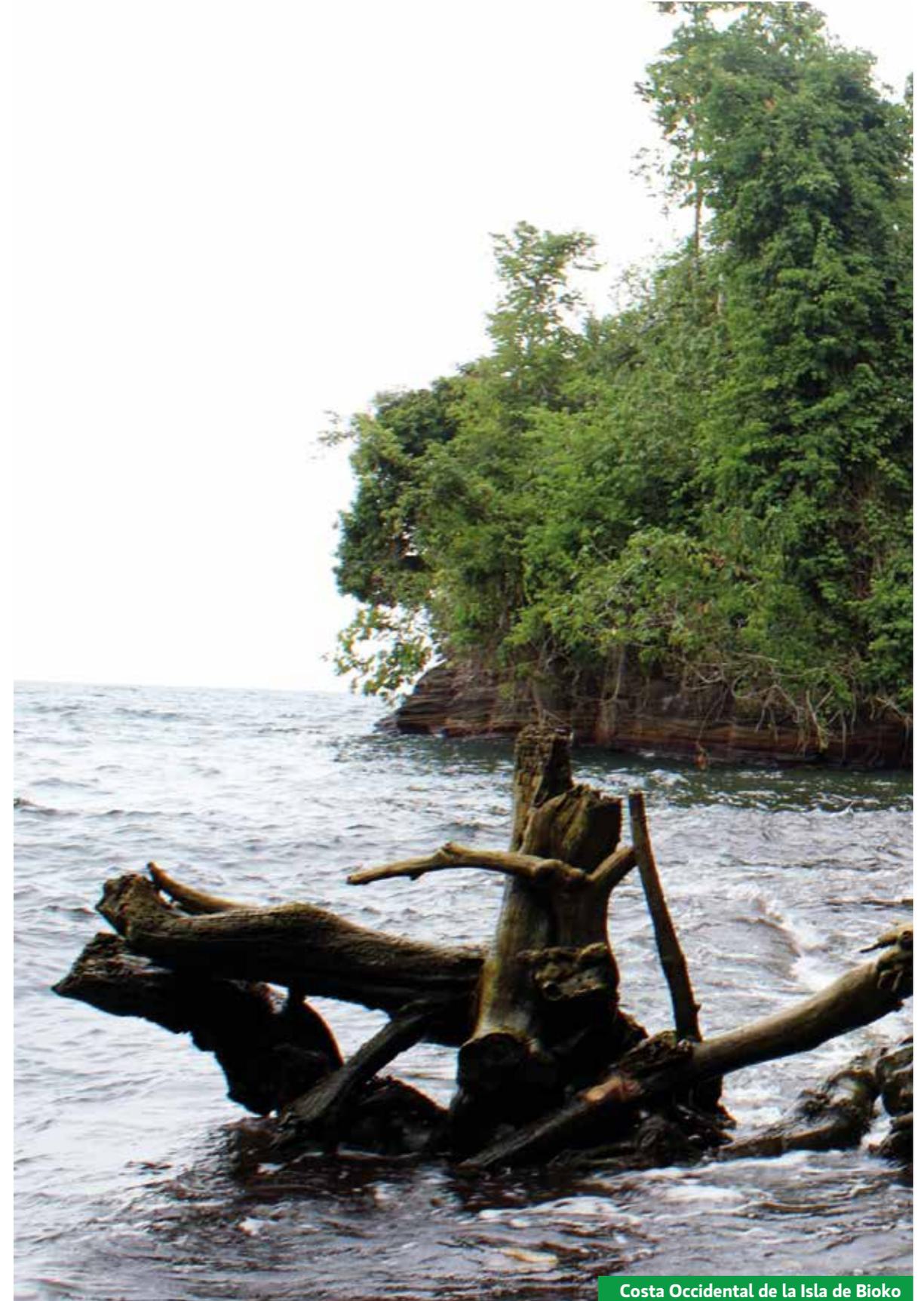
Según la tabla 29, las resistencias mecánicas de los morteros diseñados con este tipo de puzolana no igualan ni superan a las obtenidas para el mortero patrón, sin embargo, los valores encajan dentro de los límites mínimos y máximos ( $\geq 32,5 - \leq 52,5$ ) que impone la norma UNE EN 196-1:2005 a los cementos con resistencia inicial (32,5 N- 32,5 R).

Los resultados obtenidos con el cálculo del Índice de Actividad Resistente (Moka-1: 81,6% y Moka-1a: 75,3%), en relación con la resistencia de la probeta patrón, permiten establecer la calidad de las mezclas fabricadas con este tipo de puzolana (tabla 29 y figura 88).

Los resultados de los ensayos mecánicos destacan fielmente las características intrínsecas de las *rocas volcánicas* ensayadas en esta investigación. Desde el punto de vista de su composición química, menos de la mitad de la *sílice* que contienen estos materiales es reactiva. Esta pequeña cantidad de *sílice* junto al 15,58% de la *alúmina*, que representan las *fases ácidas* (tabla 25), no es suficiente para contrarrestar el efecto de los compuestos *alcalinos* y *alcalino-térricos* con sensible abundancia en estas muestras, por lo que las reacciones hidráulicas se tornan lentas y tardías. Esta es también la causa por la cual los resultados del ensayo de *puzolanidad* y del cálculo del Índice de Actividad Resistente ofrecen los más bajos valores, en comparación con otras muestras.

Por último, se debe insistir en que lo expuesto no menoscaba el valor tecnológico de las *rocas volcánicas* de los yacimientos de la región de *Luba-Moka* como *puzolanas*, antes bien, se podría argumentar que su comportamiento está dentro de las propiedades normales que caracterizan a cualquier *puzolana*.

El análisis y la interpretación de los resultados obtenidos permiten concluir que las *rocas volcánicas* originadas durante las erupciones del volcán *Basilé*, así como las de los centros de emisión localizados en *Bioko Sur* (*Luba* y *Moka*), son *puzolánicas*.

