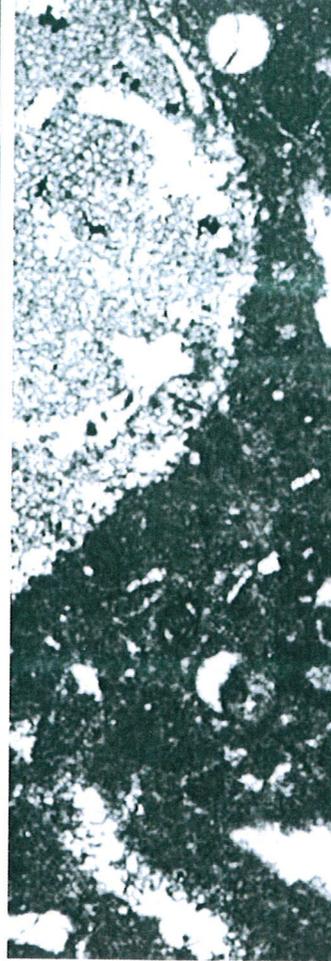
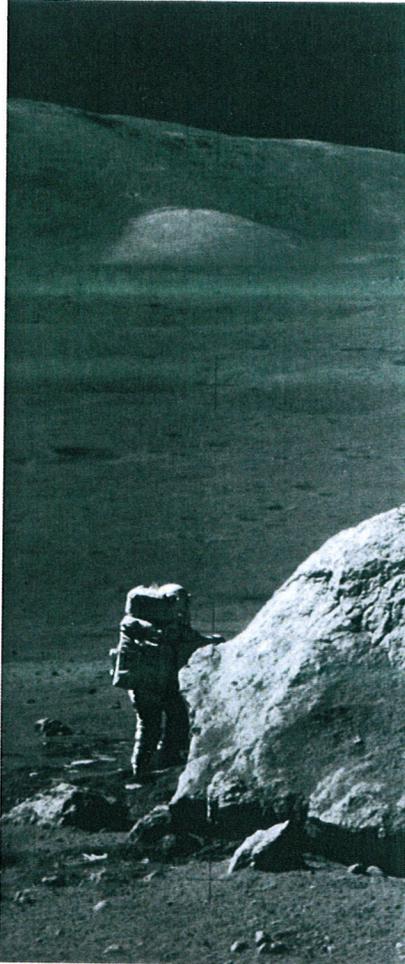
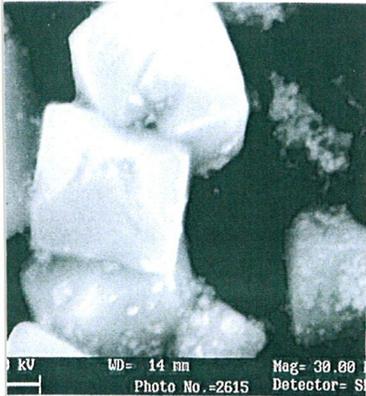


GEOMATERIALES

Materiales de construcción y desarrollo sostenible



T. Sanfeliu y M.M. Jordan, (eds.)

EXPLORACIÓN DE ARCILLAS CERÁMICAS EN MATERIALES PALEOZOICOS: LAS PIZARRAS ALUMÍNICAS DEL NORTE DE LA PROVINCIA DE JAÉN

M. VÁZQUEZ¹; J. JIMÉNEZ¹; J. P. RIGOL¹; R. JIMÉNEZ¹; F. NIETO²

¹DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA, UNIVERSIDAD DE JAÉN.

²INSTITUTO ANDALUZ DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEPARTAMENTO DE MINERALOGÍA
Y PETROLOGÍA, UNIVERSIDAD DE GRANADA.

RESUMEN

En este trabajo se muestran los resultados de un estudio de exploración de arcillas cerámicas en las pizarras de la Zona Centro-Ibérica del Macizo Ibérico del Norte de la provincia de Jaén. Se ha evaluado la aplicabilidad cerámica para la fabricación de pavimentos y revestimientos de los materiales muestreados en dos secuencias representativas. Este trabajo ha puesto de manifiesto que las pizarras ricas en caolinita del Silúrico son las materias primas de mayor interés para la elaboración de productos de mayor valor añadido, ajustándose sus características composicionales y tecnológicas a las de las pizarras alumínicas. Para la localización de cualquier yacimiento es imprescindible disponer de un modelo genético de formación. Por ello, se realizó un estudio integral detallado de las características composicionales y texturales de las pizarras alumínicas silúricas identificadas, el cual reveló la influencia en la formación de estas rocas de la intrusión del stock de Santa Elena, la acción de una zona de cizalla y la alteración producida por la circulación de fluidos hidrotermales a través de dicha zona. Existen numerosos métodos de prospección minera, entre los cuales destacan, por su importancia y frecuencia de aplicación, la prospección geoquímica y geofísica, y en las últimas décadas, la teledetección. Entre las excelencias de esta

última técnica hay que señalar su capacidad de proporcionar información a escalas relativamente grandes sobre amplias regiones de la superficie terrestre. Por tanto dado que el modelo genético de las pizarras alumínicas de la región se ajusta en gran medida a casos de estudio en los que la teledetección ha sido empleada con éxito, se aplicó esta herramienta para la localización de zonas explotables de estos materiales.

INTRODUCCIÓN

Las pizarras alumínicas o sericíticas son materiales muy valorados en la industria cerámica ya que tienen importantes aplicaciones, tales como la fabricación de porcelanas silíceas y aluminosas, refractarios silíceo-aluminosos o agregados ligeros obtenidos por expansión, así como la elaboración de pastas cerámicas en general (cordierita, cordierita-mullita). La buena plasticidad de las pizarras alumínicas hace su uso adecuado para conformado por prensado, extrusión y colage. Además, poseen una buena resistencia mecánica en crudo y en cocido. También presentan un amplio margen de cocción, con bajas temperaturas de sinterización, no presentan deformaciones para temperaturas menores de los 1400° C y tienen una gran facilidad para la mullitización, debido al pequeño tamaño de la illita y de la caolinita. Todas estas propiedades hacen de este material una materia prima de alto interés cerámico. Desde un punto de vista composicional, estas pizarras son materiales arcillosos con altos contenidos en alúmina (> 30 %) que se localizan en determinados niveles del Ordovícico, Silúrico o Devónico. Su mineralogía está compuesta fundamentalmente por caolinita y sericita. La presencia de pirofilita ha sido descrita por Espinosa de los Monteros *et al.* (1978), Galán (1981), Mesa (1986), Parras *et al.* (1994, 1995 a y b) y Parras (1996). En algunas ocasiones se ha descrito la presencia de montmorillonita, clorita, lepidocrocita y goethita (Tirado y Paneque, 1981 y Díaz Hernández *et al.*, 1993). Estas pizarras están representadas fundamentalmente en las provincias de Badajoz, Ciudad Real y Córdoba (Espinosa de los Monteros *et al.*, 1978; García Ramos *et al.*, 1986; Bellifante *et al.*, 1982; y Mesa, 1986).

En el Norte de la provincia de Jaén existen extensos afloramientos de pizarras y rocas cuarzo-feldespáticas que pertenecen a la parte meridional de la Zona Centro-Ibérica del Macizo Ibérico. Algunas de estas pizarras han sufrido procesos de alteración relacionados con la actividad tectónica, el magmatismo, la actividad hidrotermal y la formación de los yacimientos de metales base del distrito minero de Linares-La Carolina (Vázquez, 2003). Tales procesos de alteración han dado lugar en otras regiones a pizarras ricas en alúmina (sericíticas o alumínicas) que permiten la elaboración de productos de alto interés cerámico.

En este trabajo se exponen los resultados publicados por Vázquez (2003, 2004), concretamente los referentes al estudio de exploración de arcillas cerámicas en las pizarras de la Zona Centro-Ibérica del Macizo Ibérico del Norte de la provincia de Jaén. Este trabajo comprendió una caracterización composicional y tecnológica de los materiales paleozoicos, además de un estudio sobre la génesis de las pizarras de alto interés cerámico como criterio para la localización de posibles yacimientos mediante técnicas de teledetección.

COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES CERAMICAS DE LAS PIZARRAS PALEOZOICAS

Se han estudiado dos de las secuencias más representativas de pizarras paleozoicas que afloran al norte de la provincia de Jaén, las cuales se sitúan en la Unidad Estructural Paratúctona de la parte meridional de la Zona Centro Ibérica de Macizo Ibérico (Martínez-Poyatos *et al.*, 1995, 1997, 2001 a; Simancas *et al.*, 2001). Estas secuencias son la del Ordovícico inferior al Carbonífero inferior del parque natural de la Sierra de Andujar y la del Ordovícico superior al Carbonífero inferior de La Carolina (Figura 1).

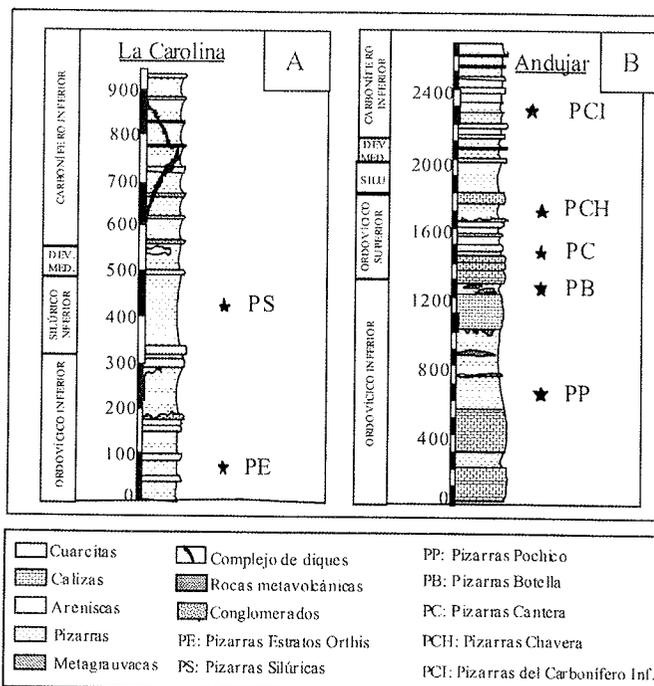


Figura 1. A: Columna estratigráfica de los materiales paleozoicos del área norte de La Carolina. B: Columna estratigráfica de los materiales paleozoicos de la Sierra de Andujar.

Caracterización composicional

Las muestras estudiadas fueron sometidas a estudios mineralógicos y químicos mediante análisis de difracción y fluorescencia de rayos X (XRD y XRF, respectivamente). Para este estudio fueron realizados estimaciones cuantitativas por XRD de la mineralogía total y de la fracción < 2 μm .

Los datos mineralógicos obtenidos por XRD revelaron que las muestras estudiadas son ricas en filosilicatos (53-77 %), cuarzo (15-36 %) y feldespatos (7-15 %) (Tabla 1). El mayor contenido en filosilicatos pertenece a la muestra PS (77 %). Las muestras PCH y PP se caracterizan por la presencia de pequeñas cantidades de hematites. La illita es el principal componente de la asociación de filosilicatos (42-86 %). PS y PE tienen los contenidos más altos de caolinita (29 y 15 %, respectivamente), mientras las muestras PC y PCH están caracterizadas por la presencia de esmectita.

Tabla 1. Composición mineralógica semicuantitativa de las pizarras paleozoicas del Macizo Ibérico (%).

	muestra total en polvo				filosilicatos en A.O. en la fracción < 2 μm					
	Filo	Fds	Qtz	Hem	Prl	Kln	Ill	Chl	Pg	Sm
PS	77	8	15	-	-	29	56	<5	12	-
PE	67	11	22	-	-	15	80	<5	-	-
PCI	58	15	28	-	-	<5	79	17	-	-
PP	57	7	31	6	13	<5	78	<5	-	-
PB	59	15	26	-	-	-	86	<5	10	-
PC	53	11	36	-	-	<5	66	7	-	23
PCH	70	12	16	<5	-	<5	42	15	<5	34

Filo: Filosilicatos, Fds: feldespatos, Qtz: cuarzo, Hem: hematites, Prl: pirofilita, Kln: caolinita, Ill: illita, Chl: clorita, Pg: paragonita, Sm: esmectita. A.O. = Agregado orientado.

La pirofilita sólo aparece en PP. También se encontraron cantidades poco importantes de clorita (< 5-17 %) y, de forma subordinada, esmectita y paragonita.

La composición química determinada por XRF (Tabla 2) manifiesta que las muestras estudiadas contienen altas cantidades de sílice (57-66 %) y alúmina (17-22 %). La muestra PS presenta una concentración excepcionalmente alta en Al_2O_3 , alcanzando valores del 28 %. Las concentraciones de CaO (< 1 %) y MgO (< 2 %) son bajas. Respecto al contenido en elementos alcalinos, las rocas estudiadas son más ricas en K_2O (1.77-4.53 %) que en Na_2O (0.24-1.85 %), fundamentalmente, debido a la composición íltica de las muestras. El contenido en Fe varía en un amplio intervalo. El valor más bajo se localiza en la muestra PS (1.33 %), donde no existe hematites y el contenido en illita es más bajo. Los valores restantes oscilan entre el 5.62 y el 9.21 %, los cuales son debidos a la presencia de hematites (PP y PCH) o illita fengítica (PE, PCI, PB y PC).

Tabla 2. Composición química de las muestras estudiadas (% en peso).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	L.O.
PS	57.06	28.37	1.33	0.01	0.46	0.71	0.62	2.99	1.31	0.04	4.47
PE	63.85	16.65	6.73	1.37	0.44	0.09	0.24	4.53	0.93	0.24	4.37
PCI	56.97	21.90	7.08	0.07	1.90	0.37	0.83	4.48	1.07	0.18	4.93
PP	66.09	19.91	9.21	-	0.19	0.04	0.35	1.77	1.11	0.10	4.39
PB	58.36	20.73	7.05	0.06	1.89	0.29	1.18	3.98	1.02	0.14	4.52
PC	67.26	15.94	5.62	0.04	1.65	0.42	1.85	2.65	0.85	0.19	3.21
PCH	59.30	20.60	6.68	0.07	1.95	0.34	1.16	4.49	1.03	0.19	4.11

L.O.I: Perdida por calcinación (1000° C).

Caracterización tecnológica

Los ensayos tecnológicos consistieron en determinar las propiedades cerámicas de las muestras en crudo y cocidas entre 900 y 1200° C. Para ello se realizó previamente una molienda de las muestras obteniendo tamaños de partículas < 100 μ . Sobre este material molido se determinó los índices de plasticidad y se moldearon probetas por prensado. Posteriormente, se midieron los parámetros de contracción lineal, absorción de agua y porosidad abierta.

En la Tabla 3 se muestran los valores de plasticidad y de contracción lineal seco respecto al estado húmedo. Los valores de índice plástico obtenidos en las pizarras estudiadas revelan el comportamiento plástico pobre de estas materias primas, el cual es debido principalmente a los bajos valores del límite líquido (inferiores al 44.6 %), mientras que los valores del límite plástico son inferiores al 36.1 %. Por otra parte, la contracción lineal obtenida en las probetas secas oscila entre un - 0.11 % para la muestra PC y un - 0.33 % en PS.

Tabla 3. Valores de plasticidad y de contracción lineal en crudo de los materiales molidos de las pizarras paleozoicas (%).

	L.L.	L.P.	I.P.	C.L.
PS	44.6	36.1	8.5	-0.33
PE	28.0	22.0	6.0	-0.25
PCI	35.4	29.1	6.3	-0.28
PP	25.0	21.6	3.4	-0.29
PB	32.0	27.5	4.5	-0.19
PC	30.0	19.2	10.8	-0.11
PCH	35.5	24.0	11.5	-0.15

L.L.= Límite Líquido; L.P.= Límite Plástico; I.P.= Índice Plástico; C.L. = Contracción lineal en seco.

