

LOS YACIMIENTOS ECuatOGUINEANOS DE ARENAS SILÍCEAS. CARACTERIZACIÓN Y ESTABLECIMIENTO DE SUS POSIBLES USOS.

Área temática C (Aplicaciones de los áridos. Calidad de producción y de producto).

Jorge Luis Costafreda Mustelier¹; Carlos Leyva Rodríguez²; José Luis Parra y Alfaro¹ y Benjamín Calvo Pérez¹

1 Doctor Ingeniero Geólogo. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Calle de Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid (costafreda@yahoo.es).

2 Doctor Ingeniero Geólogo. Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa. Las Coloradas. Provincia Holguín. Cuba (carlosalberto582000@yahoo.es).

1 Doctor Ingeniero de Minas. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Calle de Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid (joseluis.parra@upm.es).

1 Doctor Ingeniero de Minas y Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Calle de Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid (+34 913367069) (benjamin.calvo.perez@gmail.com).

RESUMEN:

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. Las escasas crónicas mencionan actividades de explotación esporádica y temporera en tres pequeñas cortas, actualmente paralizadas, que se ubican en la aldea de *El Cacahual*, aproximadamente al suroeste de la ciudad de Malabo, destinadas a la fabricación de morteros para pequeñas construcciones locales. Sin embargo, no se registran estudios sobre la composición y la calidad tecnológica de estos materiales.

Los recientes trabajos de investigación llevados a cabo por investigadores de la Escuela de Minas de Madrid y la Universidad de Moa (Cuba), con la colaboración de profesores de la Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial, y cuyos resultados se ofrecen en estas líneas, incluyeron campaña de muestreo, caracterización y aplicaciones de estos materiales. Las primeras conclusiones establecen que en la composición sustancial de estos yacimientos aparece el cuarzo como principal fase mineral, acompañado por feldespato, caolinita, mica moscovita e illita (DRX).

El estudio morfológico de las muestras por medio de la microscopía electrónica de barrido (MEB) permitió describir granos con dimensiones muy cercanas y con formas angulosas, subangulosas y ocasionalmente subredondeadas, que indican un transporte escaso o casi nulo; esta evidencia infiere la naturaleza residual de estos yacimientos, formados a partir de la alteración y posterior redeposición eluvial de un supuesto protolito de composición granitoide. Por otra parte, la presencia de fases representadas por dolomita y hematita podrían ser el testimonio de la acción de procesos hidrotermales que afectaron a estas formaciones.

Otras tareas que complementaron esta investigación, como el estudio granulométrico, contenido en materia orgánica y ensayos de resistencias mecánicas, que fueron realizadas por el Laboratorio Oficial para Ensayos de Materiales de Construcción (LOEMCO), corroboran la calidad tecnológica de estas arenas.

INTRODUCCIÓN

El yacimiento de arenas silíceas conocido como *El Cacahual*, que toma el nombre de una pequeña aldea situada en las inmediaciones, se encuentra ubicado al Suroeste de la ciudad de Malabo e inmediatamente al Este del aeropuerto internacional Santa Isabel de Malabo (ver figura 1).



Figura 1: plano de ubicación del yacimiento de arenas silíceas de El Cacahual. (Fuente: www.google.com).

El yacimiento se encuentra en una zona de densa floresta, comunicada con la aldea de *El Cacahual* y con el aeropuerto por una estrecha pista sin pavimentar. La zona consiste en una pequeña corta abandonada con un área aproximada de 3.000 metros cuadrados. Las antiguas operaciones de extracción conservan la impronta de su carácter artesanal y temporero, sin ningún criterio técnico.

El acceso a la pequeña cantera es por el sur, que conduce a un antiguo frente de explotación que consiste en un único banco vertical que alcanza los 3,5 metros de altura (ver figura 2).



Figura 2: Aspecto de uno de los taludes de la corta de arenas con cuarzo de *El Cacahual* (Fotografía: J.L. Costafreda, 2012).

No se cuenta con informaciones detalladas y precisas sobre los volúmenes de arenas extraídos, ni de la composición mineralógica, granulometría ni contenidos en materia orgánica. Tampoco hay conocimiento sobre usos normalizados a gran escala de los materiales extraídos.

Durante los trabajos de reconocimiento geológico con campaña de muestreo en la cantera de *El Cacahual*, que iniciaron la presente investigación, se establecieron tres tipos aparentemente distintos de arenas silíceas naturales, que fueron denominadas como: *Cacahual-2*, *Cacahual-3* y *Cacahual-4*. Las muestras fueron asimiladas por el sistema de muestreo de ranurado continuo, con un peso de 5 kilogramos cada una.

La ubicación de los puntos de muestreo se encuentra en las siguientes coordenadas:

Cacahual-2: 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''

CARACTERIZACIÓN DE LAS ARENAS SILÍCEAS.

Caracterización granulométrica.

Los ensayos permitieron establecer la presencia de varias poblaciones granulométricas en las muestras analizadas, lo que se interpreta como una gran variabilidad en el diámetro de las partículas. Los mayores porcentajes más frecuentes de material retenido se registraron en las aberturas 0,50 mm y 0,16 mm para las tres muestras (ver figura 1 *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* (ver figura 1 *b*), seguida muy de cerca por la muestra *Cacahual-4*, y

confirmado por los porcentajes de retención que experimentan en los tamices 2,0 mm, 1,6 mm 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 (ver figuras 5, 6 y 7).