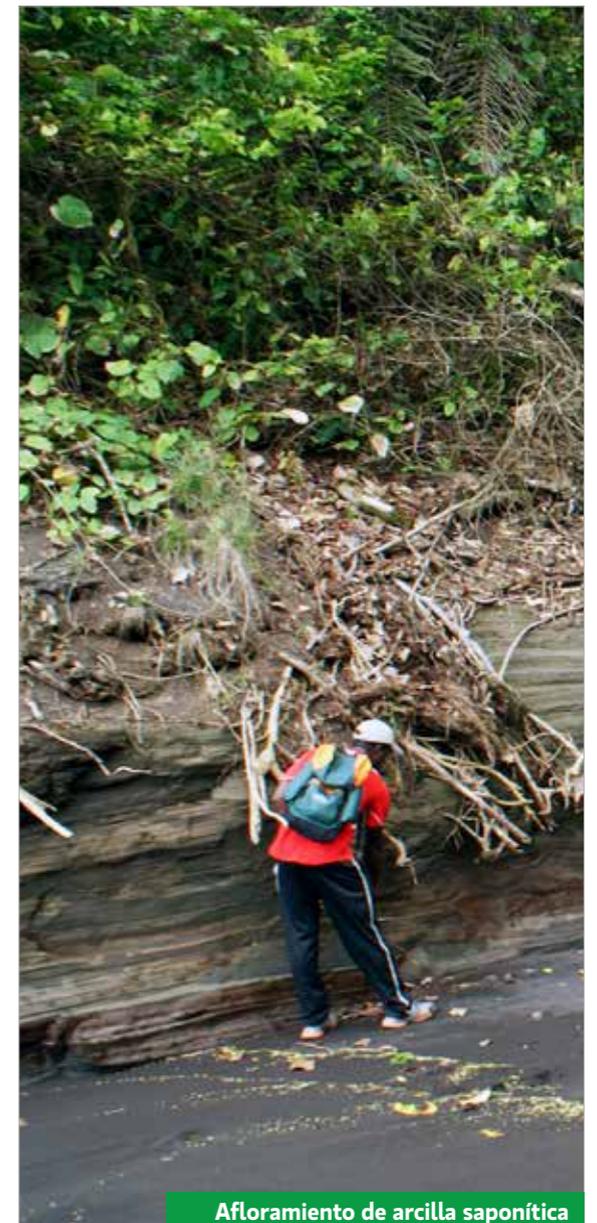


Costa Occidental de la Isla de Bioko

## YACIMIENTO DE ARCILLAS SAPONÍICAS DE ALEÑA

Los análisis realizados mediante el método de *difracción de rayos x* demuestran que las fases principales encontradas en la muestra de la localidad de Aleña (*Aleña-1*), Luba, son la *saponita* y la *moscovita-illita*. Estas especies minerales son las que forman los picos principales y particularmente intensos que aparecen en las figuras 89 y 90. Las fases secundarias están representadas por el *cuarzo*, que se encuentra en forma de esporádicos indicios, y exiguas trazas de *feldespatos*.

A juzgar por las especies que aparecen, se corrobora que estos minerales se han formado a partir de la alteración de productos volcánicos expulsados por el volcán *Basilé* (figuras 91 y 92).



Afloramiento de arcilla saponítica



POLITÉCNICA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA  
LABORATORIO CENTRALIZADO

ANÁLISIS POR DIFRACTOMETRÍA

REFERENCIA MUESTRA: *Aleña-1*

Especies químicas y mineralógicas encontradas:

Con picos intensos:

- 1º *Saponita*
- 2º *Moscovita (Illita)*

Con picos débiles:

- 1º *Cuarzo (indicios)*
- 2º *Feldespato (Traza)*

OBSERVACIONES:

Madrid, 23 de marzo de 2012  
Fdo.: Laboratorio Centralizado

FIGURA 89. Especies químicas y mineralógicas detectadas en la muestra Aleña-1.



POLITÉCNICA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR

NOMBRE DE LA MUESTRA: *Aleña-1*

PC-APD, DIFFRACTION SOFTWARE.

Data File name: *Aleña-1*

Diffractometer: PW1710  
 X-ray tube: Cu BF 40 kV 50 mA  
 Wavelength (a1, a2): 1,54060 1,54438  
 Monochromator: YES  
 Divergence slit: AUT  
 Irradiated length: 12 mm  
 Receiving slit: 0,1  
 Range 2theta: 4,000 - 60,000  
 Step width, time: 0,020 0,60  
 Peaks file name: *Aleña-1*  
 Range d-value: 1,5406 - 22,0720  
 Range tip width: 0,00 2,00  
 Minimum significance: 1,75  
 Conversion to: FIXED

Peaks N°	d-value (ang)	Angle (deg)	Width (deg)	Peak (cts)	Back g (cts)	I / I <sub>max</sub> (%)	Significance
1	4,4983	19,720	0,640	19	4	42,27	2,12
2	3,3379	26,685	0,140	35	7	84,99	2,85
3	3,2071	27,795	0,480	41	7	100,00	5,11
4	2,9928	29,830	0,140	40	7	96,90	2,60
5	2,5222	35,565	0,480	27	8	66,02	2,94
6	2,1175	42,665	1,280	7	6	16,50	2,04
7	1,6218	56,715	1,120	5	6	12,92	1,95

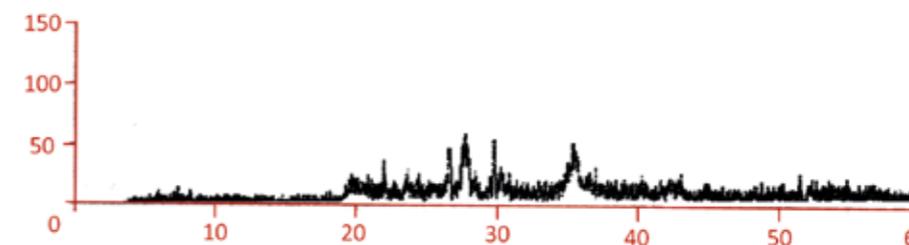


FIGURA 90. Derivatograma de la muestra Aleña-1.