Vázquez *et al.* (2001) mostraron que la variación de las propiedades cerámicas durante los ensayos de cocción realizados entre 900 y 1250° C no es uniforme. Los datos de contracción lineal, absorción de agua, porosidad abierta y densidad aparente en función de la temperatura de cocción han sido representados en la Figura 2. Para la mayoría de las muestras estudiadas, las propiedades cerámicas de las arcillas son bastante estables en el intervalo de temperatura situado entre 950° C y 1000° C, donde la absorción de agua varía entre el 16 % y el 25 %, y la contracción lineal oscila entre -1 y 0.4. A partir de los 1000° C, se produce una reducción rápida de la absorción de agua y de la porosidad abierta y un incremento importante de la contracción lineal y de la densidad aparente. Este cambio de tendencia puede relacionarse con el comienzo de la vitrificación. Sin embargo, se puede diferenciar un comportamiento distintivo en determinadas muestras. Las muestras PB, PCH y PC tienen un comportamiento bastante similar, alcanzando valores de absorción de agua de alrededor del 5 % a 1100° C y casi nulos entre 1150° C y 1200° C. Debe subrayarse que los valores más altos de contracción lineal de estos materiales (alrededor del 7 %) se alcanzan a una temperatura de 1150° C. A partir de esta temperatura, se observa una reducción drástica de esta propiedad, oscilando entre el 0 % y el 3 % a 1200° C (Figura 2E, F, G). También se ha encontrado un comportamiento similar en los materiales de las PE, donde la vitrificación se desarrolla en un intervalo de temperatura más estrecho situado alrededor de los 1150° C (Figura 2B). En cambio, en los materiales de PCI, la vitrificación se desarrolla entre 1100 y 1150° C y la máxima contracción se localiza a 1150° C (alrededor del 8 %) (Figura 2C). PS y PP son las pizarras más refractarias. Las piezas cerámicas obtenidas de la muestra PP no se encuentran completamente vitrificadas a 1250° C (la mayor temperatura usada en este trabajo), presentando un valor de absorción de agua del 4 % (Figura 2D). Finalmente, la muestra PS se caracteriza por alcanzar la máxima contracción lineal (alrededor del 8 %) cuando la absorción de agua es cero a 1250° C (Figura 2A). Con respecto al color de cocción (Tabla 4), debe subrayarse el color claro desarrollado a altas temperaturas en la muestra PS con coordenadas L^* , a , b de 69, 2, 9. Por el contrario, el resto de materiales ensayados presentan colores rojizos.

Tabla 4. Coordenadas CIELAB (L^* , a , b) de las muestras cocidas.

	900° C	950° C	1000° C	1050° C	1100° C	1150° C	1200° C	1250° C
PS	(79,10,14)	(80,10,13)	(80,11,12)	(78,11,12)	(76,9,13)	(74,7,13)	(71,4,12)	(69,2,9)
PE	(55,15,17)	(55,15,16)	(55,14,15)	(52,13,12)	(44,11,9)	(40,6,6)	(42,5,7)	(42,4,8)
PP	(59,18,15)	(60,18,15)	(60,17,14)	(58,16,13)	(53,17,14)	(48,16,11)	(42,11,4)	(42,3,4)
PB	(61,19,24)	(61,22,25)	(58,25,25)	(52,25,23)	(44,19,17)	(42,10,6)	(39,5,4)	(45,4,6)
PC	(59,17,22)	(59,20,23)	(57,23,22)	(49,24,21)	(42,17,14)	(40,8,6)	(40,2,2)	(47,2,4)
PCH	(61,16,21)	(60,20,23)	(56,24,22)	(52,23,20)	(44,16,14)	(42,8,5)	(40,2,4)	(45,5,7)

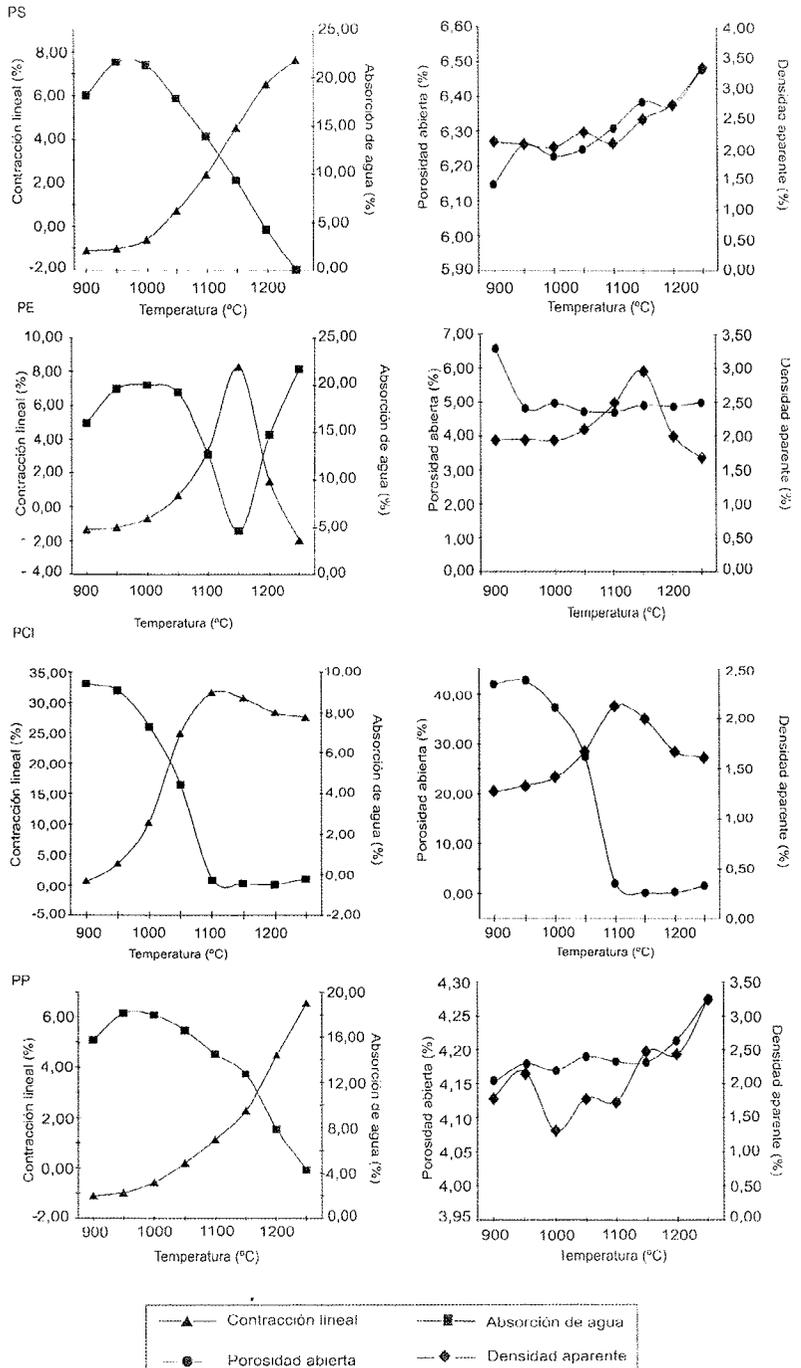


Figura 2. Ensayos de cocción de las pizarras paleozoicas.