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

La muestra *Cacahual-4* corresponde, posiblemente, a un estadio de alteración y disgregación mecánica intermedio entre *Cacahual-3* y *Cacahual-2*. La gran similitud de las curvas granulométricas determinadas para las muestras *Cacahual-2* y *Cacahual-4*, ubicadas a la derecha de la tabla 1 *a* y *c*, consigna esta interpretación.

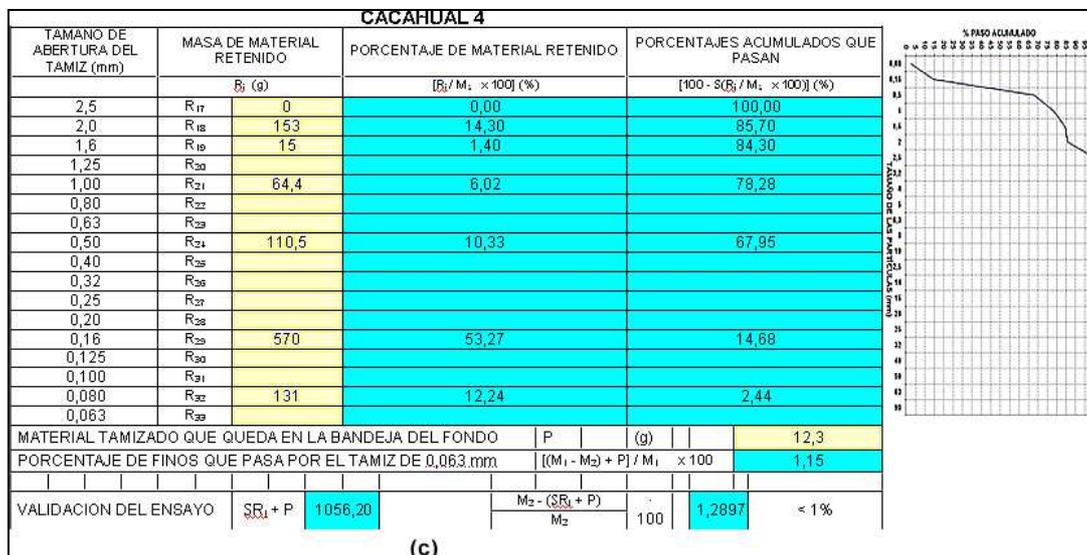
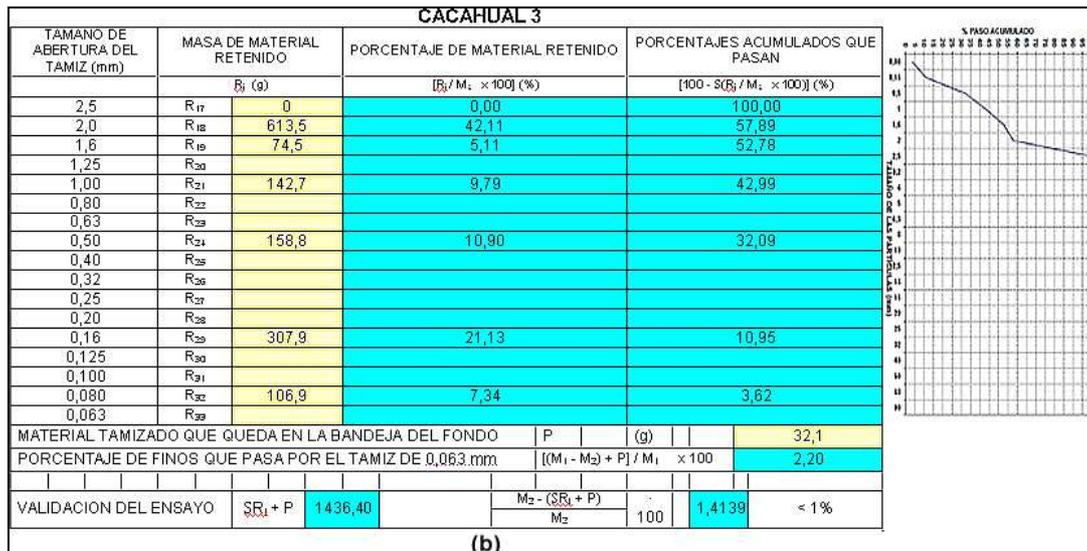
De forma inversa, la muestra *Cacahual-2* (ver figura 1 *a*), con menor granulometría, posee el mayor porcentaje (70,39%) de partículas retenidas en los tamices de menor luz (0,16 mm); mientras que las muestras *Cacahual-4* (53,27%) y *Cacahual-3* (21,13%) se ubican en el segundo y tercer orden, respectivamente.

En las arenas normalizadas (UNE-EN 933-1:1998 y A1:2006) los mayores porcentajes de retenido tienen lugar en los tamices 1,00 y 0,50 mm, aunque aparecen retenciones más o menos significativas entre 0,250 mm y 0,125 mm.

Tabla 1 (*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).