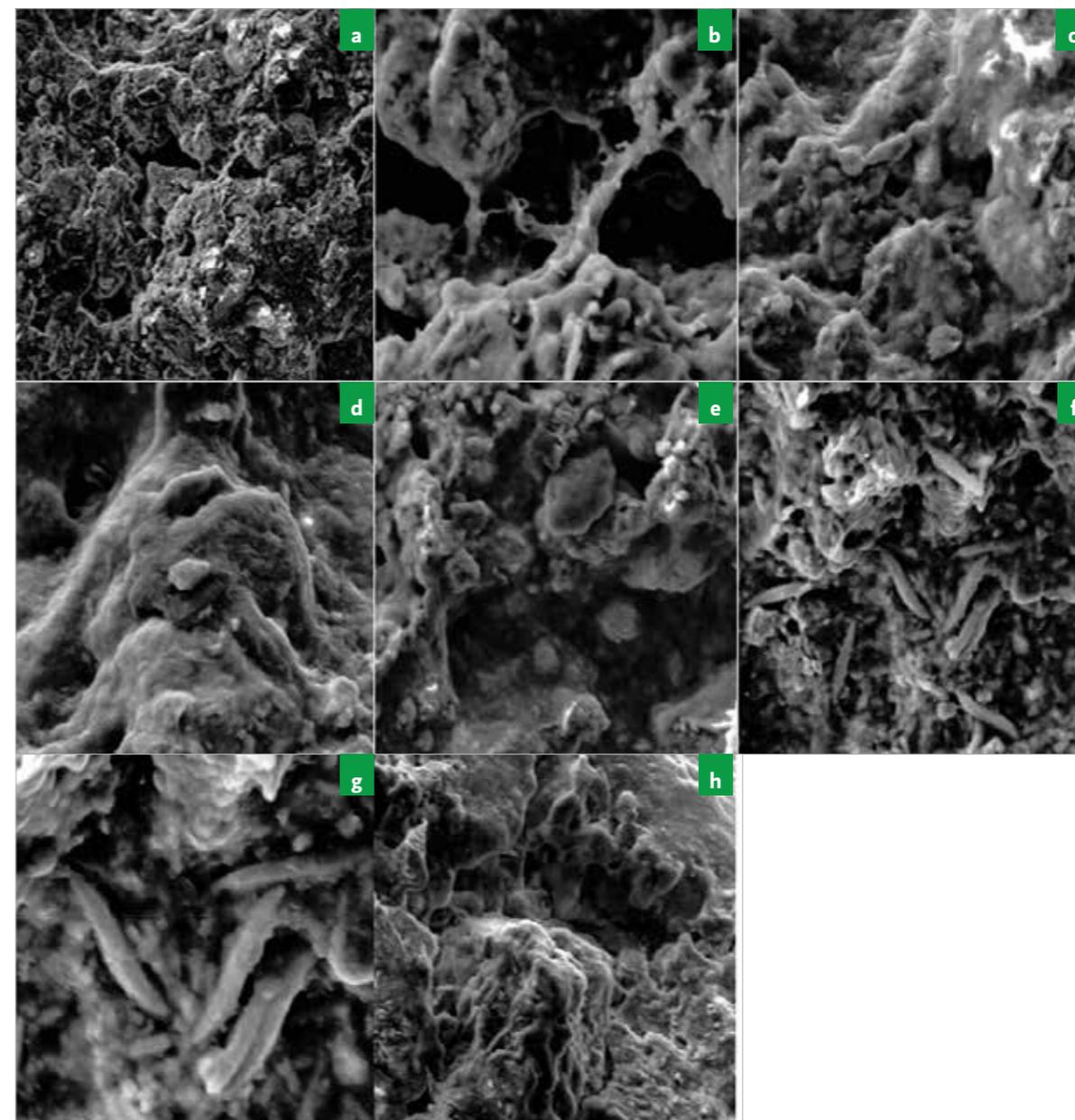


➤ **FIGURA 91.** Vista parcial de un afloramiento ubicado en el lado norte del yacimiento de *Aleña*, compuesto por productos volcanosedimentarios alterados significativamente a *arcillas saponíticas*. Obsérvese las perturbaciones que presentan los estratos en algunos lugares, testimonio de la acción del oleaje en un momento en que el material volcánico, aún caliente, entró en contacto directo con el agua de mar (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).



➤ **FIGURA 92.** Vista parcial que muestra otro afloramiento similar al que se describe en la figura anterior que se encuentra en el lado sur del yacimiento de *Aleña*. Nótese que la perturbación de los estratos a causa del oleaje aún persiste en este punto (Fuente: Costafreda, J.L., 2012).

Los depósitos de saponitas pudieron formarse mediante una combinación de varios procesos.



➤ **FIGURA 93 (a, b, c, d, e, f, g, y h).** Microfotografías capturadas con diferentes aumentos en las que pueden apreciarse las variedades morfológicas de las especies minerales que componen la muestra *Aleña-1*. La presencia dominante del vidrio permite distinguir su alteración mediante el proceso de *esmectización*, formando la *saponita*. Otras especies están presentes aunque en menor cuantía, como el *feldespato* y la *mica*.

La alteración pudo haber sido derivada del efecto de la actividad hidrotermal, pero también es muy probable la existencia de procesos conjugados de *sedimentación* y *diagénesis* temprana. La presencia de *saponita* puede indicar una fase específica del proceso de *esmectización* sufrido por los materiales piroclásticos finos con ciertos contenidos en *vidrio volcánico* que posteriormente se desvitrificó convirtiéndose en *arcilla* por la influencia de las disoluciones hidrotermales, portadoras de una doble componente más o menos significativa de *sodio* y *magnesio*. Asimismo, la presencia de *illita* puede interpretarse como el producto de otra fase de alteración de la *moscovita* por *hidrólisis*, tal vez en condiciones de meteorización. La *illita* también pudo ser originada por la alteración de las *plagioclasas* cálcicas presentes en las coladas.

Los afloramientos de la localidad de *Aleña* consisten en potentes acumulaciones de volcanosedimentos de origen piroclástico distinguibles por su fina granulometría, en forma de *cenizas*, *lapilli*, *ignimbritas* y *tufitas*, alterados por un incipiente proceso de *bentonización*.

Las microfotografías muestran claramente la existencia de especímenes de *arcillas saponíticas* de color gris claro hasta blanco, de morfología irregular, que predominan sobre las demás especies minerales (figura 93 A, B, C, D, E, F, G y H).

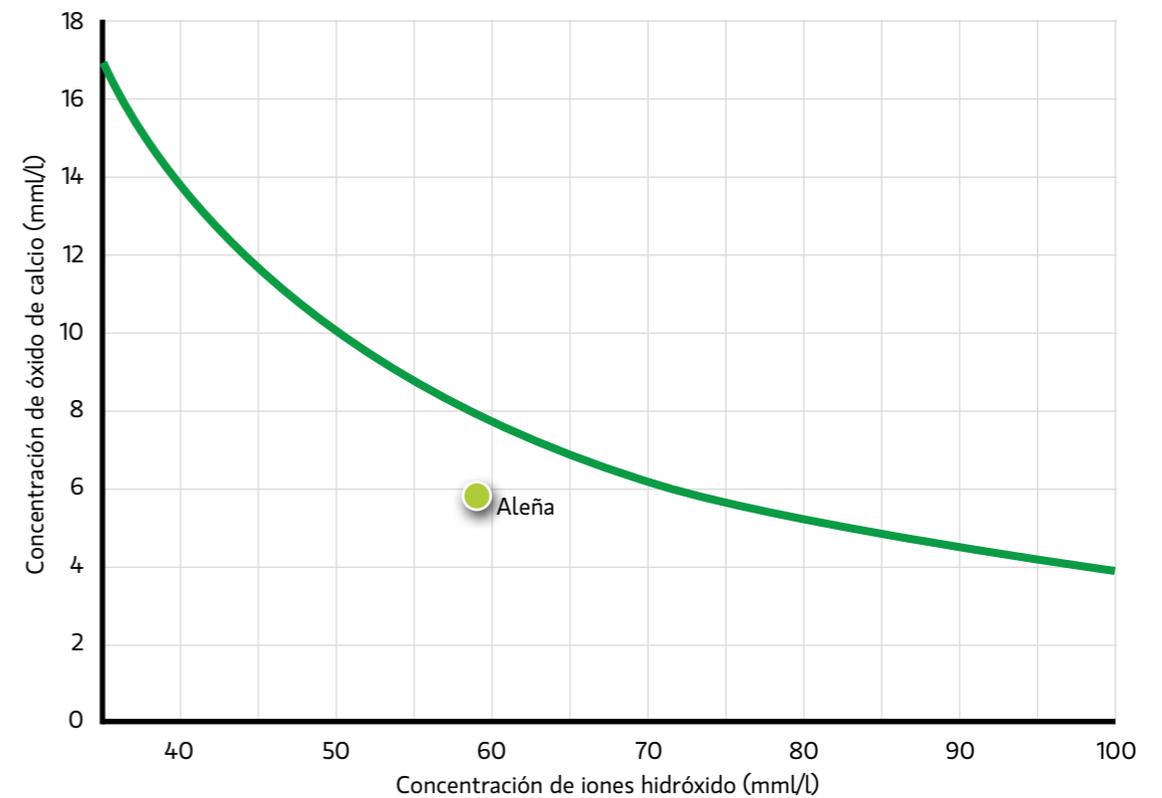
La microfotografía A (340x - 176 µm) permite describir agregados vítreos alterados, hidratados y desvitrificados que transicionan a *arcilla* de tipo *saponita*. En la microfotografía B (1.700x - 35 µm) coexisten *saponita* y escasos individuos de *mica* y *feldespato*.