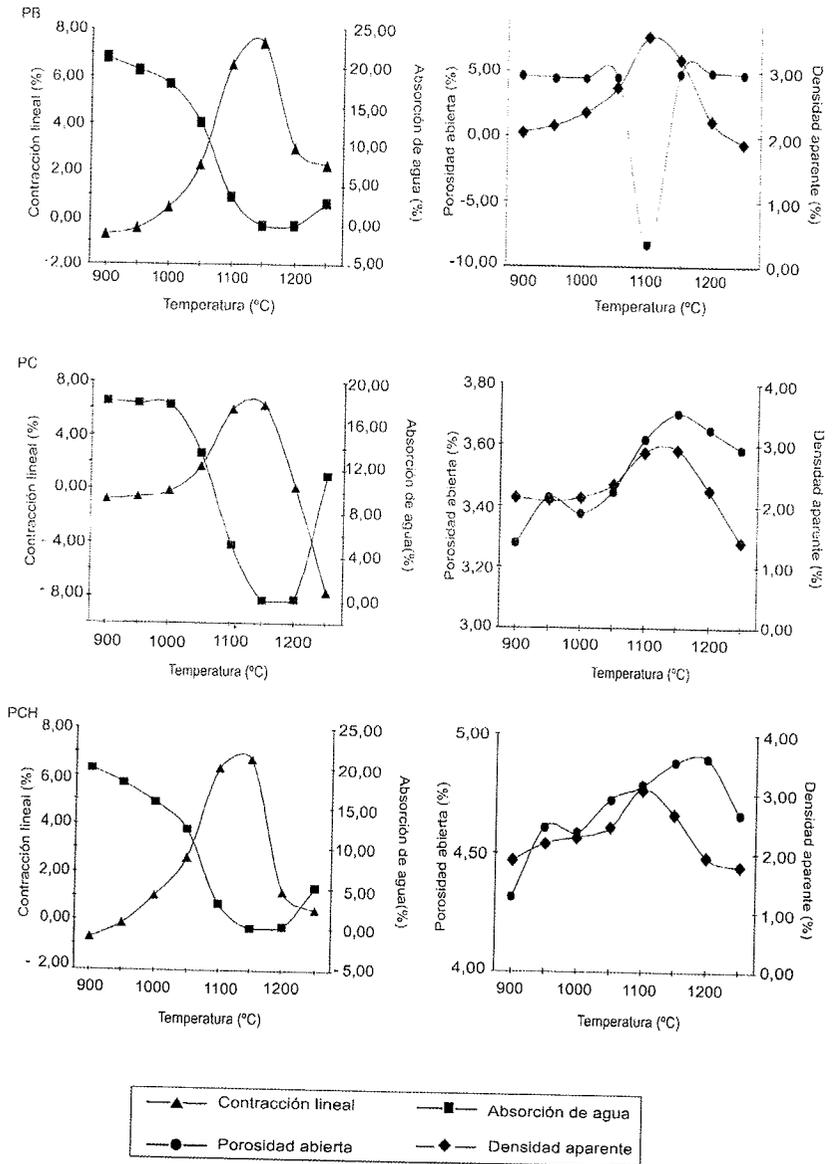


Figura 2. Ensayos de cocción de las pizarras paleozoicas.

Teniendo en cuenta las características mineralógicas, químicas y tecnológicas de estos materiales se pueden diferenciar dos tipos de pizarras con aplicaciones cerámicas distintas.

a) Pizarras ricas en Fe de baja plasticidad.

En este grupo se incluyen la mayoría de las pizarras de las secuencias estudiadas (PCI, PE, PB, PC, PCH y PP). De esta forma, el alto contenido en Fe, debido a la presencia de hematites y/o ilita fengítica, restringe su uso a la fabricación de piezas cerámicas de color rojo. Respecto a las propiedades tecnológicas, hay que señalar que su mal comportamiento plástico hace que este conjunto de pizarras paleozoicas del Norte de la provincia de Jaén sólo sean adecuadas para el moldeo por presión y presenten pobre cohesión durante el secado. Por otra parte, los valores de contracción lineal y de absorción de agua de las piezas cocidas, alrededor de 1000^o sugieren que estos materiales son apropiados para la fabricación de algunos tipos de baldosas cerámicas, tales como mayólica o cottoforte. Además, este estudio ha revelado que, en el intervalo de temperatura de cocción comprendido entre 1150^o y 1250^o C, estas pizarras se pueden usar para manufacturar gres rojo.

b) Pizarras aluminicas de plasticidad moderada.

Sólo se incluyen en esta categoría las PS, cuyas características composicionales son bastante similares a las de las típicamente consideradas como pizarras sericiticas o aluminicas, con altos contenidos en Al₂O₃ y caolinita e ilita como filosilicatos mayoritarios. De esta forma, gracias a su composición química suficientemente pobre en Fe podrían emplearse para la fabricación de piezas gresificadas de color blanco. Además, el elevado contenido en caolinita les proporciona cierto carácter refractario. Por otra parte, su plasticidad es notablemente superior a la del resto de pizarras de la región, lo cual permitiría ampliar su uso hacia el campo de las piezas moldeadas por extrusión. Por tanto, puede concluirse que las características composicionales y tecnológicas revelan que las muestras de PS son los materiales estudiados que presentan un potencial de aplicación cerámica más variado, permitiendo tanto la elaboración de productos moldeados por prensado como por extrusión. Además, la posibilidad de fabricar piezas cerámicas de color blanco supone una diferencia muy importante de calidad respecto al resto de materiales estudiados, lo cual incrementa notablemente su valor en el mercado de materias primas cerámicas. Por ello, como principal conclusión aplicada, los resultados de este estudio recomiendan que las campañas de exploración de materias para la industria cerámica en esta región deberían centrarse en la localización de materiales similares a las PS.

ORIGEN DE LAS PIZARRAS ALUMINICAS DEL NORTE DE JAEN

El contexto geológico en que se encuentran situadas estas pizarras aluminicas, así como algunas de las características determinadas durante su caracterización composicional, sugieren que su génesis, y por tanto su localización, ha sido controlada

por la influencia de los diferentes procesos geológicos que ocurrieron en la región (tectónicos, magmáticos, metamórficos e hidrotermales). Dado que las propiedades de estos materiales son similares a las de las pizarras sercíticas o alumínicas descritas previamente en otras áreas del Macizo Ibérico Meridional y su particular interés en aplicaciones cerámicas es conveniente analizar su origen.

Aspectos clave de la geología del entorno

Martínez Poyatos *et al.* (2001) describió dos paragénesis sincinemáticas producidas en condiciones de metamorfismo de muy bajo grado, las cuales están relacionadas con sus correspondientes episodios de deformación Varisca de la parte Sur de la Zona Centro-Ibérica. La primera fase es de edad devónica y tuvo lugar en condiciones metamórficas de anquizona fuerte a epizona, mientras que la segunda fase de deformación es de edad Carbonífero Medio y produjo asociaciones características de diagenesis a anquizona débil. Esta secuencia de metamorfismo de bajo grado está intruida por un stock granodiorítico que originó una aureola de contacto. Esta aureola se pone generalmente de manifiesto por la presencia de andalucita y se extiende siguiendo una banda que se prolonga decenas de kilómetros hacia el O y el E del *stock* aflorante (Charpentier, 1976; Rios Aragües, 1977; Larrea, 1998; Larrea *et al.*, 1999, Matas y Leyva), coincidiendo, principalmente, con el trazado cartográfico de las pizarras ampelíticas del Silúrico; su límite S es aproximadamente el del trazado del techo de la zona de cizalla extensional.

En esta región también se localizan numerosos yacimientos de metales base del distrito minero de Linares-La Carolina formados por venas con galena, esfalerita, calcopirita, barita, cuarzo, anquerita y calcita; estos yacimientos están relacionados con granitoides del Carbonífero superior, tales como el plutón de Santa Elena o el batolito de los Pedroches.

Las rocas ricas en caolinita se localizan en la zona de cizalla de dirección E-O de unos 500 metros de espesor desarrollada en el borde Sur del *stock* de Santa Elena. Esta banda tiene dirección E-O en el área de Santa Elena y rota a ONO-ESE en la zona más occidental. Las pizarras negras con andalucita del Silúrico se sitúan habitualmente en la parte superior del bloque de muro de la zona de cizalla, mientras que las pizarras del Carbonífero se encuentran, generalmente, en el bloque de techo. La máxima intensidad de deformación se localiza en la franja ocupada por las pizarras silúricas, la cual se caracteriza por la presencia de filonitas que contrastan con la naturaleza foliada de las pizarras carboníferas y la ausencia de deformación penetrativa de la granodiorita de Santa Elena al Norte de la zona de cizalla.