CACAHUAL 2						
TAMANO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	MASA DE MATERIAL RETENIDO	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO		PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN		
	R_i (g)	$[R_i / M_1 \times 100]$ (%)		$[100 - S(R_i / M_1 \times 100)]$ (%)		
2,0	R ₁₈ 44,9	3,86		96,14		
1,6	R ₁₉ 13,3	1,14		95,00		
1,25	R ₂₀					
1,00	R ₂₁ 60,5	5,20		89,80		
0,80	R ₂₂					
0,63	R ₂₃					
0,50	R ₂₄ 135,5	11,64		78,16		
0,40	R ₂₅					
0,32	R ₂₆					
0,25	R ₂₇					
0,20	R ₂₈					
0,16	R ₂₉ 819,3	70,39		7,77		
0,125	R ₃₀					
0,100	R ₃₁					
0,080	R ₃₂ 49	4,21		3,57		
0,063	R ₃₃					
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				$[(M_1 - M_2) + P] / M_1 \times 100$		1,64
VALIDACION DEL ENSAYO		$SR_1 + P$	1141,60	$M_2 - (SR_1 + P)$		1,9244
				M_2	100	< 1%

(a)



Caracterización de las especies mineralógicas.

Según los resultados de difracción de rayos x, las tres muestras (*Cacahual 2*, *Cacahual 3* y *Cacahual 4*) poseen contenidos apreciables en cuarzo, a juzgar por los máximos valores de $d\hat{A}$ (3.3349 - 3.3790) de máxima intensidad relativa (100%), y corroborados por comparación con los valores normalizados de las *Tarjetas ASTM* (Bayliss, P. *et al.* 1986; Treacy, M. M. J. *et al.* 2001) (ver figura 4 a, b y c).

Otros valores de $d\hat{A}$ (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 caolinita presente en las arenas con cuarzo de *El Cacahual* puede interpretarse como un producto de reacción secundario formado a partir de disoluciones hidrotermales precedentes que lixiviaron y disolvieron a los feldespatos, aunque ciertas cantidades pudieron haberse

originarse a partir de la alteración de las micas (muscovita y biotita) en contacto con esas disoluciones.

El feldespato ($d\text{Å} = 2.2784$ 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 anortíticas y bytowníticas.

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

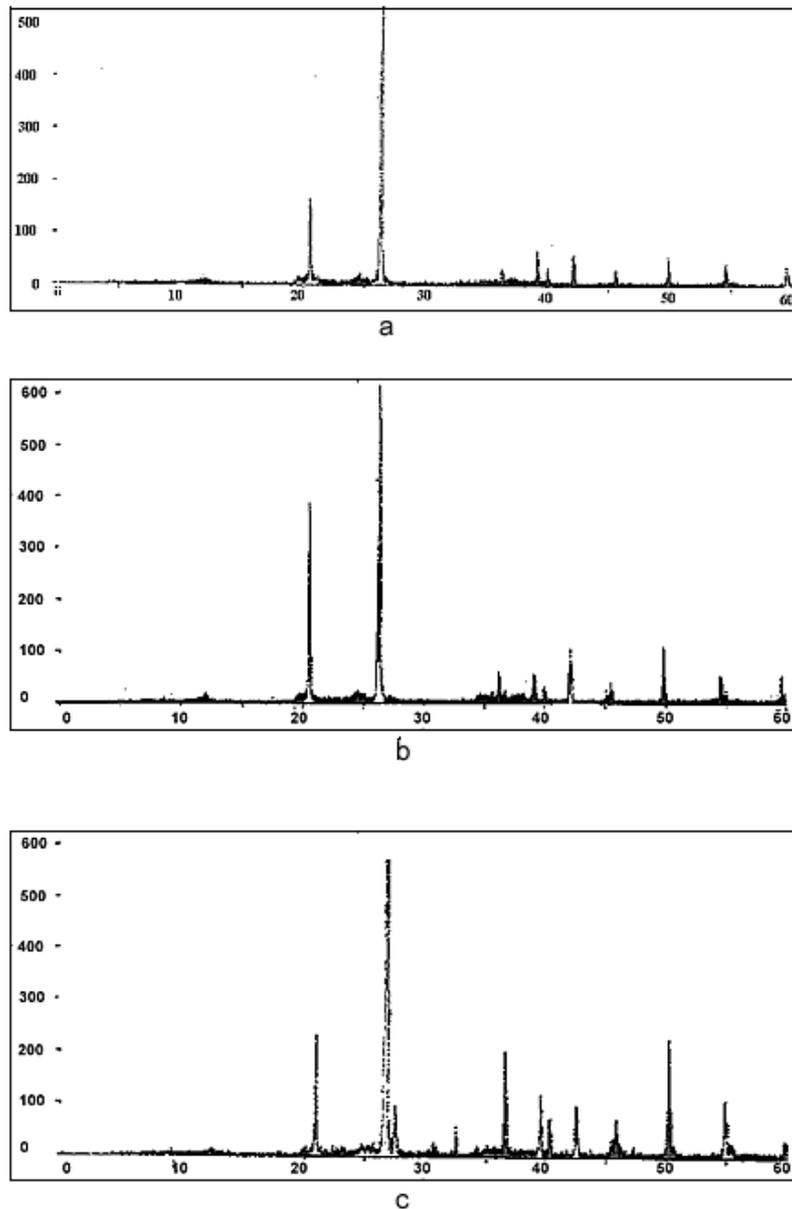


Figura 4: Derivatogramas que exhiben los pico principales reflejados por los componentes principales de las muestras *Cacahual-2* (a), *Cacahual-3* (b) y *Cacahual-4* (c).