En las microfotografías C y D, ambas a 1.200x (50 µm), se observa una gran profusión de especímenes de *saponita*, a los que se asocian escasamente *mica* y *vidrio volcánico*.

En E predomina *vidrio* alterado, parcialmente hidratado y en plena transformación a material arcilloso. Son visibles, además, algunos cristales de *feldespato*. En F se destacan algunos granos de *mica* dispuestos aleatoriamente en todo el campo visual. Se observa también *saponita* y *vidrio* alterado

**TABLA 30:** Resultados de los análisis químicos de *puzolanidad* para la muestra *Aleña-1*, obtenidos tras un período de ensayo de 7 días.

MUESTRA: ALEÑA-1			
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l
1	1,023	28,80	58,9
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,030 M (ml)	CONCENTRACIÓN mmol/l
1	0,985	9,72	5,7
RESULTADOS			
DÍAS	7	PUZOLÁNICO	SÍ



**FIGURA 94.** Representación gráfica de los resultados de los análisis químicos de *puzolanidad* a 7 días obtenidos a partir del estudio de la muestra *Aleña-1*.

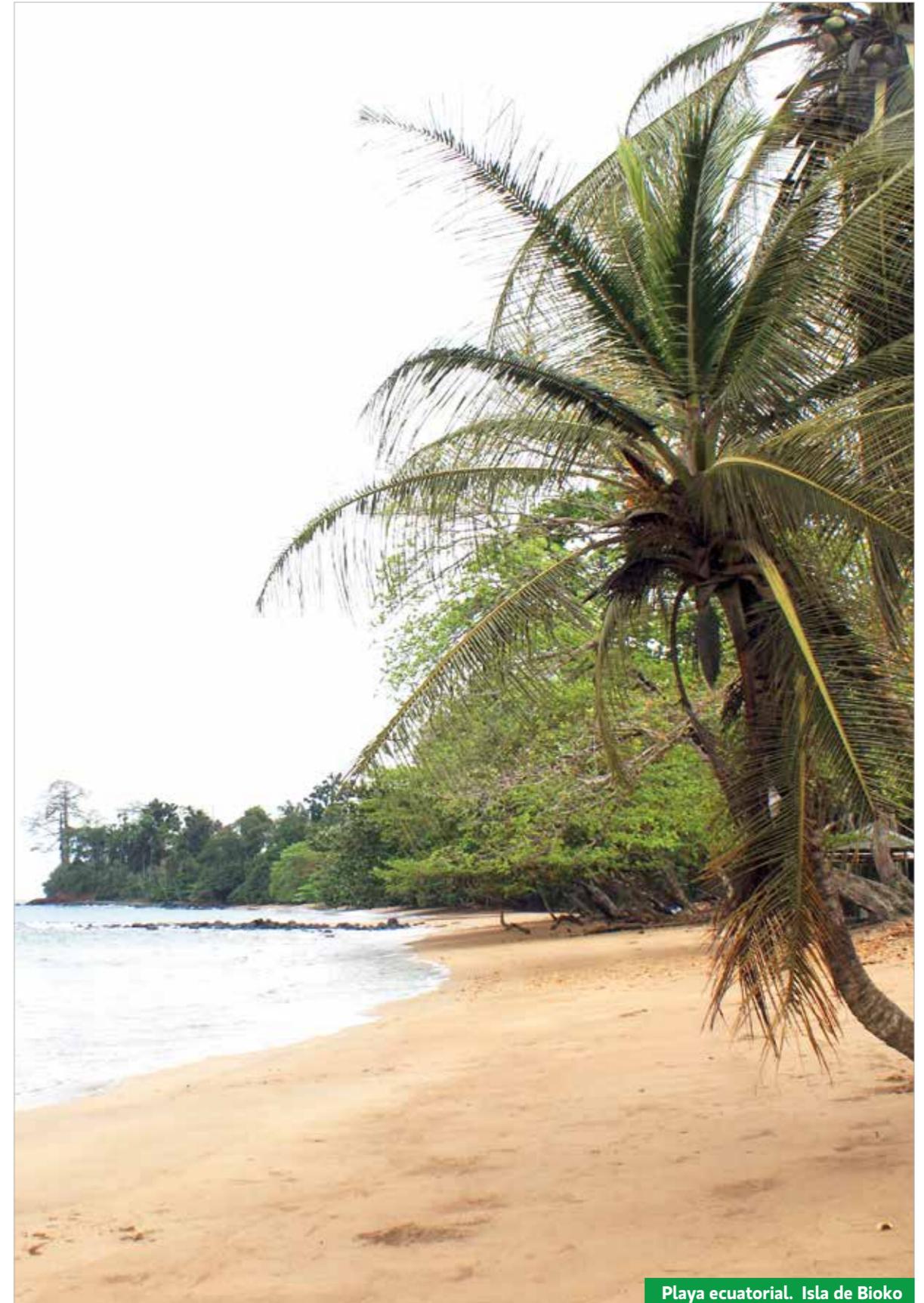
### Análisis químico de puzolanidad

La muestra *Aleña-1*, formada por la alteración de materiales volcánicos mayormente vítreos y posteriormente *desvitrificados* que se transformaron parcial o totalmente en *saponita*, exhibe propiedades puzolánicas importantes (tabla 30 y figura 94). En este caso, es lógico deducir que la presencia de materiales vítreos influye radicalmente en el comportamiento puzolánico de este material.

Del mismo modo, el análisis para determinar el contenido en *materias orgánicas* y *humus* establece la ausencia de estos componentes nocivos.