El grado de deformación por cizalla varía del techo al muro de la banda (es de S a N). En la parte superior, pueden observarse zonas de microbrechas arcillosas y pizarras cizalladas con una foliación sigmoidal muy densa (Figura 3 A), cuyo peso puede alcanzar hasta varias decenas de metros. Por el contrario, las pizarras negras de la parte inferior de la banda de deformación desarrollan una fábrica plano-lineal menos intensa, en la que la foliación sigmoidal rodea a cristales fracturados



Figura 3. Aspecto de campo de las rocas de falla de la Zona de Cizalla de la Carolina. A) Zona de microbrechas arcillosas y pizarras cizalladas de la parte superior con una foliación sigmoidal densa. B) Pizarras negras de la parte inferior con una fábrica plano-lineal menos intensa.

andalucita (Figura 3 B). En ambos casos, la foliación milonítica tiene una dirección promedio E-O y buza, comúnmente, hacia el S, aunque, en algunos casos, se han observado variaciones locales en su buzamiento debido al efecto de la última fase de plegamiento. La lineación de estiramiento tiene dirección N-S y hunde hacia el S. Dicha lineación se encuentra definida por una matriz de filosilicatos fibrosos y la alineación del eje *c* de los cristales de andalucita. Los marcadores cinemáticos asociados a estas fábricas indican un desplazamiento del bloque de techo hacia el S a lo largo de toda la banda de cizalla.

Petrografía

Vázquez et al. (2002) y Jiménez Millán et al. (2007) han mostrado mediante estudios de microscopía óptica y electrónica que, dentro de la zona de cizalla, los filosilicatos definen la lineación de estiramiento asociada al desplazamiento. Se han encontrado intercrecimientos muy estirados de moscovita y caolinita de más de 300 μm de longitud. Estos intercrecimientos definen los planos S de las estructuras S-C que rodean a los porfidoblastos de andalucita (Figura 4A). Los cristales de rutilo e ilmenita también aparecen alargados según la dirección de estiramiento. El tamaño de los porfidoblastos de andalucita oscila entre los 3 cm y las 250 μm de longitud. Estos cristales han rotado para orientarse paralelos a la lineación de estiramiento y presentan fracturas oblicuas a esta dirección (Figura 4B). En la zona septentrional también se han observado fracturas siguiendo los planos 110 de la andalucita. Estas fracturas se encuentran rellenas por caolinita o intercrecimientos de clorita y caolinita (Figura 4C). Los cristales de andalucita estirados y fracturados definen grandes sombras de deformación donde también pueden encontrarse intercrecimientos de clorita y caolinita. Los bordes de los granos fracturados de andalucita se encuentran recubiertos por una película fina de moscovita ($< 2 \mu\text{m}$) (Figura 4D). En la zona S las microbrechas ricas en filosilicatos tienen una textura heterogénea y compleja caracterizada por la presencia de microdominios fuertemente deformados por estiramiento cuya continuidad es rota por zonas de sombras de presión donde los cristales de caolinita y moscovita (de alrededor de 30 μm de longitud) se disponen con una textura caótica (Figura 4E). En esta área, las imágenes de SEM y TEM muestran que la andalucita fue extensamente remplazada por cristales de caolinita pequeños (5 μm) y lamelares cuya orientación no se corresponde con la dirección de la deformación (Figuras 4F y 5A). La caolinita casi no presenta defectos estructurales en las imágenes de alta resolución. El estudio de HRTEM también reveló la presencia de pirofilita en las muestras de la zona S de la banda de deformación. Ésta aparece a escala reticular como paquetes pequeños (de hasta 100-200 Å) libres de defectos con periodicidad de 9 Å (Figura 5B).

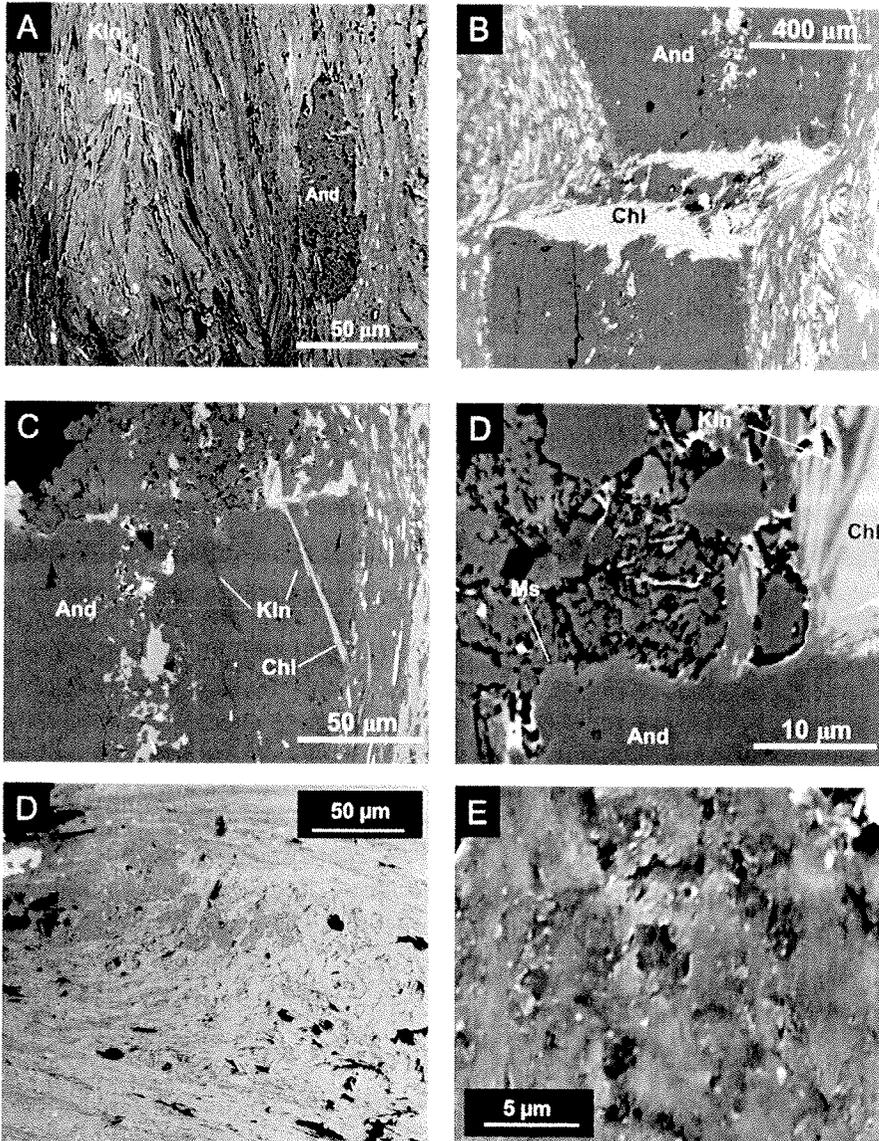


Figura 4. Imágenes de SEM de las pizarras aluminicas de la Carolina. A) Intercrecimiento de caolinita y moscovita definiendo los planos S-C. B) Cristal de andalucita orientado paralelo a la lineación de estiramiento con fracturas oblicuas a esta dirección. C) Cristal de andalucita con fracturas según planos 110 rellenas de caolinita o intercrecimiento de caolinita y clorita. D) Moscovita recubriendo los granos de andalucita. E) Cristales de andalucita estirados y fracturados definiendo grandes sombras de deformación. F) Imagen de electrones secundarios de un cristal de andalucita remplazada por cristales de caolinita pequeños y lamelares con una disposición desordenada.

Texturalmente, a escala TEM los cristales de moscovita contienen una alta densidad de defectos (Figura 4C). Las imágenes de alta resolución revelan la existencia de características producidas por la deformación, tales como planos reticulares curvados, terminaciones de capas y microfracturas que producen cambios de contraste. Esta disposición a escala reticular es similar a la de *boudines* macroscópicos y estructuras de cizallamiento producidas por estiramiento. Los análisis mediante microscopía electrónica de transmisión (AEM) indican que la clorita es rica en Fe (hasta 2.97 átomos por fórmula unidad). La composición de la andalucita y de la caolinita coincide casi exactamente con la de sus valores teóricos.