Caracterización morfológica de las especies minerales.

Muestra Cacahual – 2:

La figura 5 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 verse especies minerales distintas alojadas entre los granos de cuarzo, posiblemente, como productos secundarios de hematita y dolomita, procedentes de ciclos previos de alteración hidrotermal.

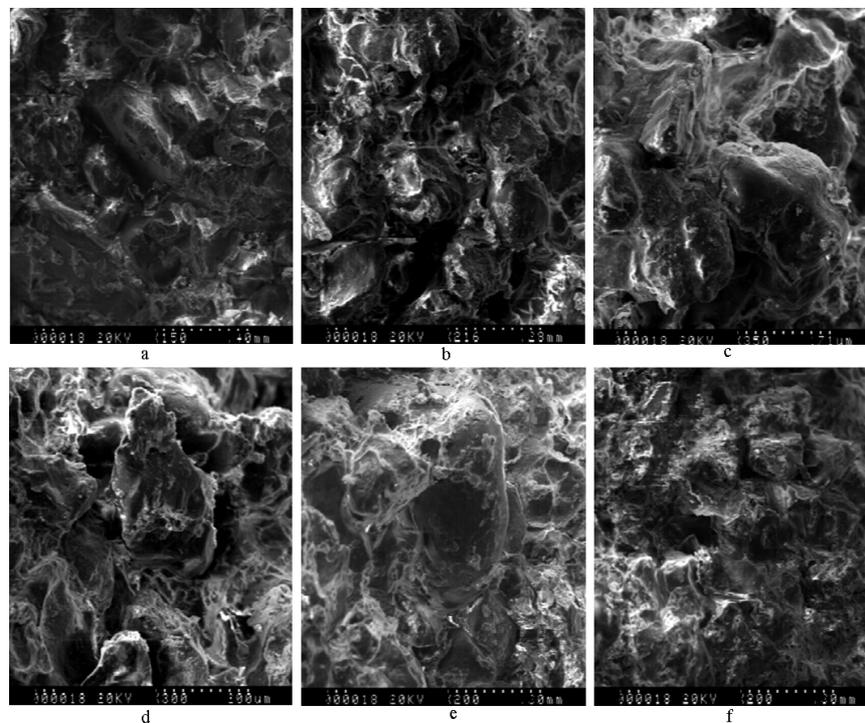


Figura 5: Secuencias de microfotografías tomadas durante la investigación de la muestra *Cacahual-2* por microscopía electrónica de barrido.

Muestra Cacahual – 3:

Esta muestra representa la parte menos friable de las arenas del yacimiento *El Cacahual*, las microfotografías de la figura 6 (*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*.

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 feldespatos, que se disponen con cierta regularidad en el campo visual.

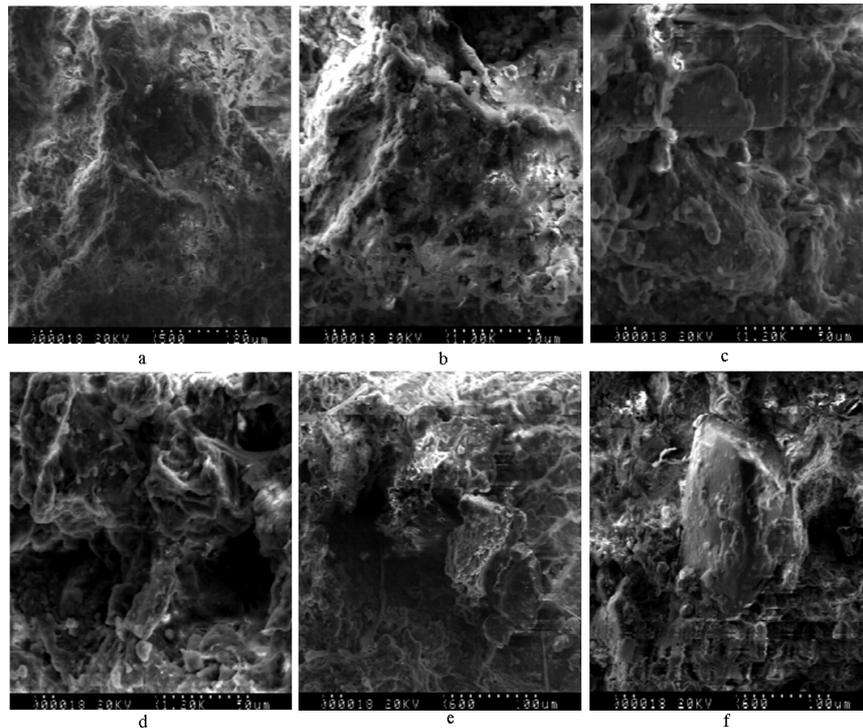


Figura 6: Secuencias de microfotografías tomadas durante la investigación de la muestra Cacahual-3 por microscopía electrónica de barrido.

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 sustancias cementicias. Sus aristas son claramente irregulares y angulosas. En *d* se aprecian escasos cristales de mica, así como agujeros dejados 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*.