Costa occidental de la Isla de Bioko



Playa ecuatorial. Isla de Bioko

## CONSIDERACIONES FINALES

### Arenas silíceas

De cara a las aplicaciones, se debe tener en cuenta que el alto contenido en *sílice*, la apreciable presencia de *alúmina* y la ausencia de *materias orgánicas* son premisas determinantes para emplear estos materiales en la fabricación de *ladrillos refractarios*. Por otra parte, el predominio de la fracción fina, las bajas proporciones de *mica* y el déficit de *sulfatos*, podrían ser datos decisivos para su utilidad en los revoques y acabados de las paredes interiores y fachadas de edificios.

Una buena parte de las partículas de *arenas silíceas* estudiadas pasan por el tamiz de 0,80 mm y se retienen en el de 0,1 mm, ello permite su empleo como árido fino, bien para *morteros*, bien para revoques y rellenos. Asimismo, el estudio *granulométrico* realizado separa una fracción importante en el *huso granulométrico* 0,50 - 0,32 mm; esto, sumado a la pureza de estas *arenas*, podría tomarse en cuenta para la elaboración de ciertos filtros destinados a la potabilización de las aguas, y en la fabricación de materiales abrasivos.

A pesar de que en muchos casos se exige cerca del 95% de  $\text{SiO}_2$  en la fabricación de *vidrios* y *arenas metalúrgicas*, es importante valorar su aplicación en este aspecto.

Los contenidos significativos en  $\text{SiO}_2$  (*total*) cristalina, en contraste con los porcentajes en  $\text{SiO}_2$  *reactiva*, en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y en  $\text{MgO}$ , convierten estas *arenas* en materiales poco o nada *puzolánicos*, inservibles para ser triturados conjuntamente con el *clínker* de los *cementos*; sin embargo, a semejanza de las *arenas normalizadas*, son adecuadas como áridos finos para la elaboración de *morteros* y *hormigones*.

Un buen índice para su uso es el conocimiento de los porcentajes en  $\text{SiO}_2$ , *feldespato* y *arcilla*. Por citar un ejemplo, muchas empresas europeas trabajan con proporciones de 65% de *sílice*, 30% de *feldespato* y un 5% de *arcilla*; esta última constituye la fracción fina dentro del proceso y está considerada como un producto residual indeseable, fundamentalmente por la complejidad que representa su gestión.

Por otro lado, en algunos yacimientos importantes de *arenas silíceas* el contenido en  $Al_2O_3$  oscila entre un 15 y un 17%, mientras que el  $K_2O$  supera el 10%. Las *arenas silíceas* del yacimiento *El Cacahual* tienen contenidos en  $SiO_2$  que alcanzan prácticamente el 90%, mientras que la  $Al_2O_3$ , mucho más baja que en los ejemplos modélicos que se acaban de citar, puede llegar al 10%. Otros compuestos, como el  $CaO$  y el  $MgO$ , son prácticamente despreciables en la constitución de estas *arenas*, y en ningún caso superan el 1%.

Como complemento a lo expresado en el párrafo anterior, se cuenta con valores adecuados de resistencia obtenidos a partir de los ensayos mecánicos a 28 días. La comparación de estos resultados con los arrojados durante el estudio de las probetas de *mortero* de referencia o *patrón*, indica que la diferencia entre ambos no constituye un aspecto negativo si se tiene en cuenta que la muestra referente ha sido diseñada con los criterios de la *norma UNE-EN 196-1:2005*, en la que se puntualiza el uso de *arenas normalizadas* rigurosamente testadas (*CEN EN 196-1*).



Afloramiento de arenas silíceas

Dicho lo anterior, es irrefutable que las *arenas silíceas* de *El Cacahual* son aptas para sustituir a las *arenas normalizadas* a nivel industrial. No obstante, se debe insistir hasta la saciedad que para su empleo a gran escala hay que tener en cuenta siempre sus propiedades físicas y químicas, haciendo hincapié en la dureza y en la resistencia química.

En las condiciones de *Guinea Ecuatorial*, donde gran parte de los insumos de construcción proceden del exterior, las *arenas silíceas* podrían ser destinadas a la fabricación de *vidrio*, fundamentalmente para la elaboración de botellas, cristales y otros enseres de primerísima necesidad.

La no existencia de fuentes de aguas potables puede ser uno de los pretextos que inspiren el desarrollo de proyectos destinados al estudio y la investigación de estas *arenas* para su posible uso como *lechos filtrantes* en la depuración y potabilización de las aguas de los principales cursos fluviales.



FIGURA 95 (a y b). Vistas lateral y frontal de un *trommel* empleado en la clasificación por vía húmeda del *todo-uno* extraído de un yacimiento europeo de *arenas silíceas* (Fuente: Costafreda, J.L., 2017).

En el mercado emergente de *Guinea Ecuatorial*, el uso de las *arenas silíceas* para la fabricación de *lejías*, *abrasivos industriales* y *arenas de chorreo* puede ser un buen destino a tener en cuenta. Asimismo, podría añadirse a este amplio abanico de usos la fabricación de detergentes y pinturas, como también en las mezclas de *morteros* para los estucos y en los denominados *suelos anti-deslizantes*, muy empleados en las áreas deportivas y recreativas. Sectores dedicados a la cerámica, los elementos aislantes, los *cementos*, los *morteros*, los *hormigones* y los materiales refractarios encontrarían en estas *arenas*, sin lugar a dudas, una suerte de materia prima de incomparable eficacia.

Dado su alto punto de fusión, podrían recomendarse para la elaboración de moldes en los procesos industriales de *fundición* y *siderúrgicos*, lo cual podría revolucionar desde sus cimientos el panorama económico de ese país.

Sin embargo, las empresas que se dedican a la explotación de este tipo de yacimientos suelen tener muy en cuenta los factores y elementos que determinan el proceso más idóneo que condicione positivamente la obtención de los rendimientos y las calidades esperadas. Básicamente, el *todo-uno*, es decir el conjunto volumétrico compuesto por la *arena* tal y como se extrae del yacimiento, debe ser lavado de forma integral en una etapa inicial; a continuación, se clasifica según las fracciones *granulométricas* que contenga empleando para ello grandes cantidades de agua, mediante el esquema de tratamiento conocido como *vía húmeda* (figura 95 a y b). Este proceso genera ingentes volúmenes de material fino, cuya granulometría ofrece tenaces resistencias a la pérdida de agua mediante los procesos comunes de gravedad, siendo necesario el uso de métodos de deshidratación mecánica por presión con filtros de prensa (figuras 96 y 97).



➤ **FIGURA 96.** Proceso de secado de los productos finos extraídos de las arenas silíceas mediante el método de deshidratación mecánica por presión o prensado de filtros (Fuente: Costafreda, J.L., 2017).