Posición relativa del metamorfismo de contacto respecto a la deformación de cizalla

La forma alargada de la banda de metamorfismo térmico definida por la presencia de andalucita indica que el magma del *stock* de Santa Elena debió ser emplazado en una cámara desarrollada durante un proceso de extensión regional de dirección N-S. El ascenso del magma pudo estar facilitado por la pre-existencia de una zona de falla. Según Larrea *et al.* (1995), la abundancia de *roof pendants* y de

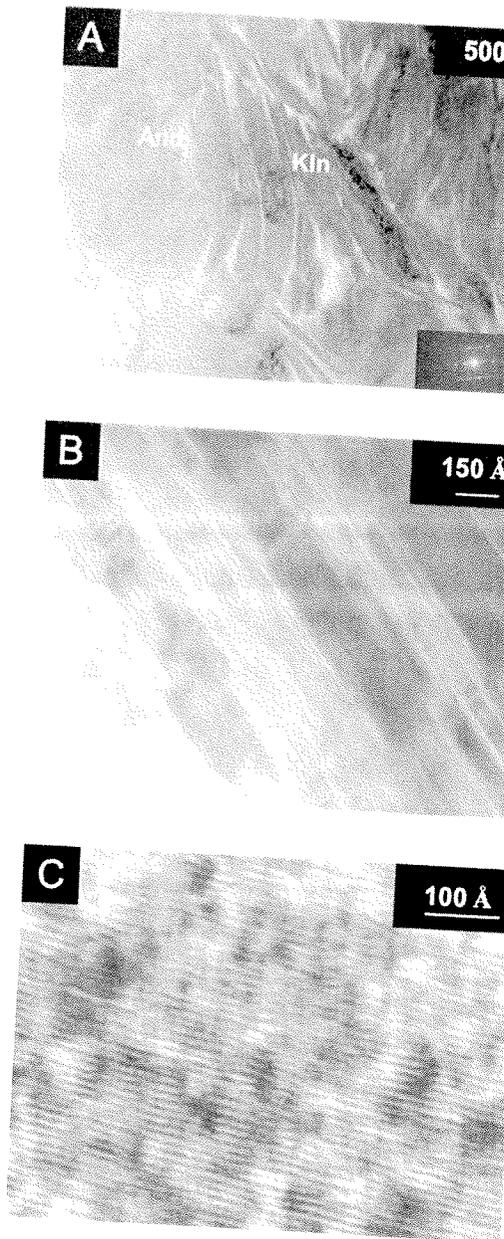


Figura 5. Imágenes de TEM de las pizarras aluminicas de la Carolina. A) Cristales de andalucita remplazados por caolinita. B) Pirofilita en las muestras de la zona S de la banda de deformación. C) Cristal muy deformado de moscovita con una alta densidad de defectos.

pequeños xenolitos pelíticos en el *stock* sugiere que el afloramiento actual corresponde a una zona apical de un cuerpo ígneo de mayores dimensiones en profundidad y alargado en la dirección E-O. En este sentido, Lillo (1992) sugirió que los granitoides del área fueron emplazados en la fase final del ciclo orogénico hercínico. La deformación tectónica asociada a esta fase produjo una red de fracturas (principalmente N90-110E y N45-65E) que actuaron como canales que favorecieron el emplazamiento del magma. Larrea *et al.* (1995) consideran que la intrusión del *stock* de Santa Elena debió de producirse coetánea con la fase de deformación hercínica principal del área.

La fase de metamorfismo de contacto estático descrita en el área es considerada como una consecuencia de la transferencia advectiva del calor debido a la intrusión de los plutones granodioríticos y graníticos de la región. La presencia de una aureola de metamorfismo de contacto con porfidoblastos euhédricos de andalucita orientados al azar en el borde septentrional del *stock* de Santa Elena es la principal evidencia para apoyar esta fase de metamorfismo estático. Las relaciones porfidoblastos-matrites observadas en los materiales cizallados indican que la cristalización de la andalucita postdata la etapa de metamorfismo regional, mientras que la fase de deformación por estiramiento produjo el alargamiento, la rotación y la partición de los cristales de andalucita.

Relación entre la caolinitización y la circulación de fluidos hidrotermales respecto a la deformación por cizalla

La etapa de cizallamiento produjo una banda de deformación en las pizarras lúricas compuesta por materiales miloníticos. Las rocas desarrolladas en zonas de falla o de cizalla pueden producir una permeabilidad de fracturación que favorece su actuación como canales para la circulación de fluidos (Bruhn *et al.* 1994, Pardo 1998). La presencia de depósitos de Pb asociados espacialmente a la zona de cizalla estudiada sugiere que la circulación de los fluidos hidrotermales implicados en la génesis pudo haber sido controlada por la existencia de conductos de alta permeabilidad generados durante la deformación por cizalla. La naturaleza de estas soluciones mineralizantes fue estudiada previamente por Lillo (1992) y Canals y Cardellach (1997), quienes determinaron su origen basándose en los datos de algunos estudios isotópicos de la galena. Canals y Cardellach (1997) sugirieron que, según los datos recogidos por Lillo (1992) y Arribas (1993), la principal fuente del plomo de los depósitos del distrito de Linares-La Carolina se relaciona con los granitos hercínicos del área, si bien, no es posible descartar pequeñas aportaciones de los metamagnetos. Estos autores propusieron un origen similar al de los depósitos de Pb de la Cordillera Costero-Catalana, situada en una posición geotectónica equivalente

al área de estudio. Cardellach *et al.* (1990) establecieron que la temperatura de fluidos mineralizantes de estos depósitos debió oscilar entre 90 y 200 °C.

La alta porosidad y permeabilidad de los materiales de la zona de cizalla pudo facilitar el flujo de fluidos que subsecuentemente reaccionaron con los materiales primarios para producir la formación de los filosilicatos secundarios. En los depósitos hidrotermales es frecuente la existencia de una relación espacial entre la presencia de rocas alteradas y zonas de cizalla (Bruhn *et al.*, 1994, 2000). En estas zonas, el flujo de fluidos y las intensidades de alteración están controlados por las características del efecto producido por la falla y la naturaleza de los protolitos. En el área de estudio, se ha observado una mayor intensidad de deformación en la parte superior de la banda de cizalla, lo cual es puesto de manifiesto por el desarrollo de zonas de alta potencia considerable de microbrechas ricas en arcillas más fuertemente microfracturadas que las pizarras sigmoidales de la parte inferior. Por tanto, la circulación de fluidos estuvo favorecida en la parte superior de la banda de cizalla debido a la mayor permeabilidad de fractura, dando lugar a un desarrollo más importante de la interacción fluido-roca. Esta fuerte alteración de carácter hidrotermal es revelada por su mayor contenido en caolinita, la cual llega a remplazar casi por completo los porfidoblastos de andalucita.

Evolución de la interacción roca-fluido

Kerrick (1986) indicó que muchas zonas de falla que comenzaron su actividad en condiciones de alta temperatura con fluidos calientes locales pueden verse afectadas por fluidos cercanos a la superficie que circulan posteriormente por la zona a profundidades más someras y menores temperaturas. Parry (1998) recogió un conjunto de equilibrios minerales observados en rocas de falla alteradas, mostrando que en rocas con cuarzo, la caolinita no puede estar presente por encima de 270-290 °C. En estos casos, los minerales estables serían pirofilita o moscovita, dependiendo de la composición de la solución.