Muestra Cacahual – 4:

La secuencia de microfotografías exhibidas en la figura 7 (*a*, *b*, *c*, *d*, *e* y *f*) muestra claramente la morfología de los granos de cuarzo, destacando los planos de la fractura concoidea, las aristas angulosas, la diversidad de tamaños y la ausencia de material secundario cementante.

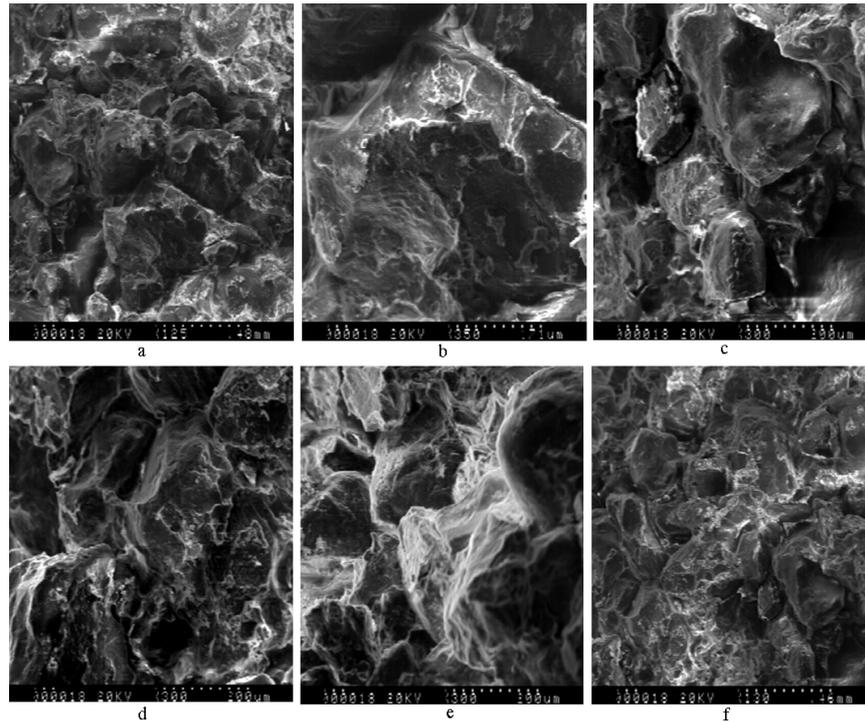


Figura 7: Secuencias de microfotografías tomadas durante la investigación de la muestra Cacahual-4 por microscopía electrónica de barrido.

El color blanco de la muestra *Cacahual-4*, según el estudio *de visu*, pudo ser causado por la presencia de illita como producto de alteración de la mica 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 las tres muestras reaccionó con el ácido clorhídrico, a pesar de que contienen leves trazas de dolomita; sin embargo, es posible que la sustitución catiónica del calcio por el magnesio haya sido muy marcada a causa de factores externos relacionados con la temperatura en ese ambiente volcánico.

Naturalmente, es lógico pensar que la dolomitización se originó por procesos hidrotermales y metasomáticos, relacionados con la actividad magmática de la Isla de Bioko. De hecho, la albitización intensa de los feldespatos que componen las tres muestras es un testimonio de la actividad hidrotermal que afectó a estas formaciones.

Muestra Cuarzo relicto – 1:

Se han integrado en esta investigación los resultados del análisis por microscopía electrónica de barrido de una muestra de cuarzo relicto (*Cuarzo relicto-1*) interdigitada en las arenas del yacimiento *El Cacahual* (ver figura 8 - *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* y *g*).

En las microfotografías mostradas en la figura 8 (*a*, *b*, *c*, *d*, *e* y *f*) y en la figura 9 *g*, se observa un cuarzo con superficie fuertemente lixiviada, posiblemente por la acción de los fluidos hidrotermales químicamente activos, o por su posición original cerca de los orificios de escape de gases ácidos relacionados con la actividad volcánica.

Vale destacar el crecimiento incipiente de pequeños neocristales en una hendidura de la muestra (ver figura 8 *d*).

La microfotografía *h* (figura 9) permite apreciar una vesícula vacía, posiblemente originada por la lixiviación de algún sulfuro.