➤ **FIGURA 97.** Vista parcial de un horno empleado en la clasificación y secado de arenas silíceas (Fuente: Costafreda, J.L., 2017).

## Arcillas sepiolíticas

El análisis de las fases mineralógicas de las muestras tomadas en el yacimiento *San Nicolás*, en la *Isla de Bioko*, establece un alto porcentaje de *sepiolita* monomineral y homogénea con fases subordinadas de *feldespato*, *hematita* y *caolinita*. La *sepiolita* se presenta, por lo general, como un mineral de color blanco a gris claro, con hábitos fibrosos y aciculares, pero llega a formar masas irregulares compactas y porosas que originan retículos y canales.

El estudio de la composición química revela contenidos en  $SiO_2$  total entre el 27,55% y el 28,30% en las tres muestras estudiadas. Los porcentajes de  $SiO_2$  capaz de reaccionar en mezclas hidráulicas varían entre el 26,71 y el 27,75%, por lo que prácticamente la masa total de la muestra es reactiva. Asimismo, los resultados obtenidos tras el cálculo de la relación  $SiO_2/(CaO + MgO)$ : 28,7% (*Arcilla-1*), 27,14% (*Arcilla-2*) y 29,84% (*Arcilla-3*), indican que estos materiales cumplen con los requerimientos químicos ( $\geq 3,5\%$ ) de la norma *UNE-EN 196-2:2006*.

Las variaciones experimentadas en la concentración de *hidróxido de calcio* respecto a la de *saturación* en una disolución que contiene *arcillas sepiolíticas* (25%) y *cemento pórtland* (75%), establecen las excelentes propiedades puzolánicas de las muestras analizadas. Asimismo, son de alta pureza, sin contenido en *materias orgánicas* y de *granulometría* fina, según lo cual las fracciones se concentran mayormente en los *husos granulométricos* 0,16, 0,50 y 0,80 mm.

Los *morteros* obtenidos mediante el diseño de mezclas que contempla la sustitución del *cemento pórtland* por *arcilla sepiolítica* hasta en un 25%, poseen una *consistencia* adecuada, son *trabajables* y tienen un diámetro de *escurrimiento* de 180 mm, idóneos para su puesta en obra mediante bombeo.

Las probetas elaboradas según la dosificación 75% de *cemento pórtland* + 25% de *arcillas sepiolíticas* + *arena normalizada* + *agua destilada* aportan resistencias mecánicas elevadas en un período de 28 días (46,9 – 48,5 Mpa), que superan el valor de la probeta *patrón* (46,1 Mpa) para el mismo período. Son igualmente elevados los valores 101,73 y 105,20%, *respectivamente*, obtenidos mediante el cálculo del *Índice de Actividad Resistente*.

Con vistas a las futuras y posibles aplicaciones se recomienda determinar la extensión de las áreas más productivas y llevar a cabo un cálculo preliminar de los recursos. Previamente, se debe proceder a densificar las distancias entre los puntos de documentación y estaciones durante los trabajos de *reconocimiento geológico* detallado que implique, además, una campaña de demuestre simultánea, donde las muestras sean asimiladas a una profundidad de 50 centímetros. Para garantizar el éxito de esta actividad es preciso localizar con suficiente antelación afloramientos en profundidad, como zanjas, trincheras, pozos, escarpes, entre otros. Los resultados obtenidos en esta fase de trabajo deberán ser comparados exhaustivamente con los obtenidos en la etapa previa; de este modo, quedaría establecida de forma definitiva la composición sustancial del yacimiento (Costafreda, J.L., 2008).

Además de sus magníficas cualidades como *puzolanas*, y a juzgar por las conocidas propiedades de la *sepiolita*, unido a su fácil explotación y tratamiento previo casi nulo, se recomienda dirigir el posible empleo de estos recursos a las siguientes modalidades:

Como *materiales cerámicos* en la fabricación de elementos constructivos, previa comprobación exhaustiva del comportamiento de la calidad y la durabilidad.

Por las propiedades de la *sepiolita*, entre las que se mencionan su fuerte tendencia *sorcitiva*, su comportamiento inerte, su *capacidad de intercambio catiónico* y su *tixotropismo* típico, se podrían emplear en la depuración y clarificación de aguas, preparación de *lodos de perforación*, incluso en la elaboración de productos farmacéuticos (Carretero, M. F. y Pozo, M., 2007).

Puede actuar como *aislante acústico*, por lo que sería efectivo en la fabricación de paneles aislantes y tabiques de interiores en viviendas de bajo coste que se construyan dentro de posibles proyectos gubernamentales futuros, destinados a satisfacer las demandas sociales de las familias con poder adquisitivo muy bajo.

Dada la peligrosidad medioambiental que representa para *Guinea Ecuatorial* la explotación intensiva de yacimientos de hidrocarburos, se podría proponer el uso de la *sepiolita* para aislar posibles derrames de *petróleo* en el mar, incluso en tierra firme.

## Arcillas saponíticas

Las *arcillas saponíticas*, al igual que las *sepiolitas*, ocupan áreas de significativa extensión dentro del territorio de la *Isla de Bioko*, hecho que se deriva del gran predominio de los materiales precursores descritos en los capítulos precedentes. De este modo, las consideraciones para los futuros trabajos de *reconocimiento geológico* de detalle, *muestreo*, cubicación de recursos y aplicaciones han de partir de las prescripciones aportadas en los párrafos del epígrafe anterior.

La observancia de sus propiedades físicas y químicas condicionan la calidad tecnológica de la *saponita*, ya que por un lado sus partículas son tan pequeñas que no superan las 2  $\mu$ , y por otro, tanto su morfología típica laminar como su fuerte tendencia al isomorfismo, estimulan su capacidad como intercambiadores iónicos. La *saponita*, como ocurre con el resto de las *arcillas*, posee otras propiedades muy apreciadas, entre las que se citan su elevada área superficial, su capacidad *sorcitiva*, manifestada a través de los procesos de absorción, adsorción y desorción, así como la tendencia a la hidratación, su plasticidad y su carácter *tixotrópico*, que les confieren una acentuada reactividad superficial, de suma importancia a la hora de orientar sus posibles usos como *arcillas especiales*.

Los depósitos de *saponita* pudieron formarse mediante una combinación de varios procesos, entre los que pueden citarse la alteración hidrotermal de yacimientos de *bentonitas* preexistentes con predominio de *saponitas* magnesianas, la desvitrificación del *vidrio volcánico* en áreas próximas a los ecosistemas marinos, a consecuencia de lo cual la presencia del ión *potasio* puede provocar un proceso de *illitización*.

La notable potencia del perfil edáfico de la *Isla de Bioko*, formado a partir de la alteración de los productos volcanosementarios, sumado al clima extremadamente húmedo imperante, ha podido contribuir a la degradación de ciertos *silicatos* originales, dando lugar a las *saponitas*.