En el área de estudio, la cristalización en la parte inferior de la zona de cizalla de clorita y pátinas de moscovita rellenas las sombras de presión y las fracturas de los cristales de andalucita, así como la presencia de relictos de pirofilita en la parte superior de esta banda, sugieren la existencia de una primera etapa sincinemática de interacción fluido-roca de alta temperatura. La alteración posterior de clorita, andalucita y moscovita a caolinita indica una segunda fase de interacción desarrollada en condiciones de menor temperatura. El proceso de caolinitización se desarrolló más intensamente en la parte superior de la zona de cizalla. Las relaciones texturales observadas en el SEM y las imágenes de HRTEM de moscovita muy dañada revelan

que la mayor intensidad de deformación de esta área incrementó la fracturación tra- e intercrystalina. Por tanto, la alta energía de deformación asociada a los defectos cristalinos, junto a la presencia de un flujo apropiado de fluidos favorecido por la permeabilidad intra e intercrystalina, debieron jugar un papel esencial para el desarrollo del proceso de caolinitización. La ausencia de orientación tectónica preferencial en la caolinita retrograda que reemplaza a la andalucita es la principal evidencia de que la cristalización de caolinita continuó a lo largo de la zona de alta permeabilidad de la zona de falla después de terminar el movimiento de la zona de cizalla, indicando que la extensión evolucionó hacia condiciones diagenéticas.

En resumen, Jiménez Millán *et al* (2007) han puesto de manifiesto que las pizarras ricas en caolinita de La Carolina se localizan en una banda de cizalla desarrollada a lo largo del plano de falla que divide a las pizarras negras del Silúrico, afectando a los materiales situados en el margen meridional del *stock* de Santa Elena. La formación de estas rocas es consecuencia de la interacción entre la intrusión de un cuerpo ígneo alargado y la circulación de fluidos controlada por el efecto de una zona de cizalla. El metamorfismo de contacto producido por la intrusión produjo la cristalización de andalucita postcinemática respecto a la principal etapa de deformación Varisca y precinemática respecto a la etapa de deformación por cizalla. Esta última deformación incrementó la permeabilidad de los materiales de la banda de cizalla, favoreciendo la circulación de los fluidos que posteriormente dieron lugar a las mineralizaciones de Plomo de este área. La cinética de las reacciones de alteración de los minerales debió estar fuertemente controlada por el efecto de la deformación y el flujo de fluidos. Por tanto, se ha documentado la relación existente entre los procesos de deformación y hidrotermales, mostrando que la deformación controló el movimiento de los fluidos hidrotermales cuya circulación a lo largo de la zona de cizalla produjo el proceso de caolinitización.

USO DE LA TELEDETECCIÓN EN EXPLORACIÓN DE ARCILLAS CERÁMICAS

La caracterización mineralógica y el establecimiento del modelo genético de las pizarras ricas en caolinita estudiadas han aportado datos esenciales para la localización de yacimientos explotables de estos materiales con aplicaciones cerámicas de alto interés. De esta forma, las técnicas de exploración empleadas deben permitir conocer materiales especialmente enriquecidos en filosilicatos que presenten características cartográficas relacionadas con las direcciones principales de la fracturación Varisca que favorecieron la circulación de fluidos hidrotermales capaces de generar volúmenes significativos de alteración.

La teledetección es una fuente importante de datos de exploración geológica y minera, desempeñando en muchas ocasiones un papel prominente en la localización de yacimientos y en la reducción del coste de las tareas de exploración. Su aplicabilidad en la exploración minera está íntimamente ligada al modo de formación y aparición de un depósito mineral, por lo que es fundamental disponer de un modelo genético del yacimiento. Los principales tipos de depósitos se manifiestan, frecuentemente por ciertos indicadores en superficie, algunos de los cuales pueden ser observados en las imágenes de teledetección (litología, estructura, alteraciones y cubierta vegetal).

Rigol *et al.* (2001) aplicaron técnicas de teledetección a los materiales paleozoicos del Norte de la provincia de Jaén, con el objetivo de localizar posibles zonas explotables de pizarras alumínicas entre los materiales que afloran en esta región. El análisis e interpretación de la imagen cociente TM5/TM7 del área de estudio (Figura 6) revela que la zona ocupada por los materiales paleozoicos aparece en tonos más claros que los materiales terciarios y triásicos, sugiriendo que el contenido en filosilicatos de los primeros es relativamente mayor que el de los segundos. En este sentido, el contenido medio en filosilicatos de las pizarras de la región se encuentra alrededor del 60 %. Esta cantidad es superior al contenido promedio de las rocas de la depresión del Guadalquivir (alrededor del 45 %) y de la Cobertera Tabular (entre el 20 y 50 %) (véase González *et al.*, 1998, González, 2001). Además, existen impor-

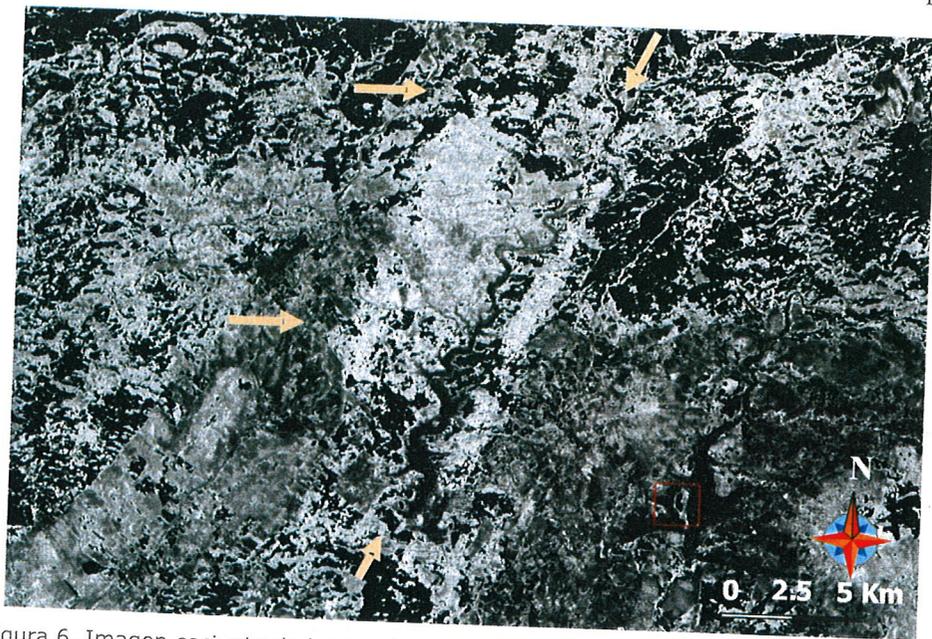


Figura 6. Imagen cociente de las bandas 5 y 7 del sector Norte. Los tonos claros indican mayor contenido relativo en minerales ricos en grupos OH, básicamente filosilicatos. La máscara de vegetación aparece en negro.

tantes variaciones en el contenido de filosilicatos de las pizarras, detectándose materiales donde esta fracción alcanza valores del 77 %. Estos materiales son las pizarras aluminicas situadas al Norte de la provincia de Jaén. Estas pizarras presentan altos contenidos en caolinita (hasta un 41 % de la fracción arcilla) y contenidos de Fe_2O_3 inferiores al 1.4 % (Figura 7). El análisis detallado de la imagen cociente $TM5/TM1$ revela que las zonas con valores altos dentro de los materiales paleozoicos aparecen relacionadas con la intrusión del stock de Santa Elena y la circulación de fluidos controlada por el efecto de una zona de cizalla. Concretamente, se identificó una franja de dirección E-O al Sur del plutón de Santa Elena, coincidiendo con la zona de cizalla de La Carolina y, una franja de dirección N40E al este del Río Guarrizas, en las proximidades del batolito de Linares. Estos resultados demostraron las amplias posibilidades de uso de la teledetección en la fase preliminar de la localización de arcillas de aplicación en la industria cerámica.