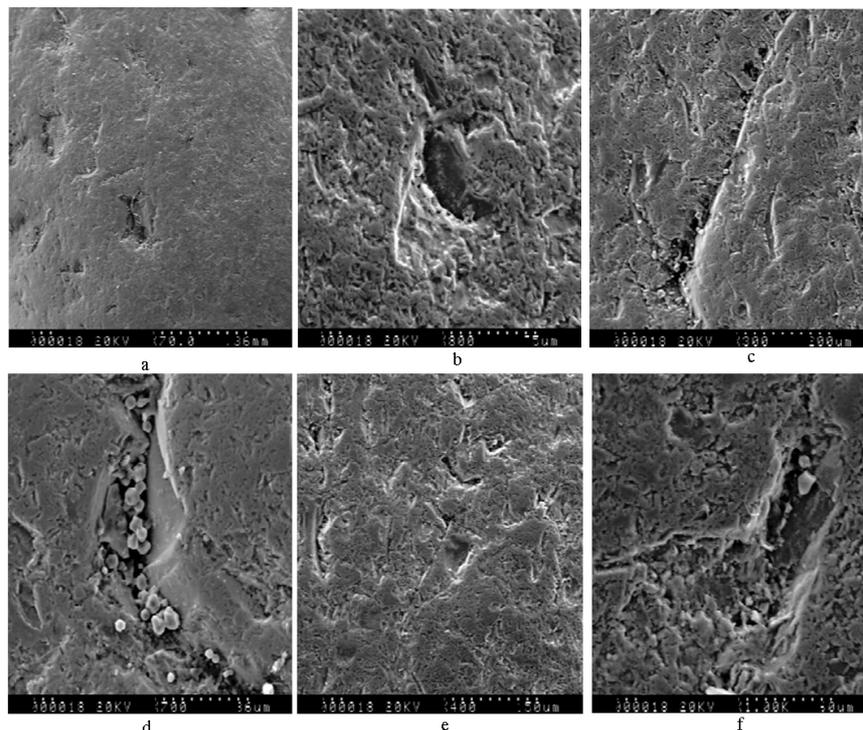


Figura 8: Secuencias de microfotografías tomadas durante la investigación de la muestra *Cuarzo relicto - I* por microscopía electrónica de barrido.

La figura 9 (ver microfotografías *j*, *k* y *l*, de menor a mayor aumento), exhibe el crecimiento de nuevas especies minerales de cuarzo 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 de *El Cacahual*. El estudio *de visu* lo describe como un cuarzo de morfología bien redondeada y, en contraste con las arenas que se investigan y entre las cuales está interdigitado como una facies aparentemente foránea, posee un alto grado de transporte bien acusado.

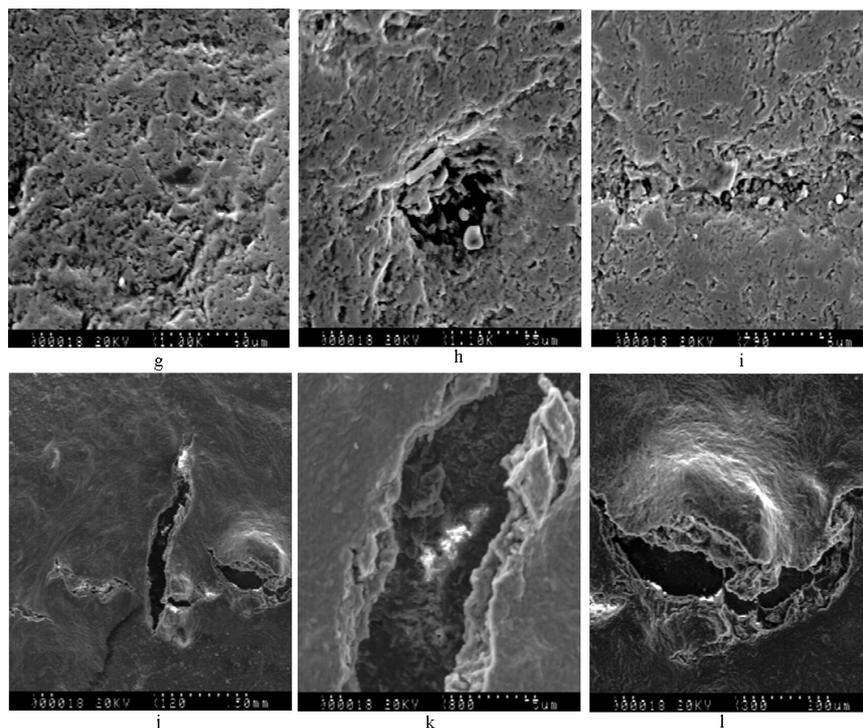


Figura 9: Continuación de la secuencia de microfotografías tomadas durante la investigación de la muestra *Cuarzo relicto - 1* por microscopía electrónica de barrido.

Los trabajos de reconocimiento geológico que se llevaron a cabo en los alrededores del yacimiento en el marco de esta investigación, 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.

Caracterización química.

La expresión de los resultados del análisis químico (Normas UNE-EN 196-2:2006 // UNE 80225:1993 EX // UNE EN 451-1:2006) para las muestras de arenas silíceas del yacimiento *El Cacahual*, indica porcentajes singularmente elevados en SiO₂ (*Cacahual-2*= 88,18%; *Cacahual-3*= 88,2 3% y *Cacahual-4* =89,01%), que contrastan drásticamente con los bajos valores determinados para la SiO₂ reactiva (8,76%, 8,70% y 8,76%), respectivamente (ver tabla 2 *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 muestras estudiadas se encuentra en el residuo insoluble *no reactivo*.

Lo expresado anteriormente permite argumentar que las arenas de *El Cacahual* están compuestas por granos de sílice totalmente cristalina, donde no se ha determinado la presencia de fases amorfas reactivas, lo que convierte a estas arenas en materiales *no-puzolánicos*.

De acuerdo con la norma UNE-EN 196-2:2006, ninguna de las muestras de arenas analizadas cumple con las prescripciones establecidas para el contenido mínimo en SiO₂ reactiva (25%);

sin embargo, son muy adecuadas para el uso como *arena normalizada* en mezclas de morteros y hormigones.

Los discretos contenidos en Al_2O_3 , Fe_2O_3 y MgO (ver tabla 2 *a*, *b* y *c*) señalan que estas arenas están compuestas, además de cuarzo, por otras fases minerales minoritarias, como feldespatos, hematita y dolomita, confirmado previamente con los estudios de difracción de rayos *x*.