Algunos autores atribuyen un origen autigénico a las *arcillas magnesianas* gracias a la alteración de *feldespatos* y *micas* (Pozo, M. y Casa, J., 1992).

## Rocas volcánicas

El análisis y la interpretación de los resultados obtenidos permiten considerar como *puzolanas* las *rocas volcánicas* originadas durante las erupciones del volcán *Basilé* y de otros centros de emisión de *Bioko Sur* (*Luba* y *Moka*).

El uso eficaz de estos materiales requiere *granulometrías* por debajo de las 63  $\mu$  a fin de obtener superficies muy activas, ya que el porcentaje de *sílice reactiva* es bajo. No se recomienda trabajar con *granulometrías* más gruesas, debido a que las reacciones hidráulicas son muy lentas en períodos cortos y cercanos a los 28 días, lo que puede acarrear fenómenos de *friabilidad* y poca *cohesión* en los elementos del *hormigón* y del *mortero*, patologías que se observan con no poca frecuencia en muchas construcciones artesanales de *Guinea Ecuatorial* (Costafreda, J.L., 2012c).

Estos recursos podrían emplearse para sustituir parte de los *cementos* comunes (25-30%) a gran escala, porque, en primer lugar, constituyen un recurso muy abundante en ese país, y, en segundo, porque aportan sensibles mejoras a las mezclas, como la disminución del *calor de hidratación*, la *expansividad* y la *retracción*. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que estas *rocas volcánicas*, como *puzolanas* que son, imprimen buenas resistencias a los *morteros* y *hormigones*, pero de forma gradual y lenta, necesitando un período óptimo de 28 días como mínimo (Costafreda, J.L., 2008; Costafreda, J.L. et al., 2012c).

El máximo aprovechamiento de estos materiales puede lograrse mediante su mezcla conjunta con las *arcillas sepiolíticas*, ya que poseen una elevada reactividad puzolánica y resistencias mecánicas por encima de los 48 *Mpa* a 28 días. La mezcla de ambos productos podría llevarse a cabo mediante un sencillo sistema de condicionamiento y dosificación, aprovechando las ventajas que ofrece la proximidad de los yacimientos, tanto a puerto como a los posibles lugares de emplazamiento de las plantas de tratamiento (Costafreda, J.L. et al., 2012c).

Sin embargo, el mayor y más efectivo de los usos está predestinado al sector de los áridos, bien como adición para los *hormigones* y *morteros*, bien como *balasto* para los trazados de carreteras y pistas lo cual se verá favorecido por la extensión de estas formaciones en todo el territorio, factor que garantizaría ingentes volúmenes de reservas para un largo plazo de vida útil. Para una utilización óptima en este campo, se tendrán en cuenta muchos factores relacionados con su naturaleza petrogenética y sus propiedades *geométricas*, que determinarán y establecerán las características *granulométricas* y la forma de los fragmentos (Bustillo, M., 2008).

Es de suma importancia considerar el análisis exhaustivo de las denominadas propiedades físicas, y establecer aspectos importantes como la *densidad*, la *capacidad de absorción* de agua, la *porosidad*, el grado de *humedad* y la *dureza*. A lo mencionado hay que añadir un serio y detallado estudio de sus propiedades mecánicas, térmicas y químicas.

Una vez realizada la caracterización previa procede la experimentación mediante el uso de las distintas *normas*. Las *normas* europeas y americanas son dos ejemplos claves a seguir para obtener resultados sumamente fiables; solamente así se podrá establecer de forma definitiva la calidad de estas rocas como áridos *de machaqueo*, por citar tan sólo un ejemplo. Se deben considerar las posibles reacciones entre estos materiales y los álcalis y, sobre todo, el contenido, grado de abundancia y procedimientos para la gestión de las poblaciones *granulométricas* muy finas (Costafreda, J.L. et al., 2012c).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen muy sinceramente los conocimientos y aportaciones hechas por los especialistas y técnicos del *Laboratorio Oficial para Ensayos de Materiales de Construcción (LOEMCO)* y del *Laboratorio Centralizado de la Escuela de Minas y Energía de Madrid*, cuyos nombres se citan a continuación: **Daniel del Barrio**, **Esteban Estévez Fernández**, **Guillermina Blázquez Rodea**, **Raquel Martín Crespo** y **Santiago Mínguez Marín**. Agradecen con especial atención a los profesores y alumnos de la *Universidad de Moa*, la *Universidad de Holguín* y la *Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial* por la ayuda brindada durante los trabajos de *reconocimiento geológico* y *muestreo* efectuados en la *Isla de Bioko*.

## BIBLIOGRAFÍA

Bayliss, P., Erd, D.C., Mrose, M. E., Sabina, A. P. y Smith, D. K. (1986). Mineral powder diffraction file data book. International Centre for Diffraction Data. 16-1184 pp.

Burke, K. (2001). Origin of the Cameroon Line of volcano-capped swells. J.

Bustillo, M. (2008). Hormigones y morteros. Fueyo editores. Págs. 721. ISBN: 978-84-935279-1-4.

Calleja, J. (2002). Normas españolas UNE 2002 para cementos. *Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones* (IECA). 51 p.

Carretero, M. F. y Pozo, M. (2007). Mineralogía aplicada. Salud y medio ambiente. Edit. Thomson. Universidad de Sevilla, Universidad Autónoma de Madrid. 406 p.

Costafreda, J.L. (2011). Granulometría y reacción puzolánica. Cuarta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. IV Congreso Cubano de Minería. Sociedad Cubana de Geología. La Habana, Cuba. pp. 973 - 978. ISBN: 978-959-7117-30-8

Costafreda, J. L.; Leyva, C.A.; Parra, J.L.; Ndong, M. (2012a). Los yacimientos de arcillas de la Isla de Bioko. Caracterización y aplicaciones tecnológicas”. En: Ponencias y resúmenes de comunicaciones. Nuevos tiempos, nuevas estrategias. pp. 635-642. Fueyo Editores-Federación de Áridos, 03/10/2012. ISBN 978-84-939391-3-7.

Costafreda, J. L.; Leyva, C.A.; Parra, J.L.; y Calvo, B. (2012b). Los yacimientos ecuatoguineanos de arenas silíceas. Caracterización y establecimiento de sus posibles usos”. En: Ponencias y resúmenes de comunicaciones. Nuevos tiempos, nuevas estrategias. pp. 1329-1337. Fueyo Editores-Federación de Áridos, 03/10/2012. ISBN978-84-939391-3-7.

Costafreda, J. L.; Leyva, C.A.; Ramos, A.; Parra, J.L. y Calvo, B. (2012c). Estudio de las propiedades puzolánicas de las rocas volcánicas del Monte Basilé, República de Guinea Ecuatorial, y sus aplicaciones como puzolanas para la sustitución del cemento en las mezclas de morteros”. En: Ponencias y resúmenes de comunicaciones. Nuevos tiempos, nuevas estrategias. pp. 558-565. Fueyo Editores-Federación de Áridos, 03/10/2012. ISBN978-84-939391-3-7

Costafreda, J.L. (2008). Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 515 p.