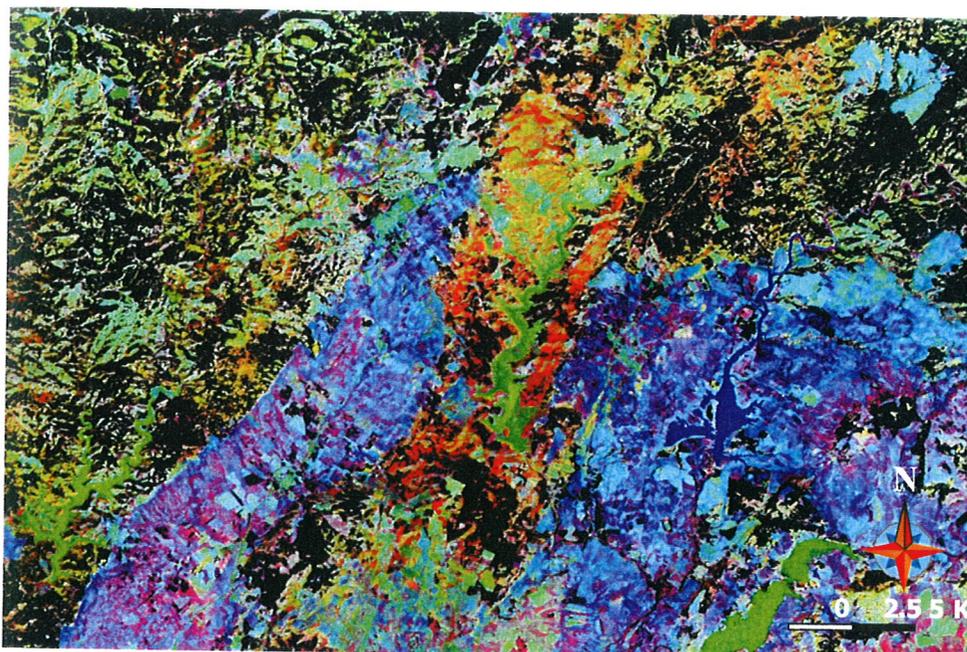


Figura 7. Composición en falso color de los cocientes $5/7$ $5/4$ $3/1$ (RGB) del sector Norte. En tonos rojizos aparecen las zonas con mayor contenido relativo en filosilicatos. Los materiales con mayor contenido relativo en hierro en estado férrico aparecen en azul, mientras que el verde indica hierro en estado ferroso. La máscara de vegetación aparece en negro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores han obtenido la financiación para llevar a cabo este trabajo a través de la *Junta de Andalucía* (Grupo de investigación RNM-325), la *Excelentísima Diputación Provincial de Jaén* mediante el proyecto de Investigación "Posibilidades de uso cerámico de los minerales y rocas industriales" y el proyecto de investigación BTE-2003-07867.

REFERENCIAS

- Arribas, Jr. A. (1993): Observations on the isotopic composition of ore Pb in the Iberian Peninsula. In: "Current research in geology applied to ore deposits", P. Fenoll, J. Torres Ruiz y F. Gervilla, eds. Universidad de Granada, 29-32.
- Bellinfante, N., Tirado, J.L., Paneque, G. (1982). Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, 21, 123-125.
- Bruhn, R.L., Parry, W.T. y Bunds, M.P. (2000). Geological Society of America Bulletin, 112, 550-563.
- Bruhn, R.L., Parry, W.T., Yonkee, W.A. y Thompson, T. (1994). Pageoph., 142, 609-644.
- Canals, A. y Cardellach, E. (1997). Mineralium Deposita, 32, 243-249.
- Cardellach, E., Canals, A. y Tritlla, J. (1990). Acta Geol. Hisp., 25, 75-81.
- Charpentier, J.L., Lethiers, F. y Tamain, G. (1977). Ann. Soc. Geol. Nord., T. XCVI-XCVII.
- Díaz Hernández M, J.L., Raigón M., Ruiz Conde, A., Sánchez Soto, P.J., García Ramos, G. (1993). Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, 32, 209-213.
- Espinosa de los Monteros, J., Álvarez Estrada, D., Morales Poyato, F., Río Sánchez, M.A. (1978). Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, 17, 73-78.
- Galán, E. (1981). Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, 20, 33-39.
- García Ramos, G, Mesa, J., Ruiz Abrío, T., Sánchez Soto, P.J. (1986). Bol. Soc. Esp. Mineralogía, 9, 175-183.
- González, I. (2001): Materias primas del área de Bailén: impacto ambiental de explotaciones. En: "Materias primas y métodos de producción de materiales cerámicos", J. Jiménez-Millán, Ed. Sociedad Española de Arcillas. Jaén, 65-88.
- González, I., Galán, E., Miras, A. y Aparicio P (1998). Clay Minerals, 33, 453-465.

- Jiménez Millán J., Velilla N., Vázquez M. (2007). *Clay Minerals*.
- Kerrich, R. (1986). *Philos Trans R Soc London*, A317, 219-251.
- Larrea, F. (1998). Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, 459pp.
- Larrea, F.J., Carracedo, M., Ortega Cuesta, L.A. y Gil-Ibarguchi, J.L. (1995). *Cua Lab. Xeol. Laxe*, 20, 151-166.
- Larrea, F.J., Carracedo, M.; Alonso, A.; Ortega, L.A. Y Menéndez, M. (1999). *X Reun. Geol. Oeste Peninsular. Extended Abstracts*, 147-157.
- Lillo, J. (1992). *Eur. J. Miner.*, 4, 337-343.
- Martínez Poyatos, D. (1997). Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 222 pp.
- Martínez Poyatos, D., González Lodeiro, F., Azor, A. y Simancas, J.F. (2001 a). *R Soc. Geol. España*, 14, 147-160.
- Martínez Poyatos, D., Nieto, F., Azor, A., Simancas, J.F. (2001 b). *J. Geol. Soc. London*, 158, 953-968.
- Martínez Poyatos, D., Simancas, J.F., Azor, A., González Lodeiro, F. (1995). *R Soc. Geol. España*, 14, 147-161.
- Matas, J. y Leyva, F. (en prensa a). Hoja y Memoria del Mapa Geológico Nacional escala 1:50.000 (MAGNA) nº 865 (Siles). IGME.
- Matas, J. y Leyva, F. (en prensa b). Hoja y Memoria del Mapa Geológico Nacional escala 1:50.000 (MAGNA) nº 886 (Beas de Segura). IGME.
- Matas, J., Leyva, F. y Cabra, P. (en prensa): Hoja y Memoria del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 (MAGNA) nº 864 (Venta de Los Santos). IGME.
- Mesa, J. (1986). Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 318 pp.
- Parras, J. (1996). Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 327 pp.
- Parras, J., Rodas, M., Luque, F.J., Acosta, A. (1994). *Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidri* 33, 23-24.
- Parras, J., Rodas, M., Luque, F.J., Sánchez, C. (1995 a). *Euroclay '95*, 253-254.
- Parras, J., Sánchez, C., Luque, F.J., Rodas, M., Acosta, M. (1995 b). *Geogaceta*, 1 153-154.
- Parras, J., Sánchez-Jiménez, C., Rodas, M., Luque, F.J. (1996). *Appl. Clay Sci.*, 1 25-45.
- Parry, W.T. (1998). *Tectonophysics*, 290, 1-26.

- Rigol J.P., Jiménez Espinosa R., Vázquez M., Jiménez Millán J (2001). Uso de la teledetección para la exploración de arcillas industriales en los materiales paleozoicos del Macizo Ibérico Meridional en el Norte de la provincia de Jaén. En: "Nuevas tendencias en el estudio de las arcillas", J. Jiménez-Millán, J. Ed., Sociedad Española de Arcillas. Jaén, 231-235.
- Ríos Aragües, S. (1977). Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 271 pp.
- Simancas, J.F., Poyatos, D.M., Exposito, I., Azor, A. y Lodeiro, F.G. (2001). Tectonophysics, 332, 295-308.
- Tirado, J.L., Paneque, G. (1981). Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, 20, 297-301.
- Vázquez M. (2003). Tesis Doctoral, Universidad de Jaén, 244 pp.
- Vázquez M. (2004). Macla, 1, 54-58.
- Vázquez M., Jiménez Millán J., Nieto F., Velilla N., Azor A., Poyatos D.M., Martín Parra L. (2002). Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía, 25 A, 101-102.
- Vázquez M., Jiménez Millán J., Sánchez Jiménez C., Parras J. (2001). Composición y propiedades cerámicas de las pizarras de la Zona Centro-Ibérica del Macizo Ibérico Meridional en las proximidades de la industria cerámica de Bailén. En: "Nuevas tendencias en el estudio de las arcillas", J. Jiménez-Millán, Ed., Sociedad Española de Arcillas, Jaén, 242-245.