Tabla 2: 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).

MUESTRA: CACAHUAL - 2		MUESTRA: CACAHUAL - 3	
DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS	(%)	DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS	(%)
SiO ₂ TOTAL	88,18	SiO ₂ TOTAL	88,23
MgO	0,24	MgO	0,22
CaO TOTAL	0,64	CaO TOTAL	0,66
CaO LIBRE	-	CaO LIBRE	-
Fe ₂ O ₃	2,51	Fe ₂ O ₃	2,42
Al ₂ O ₃	7,67	Al ₂ O ₃	8,47
SiO ₂ REACTIVA	8,76	SiO ₂ REACTIVA	8,70
CaO REACTIVA	0,46	CaO REACTIVA	0,37
R.I.	82,92	R.I.	85,13

a

b

MUESTRA: CACAHUAL - 4	
DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS	(%)
SiO ₂ TOTAL	89,01
MgO	0,32
CaO TOTAL	0,40
CaO LIBRE	-
Fe ₂ O ₃	2,40
Al ₂ O ₃	7,80
SiO ₂ REACTIVA	8,76
CaO REACTIVA	0,46
R.I.	83,75

c

Determinación del contenido en materias orgánicas.

Las características físicas de las arenas que ocupan el interés de este trabajo, es decir, su friabilidad y su posible capacidad para albergar materiales foráneos más o menos contaminantes y dañinos, han exigido el empleo del método de determinación del contenido en materias orgánicas (EN-1744-1:2010). El carácter singularmente nocivo de estas sustancias, que pueden ser ciertas arcillas, restos de vegetales, etc., 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 arena (*Cacahual-2*, *Cacahual-3* y *Cacahual-4*) fueron secadas a una temperatura sostenida de 50 °C durante 24 horas; posteriormente, se mezclaron con una disolución de hidróxido de sodio al 3%.

La comparación *de visu* entre la *disolución patrón* (de color rojo oscuro) y la mezcla de hidróxido de sodio con las arenas, determinó que esta última no se tornó coloreada -lo cual es causado por un exceso de materia orgánica en la muestra-, y se llegó a la conclusión de que estas arenas con cuarzo son prácticamente puras.

Lo expresado, permite confirmar la aptitud de las arenas silíceas de *El Cacahual* para ser empleadas en mezclas de morteros y hormigones.

APLICACIÓN DE LAS ARENAS SILÍCEAS DE *EL CACAHUAL* COMO ÁRIDO FINO EN LA ELABORACIÓN DE MORTEROS.

En los proyectos de mezclas para la elaboración de morteros cuyo árido fino (arena normalizada) ha sido 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 normal, agua destilada y la masa requerida de arena se han mantenido constantes (ver tabla 3). La finalidad de esta investigación es comprobar si las arenas silíceas recolectadas en Guinea Ecuatorial son capaces de aportar resistencia mecánica a la masa del mortero.

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

Tabla 3: Dosificación de morteros elaborados específicamente con arenas naturales con cuarzo del yacimiento *El Cacahual* en relación con el mortero de referencia (UNE-EN 196-1:2005).

DOSIFICACIÓN DEL MORTERO		PESO DE LA ARENA (g)
1	100% Cemento Pórtland + Arena Normalizada + 225 g de Agua Destilada (<i>Muestra Patrón</i>)	1349.6
2	100% Cemento Pórtland + <i>Arena Cacahual- 2</i> + 225 g de Agua Destilada.	1349.4
3	100% Cemento Pórtland + <i>Arena Cacahual- 3</i> + 225 g de Agua Destilada.	1349.5
4	100% Cemento Pórtland + <i>Arena Cacahual- 4</i> + 225 g de Agua Destilada.	1350.4

Los datos representados en la tabla 4 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 los límites establecidos en la norma UNE-EN 196-1:2005 ($\geq 32,5$ - $\leq 52,5$ Mpa) a 28 días, para cementos con resistencia inicial ordinaria (32,5 N y 32,5 R) ($42,5$ N y $42,5$ R) ($\geq 42,5$ - $\leq 62,5$ Mpa).

Tabla 4: 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)
CemRef	7,4	46,1
Cacahual-2	5,4	39,5
Cacahual-3	5,3	34,8
Cacahual-4	5,5	39,7

En la figura 10 se confirma de manera gráfica la serie de criterios que se acaban de exponer.

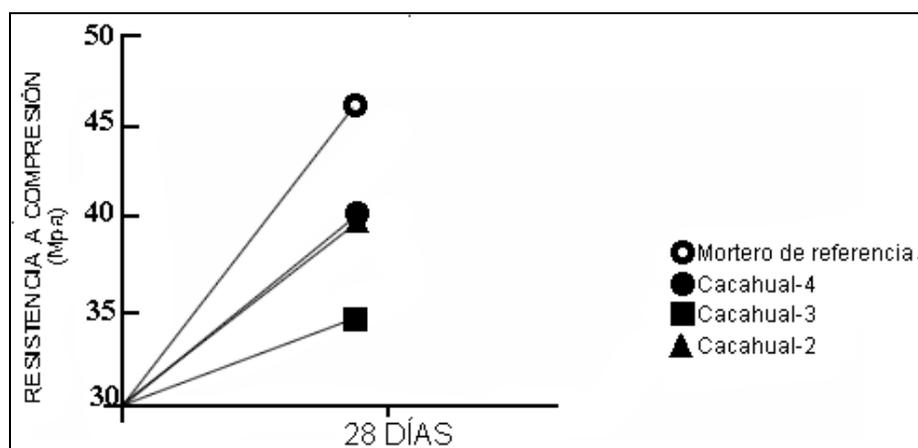


Figura 10: Representación gráfica de los resultados de la resistencia mecánica a compresión para un periodo de 28 días.