Costafreda, J.L., Calvo, B. y Parra y Alfaro, J.L. (2011). Contribución de la zeolita natural a las resistencias mecánicas de cementos, morteros y hormigones. IX Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción. Quito, Ecuador. Págs. 10.

Deruelle, B.; Moreau, C.; Nkoumbou, C.; Kambou, R.; Lissom, J.; Njonfang, E.; Ghogumu, R. T.; and Nono, A. (1991). The Cameroon Line: a review. In Kampunzu, A. B., and Lubala, R. T., eds. *Magmatism in extension structure settings: the Phanerozoic African Plate*. Berlin, Springer: 275–327.

García, E. y Suárez, M. (2013?). Las arcillas: propiedades y usos. Documentos de la Universidad Complutense (Madrid) y la Universidad de Salamanca. 25 págs.

Gili, G. (2000). Cementos. Definiciones, clasificación y prescripciones. *Hormigón armado*. Barcelona. 21 p.

González, M. (2000). Requerimientos del cemento en los reglamentos de construcción. *ASOCEM-2000*. 30 p.

González, M. (1991). Ataque químico al concreto. *Exposición en el ciclo organizado por el ACI. Capítulo peruano sobre corrosión en estructuras de concreto*. 17 p.

Lee, D. C., Halliday, A. N., Fitton, J. G. & Poli, G. (1998). Isotopic variations with distance and time in the volcanic islands of the Cameroon Line—evidence for a mantle plume origin. *Earth and Planetary Science Letters* 123(1–4), 119–138.

Malhotra, V. y Ramezani pour A. (1994). Fly Ash in Concrete, Second edition. *CANMET-94*. 10 p.

Ministerio de Minas, Industria y Energía de Guinea Ecuatorial (2010). Registro de concesiones mineras (Informe interno). Dirección de Minas y Canteras.

Molerio León, L.F. (2014). Marco geológico del peligro, la vulnerabilidad y los riesgos naturales en Guinea Ecuatorial. Inversiones GAMMA, S.A., PO Box 6219, CP 10600, Habana 6, Ciudad de La Habana, Cuba. (Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente). Año 14, No. 26, 2014 ISSN-1683-8904.

Molerio León, L.F. (2011). Cambio climático y gestión de las aguas terrestres en los estados insulares del Caribe: el problema de la intrusión marina. Congreso Cambio Climático y Desarrollo Sostenible, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, Agosto 2011.

Ndong, M. (2013). Los materiales de construcción de la Isla de Bioko (Guinea Ecuatorial). Caracterización y principales aplicaciones tecnológicas. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. Departamento de Ingeniería Geológica (Universidad Politécnica de Madrid). 85 págs.

Njonfang, E., A. Nono, P. Kamgang, V. Ngako, F. Tchoua Mbatcam (2007). The Cameroon Line magmatism (Central Africa): A viewpoint.

O’Nelly, R. y Hill, R. (2001). Guía para la durabilidad del hormigón. *Comité ACI 201.2R*. 59 p.

Pozo, M. y Casa, J. (1992). Mineralogía y sedimentología del yacimiento de saponita de Yuncos (Toledo). *Estudios geol.*, 48: 47–65. Págs. 19

Proyecto Guinea Ecuatorial (2004). Convenio entre la Universidad Politécnica de Madrid (E.T.S. de Ingenieros de Minas), el Grupo de Empresas Repsol-YPF y el Ministerio de Minas, Industria y Energía de Guinea Ecuatorial para la creación del “Proyecto Guinea”. Febrero de 2004. 6p.

Rabilero, A. (1988). Las puzolanas. Cinética de reacciones. *Editorial Oriente*. Santiago de Cuba. 114 p.

Rosell, M. y Gayoso, R. (2001). Utilización de la zeolita como material de construcción. Experiencia cubana. *I Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción*. Red CYTED XIII-C. 10 p.

Sugita, S., Yu, Q., Shoya, M., Tsukinaga, Y. y Isojima, Y. (1997). Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, in: *H. Justnes, A.B. Amarkai (Eds.)*, Gothenborg, vol. 3. 10 p.

Treacy, M. M. J. y Higgins, J. B. (2001). Collection of Simulated XRD Powder Patterns for Zeolites. *Fourth Revised Edition*. ELSEVIER. Published on behalf of the Structure Commission of the International Zeolite Association. pp. 245–248.

Valdez, P., Das, T. y Villarreal, R. (2004). Evaluación de la velocidad de hidratación en sistemas puzolanas naturales-portlandita. *Ciencia UANL*, vol. VII, N° 2. 13 p.

www. AFR-02 Cenozoic volcanism and evolution of the African lithosphere.

Wilson, M. & Guiraud, R. (1992). Magmatism in western and central Africa, from Late Jurassic to Recent times. *Tectonophysics* 213, 203–225.

Norma UNE-EN 933-1:1998 y A1:2006. Método del tamizado por vía seca.

Norma UNE-EN 1015-3. Determinación de la consistencia del mortero fresco por el método de sacudida.

Norma UNE-EN 196-2:2006 // UNE 80225:1993 EX // UNE EN 451-1:2006. Análisis químico.

Norma EN-1744-1:2010. Determinación del contenido en humus.

Norma UNE-EN 196-1:2005. Determinación de las resistencias mecánicas.

Norma UNE-EN 933-1:1998 y A1:2006. Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.

Norma UNE-EN 933-10:2001. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 10: Evaluación de los finos. Granulometría de los fillers (tamizado en corriente de aire). [www.icex.es/icex/es](http://www.icex.es/icex/es)

Norma UNE-EN 933-1:1998/A1: 2006. Ensayos para la determinación de las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de partículas. Métodos del tamizado.

Norma UNE-EN 196-1: 2005. Métodos de ensayos de cementos. Parte 1. Determinación de las resistencias mecánicas.

Norma UNE-EN 196-2: 2006. Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos.

*Norma UNE-EN 196-3:2005+A1: 2009.* Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.

*Norma UNE-EN 196-5: 2006.* Métodos de ensayo de cementos. Parte 5: Ensayo de puzolanidad para los cementos puzolánicos.

*Norma UNE-EN 197-1: 2000.* Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

*Norma UNE-EN 1015-2:1999.* Métodos de ensayo para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo.

*Norma UNE-EN 1015-3: 2000.* Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).

*Norma UNE-EN 1744-1: 2010.* Contenido en humus.

*Norma UNE 80225:1993.* Métodos de ensayo de cementos. Análisis químico. Determinación del dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) reactivo en los cementos, en las puzolanas y en las cenizas volante.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE MINAS



Gómez Pardo  
FUNDACIÓN



POLITÉCNICA