El cálculo del índice de actividad resistente puso 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 (ver tabla 5).

Tabla 5: Resultados del cálculo del índice de actividad resistente para las probetas de morteros elaboradas con arenas silíceas de *El Cacahual*, en relación al 75% del valor de resistencia mecánica del mortero de referencia para un periodo de curado de 28 días (UNE-EN 196-1:2005).

MUESTRA	RESISTENCIA COMPRESIÓN (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

CONCLUSIONES

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-ocre-amarillo* hasta *gris claro-blanco*, producido por la presencia insignificante (*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 las facies con granulometría *gruesa*; *Cacahual-4*, las de granos *medio-fino*, mientras que *Cacahual-2* son las de diámetros 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, que determinará, por una parte, la extracción intensiva en forma de *todo uno*, o de otra forma, la extracción selectiva ajustada al tipo de demanda que exija la economía.

Ninguna de las tres muestras reacciona frente al ácido clorhídrico, a pesar de que contienen pequeños indicios de dolomita; sin embargo, es posible que la sustitución catiónica del calcio por el magnesio haya sido muy marcada a causa de factores externos relacionados con la temperatura de ese ambiente volcánico. Naturalmente, es lógico pensar que la dolomitización se originó por procesos hidrotermales y metasomáticos relacionados con la actividad magmática de la Isla de Bioko. De hecho, la albitización intensa de los feldespatos que componen las tres muestras, es testimonio de una actividad hidrotermal que afectó a estas formaciones.

Existen muchas controversias sobre la posible génesis de este yacimiento, por lo que todas las hipótesis toman un carácter eminentemente subjetivo y teórico. La falta de sondeos de mapeo 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 serios en superficie, como los itinerarios geológicos con una red razonablemente densa, no arroja 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, se comparte como criterio genético más acertado que la similitud en la composición mineralógica y química, el escaso grado de redondeamiento, la poca uniformidad granulométrica y la insignificante presencia de especies minerales foráneas, permiten deducir que el yacimiento de arenas silíceas de *El Cacahual* pudo haberse originado *in situ*, a partir de la erosión y redeposición eluvial de un protolito, cuyas partes más frescas yacen en la profundidad. Este protolito pudo ser un cuerpo de composición granitoide a riolítica, testimonio de lo cual es el tamaño de los granos residuales de estas arenas, desde gruesos a muy finos.

Desde el punto de vista de las aplicaciones, se concluye lo siguiente:

Dado el alto contenido en sílice, el apreciable contenido en Al_2O_3 y la ausencia de materia orgánica podrían ser utilizadas en la fabricación de ladrillos refractarios. Por otra parte, la abundancia de la fracción fina, así como la insignificante presencia de mica (trazas) y la ausencia de sulfatos, podrían ser datos decisivos para su utilidad en los revoques finos de las paredes interiores y fachadas de edificios.

A pesar de que una buena parte de las partículas de arenas silíceas estudiadas pasan por el tamiz de 0,80 mm y se retienen en el tamiz de 0,1 mm, no son aptas para la fabricación de vidrios ni arenas metalúrgicas, ya que para este fin se exige un mínimo de SiO_2 igual 95%. Además, la presencia de impurezas como Al_2O_3 , CaO, MgO y Fe_2O_3 es, en este caso, muy elevada.

El estudio granulométrico realizado en esta investigación reflejó la presencia de una fracción importante en el *huso granulométrico* (0,50 mm-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.

Los contenidos significativos en SiO_2 (*total*) cristalina, en contraste con los porcentajes de SiO_2 *reactiva*, de Al_2O_3 y MgO, convierten a estas arenas en materiales poco o nada puzolánicos, inservibles para ser triturados conjuntamente con el clínker de los cementos; sin embargo, son adecuadas para ser empleadas como árido fino (*arenas normalizadas*) en la elaboración de morteros y hormigones.

Como complemento de 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 (*patrón*), indica que la diferencia entre ambas 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). Dicho lo anterior, es irrefutable que las arenas de *El Cacahual* son aptas para sustituir a las arenas normalizadas a escala industrial.

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) de Madrid y al Laboratorio Centralizado de la Escuela de Minas de Madrid, cuyos nombres se citan a continuación: David Revuelta Crespo, Daniel del Barrio, Esteban Estévez Fernández, Guillermina Blázquez Rodea, Raquel Martín Crespo, Santiago Mínguez Marín y Juan José de la Paz García. Agradecen con especial atención a los profesores y alumnos de la Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial por la ayuda brindada durante los trabajos de reconocimiento geológico y muestreo efectuados en la Isla de Bioko, en el mes de marzo de 2012.

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.

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

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

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

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