

Figura 4.6. Sección de una esfera típica presente en las cenizas volantes.

Además de las partículas esféricas se pueden observar partículas de forma irregular principalmente de cuarzo (Figura 4.7a), partículas de inquemados (Figura 4.7b), partículas de calcita (Figura 4.7c) y partículas de anhidrita (Figura 4.7d).

La formación de partículas esféricas se debe a la influencia de elevadas temperaturas en la caldera y a una serie de complejos cambios fisicoquímicos que ocurren en las partículas, el más notable es la rápida conversión a formas esféricas como resultado de las fuerzas de tensión superficial actuando durante la fusión para minimizar la energía libre superficial (Raask, 1985 y Hemmings y Berry, 1988).

La abundancia de fase vítrea en las cenizas volantes se debe al enfriamiento rápido. Las partículas salen de la llama arrastradas por la corriente de gases y pasan rápidamente a un régimen de temperaturas más bajas donde son enfriadas a un estado sólido vítreo. La velocidad de enfriamiento depende del tamaño de la partícula: las partículas grandes enfrían más lentamente permitiendo la cristalización dentro del interior aún fundido de mullita (Figura 4.5d). Además, algunas de las partículas infladas explotan y forman pequeñas gotas fundidas. Otras partículas son enfriadas de la misma forma que las partículas sólidas cuando abandonan definitivamente la llama y se mantienen como esferas huecas con variaciones en el espesor de las paredes.

Una segunda consecuencia de la presencia de gases (O_2 , CO_2 , SO_2 y H_2O) es su posible actuación en las reacciones secundarias con el vidrio que conllevan o a la polimerización o despolimerización de las unidades de sílice.

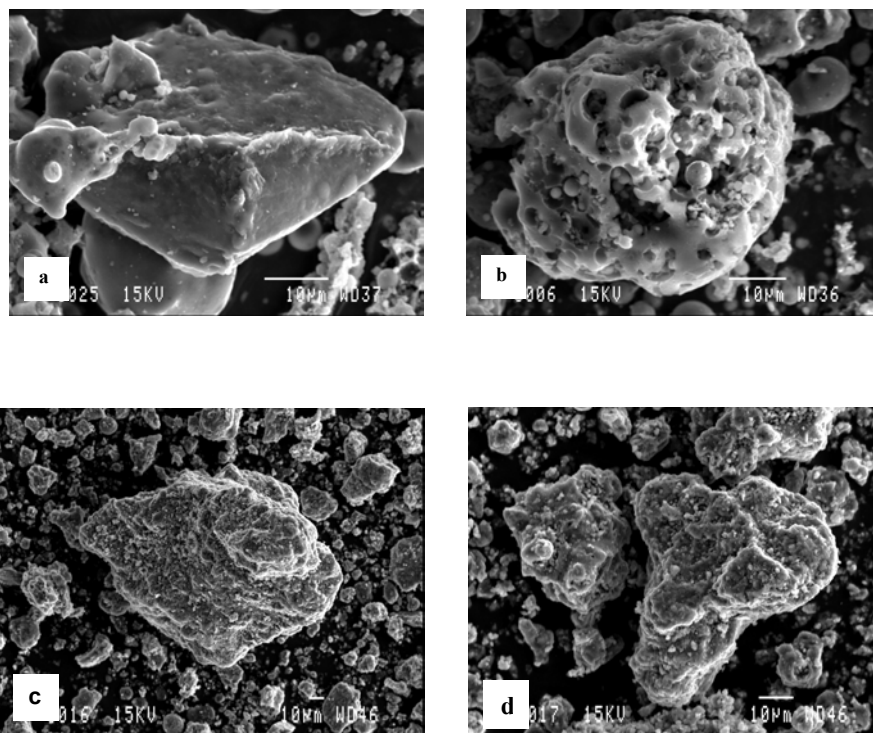


Figura 4.7. Principales formas irregulares presentes en las cenizas volantes: 4.7a. Partícula de cuarzo (ceniza volante de Tasajero); 4.7b. Partícula inquemada (ceniza volante de Paipa); 4.7c. partícula de cal (Escatrón); 4.7d. partícula de anhidrita (Escatrón).

El resultado del proceso de combustión del carbón da lugar a las cenizas volantes, las cuales son heterogéneas (Figura 4.4a) como resultado de la presencia de mezclas de vidrio aluminosilicatado fundido, fases aisladas de óxidos de Fe, Al y Ca, partículas de carbón inquemado y minerales dentríticos (como el cuarzo modificado por la llama o pulido al fuego). De acuerdo a los resultados anteriores de distribución granulométrica, generalmente, las partículas esféricas aluminosilicatadas menores de 10 μm representan más del 50%.

4.1.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

4.1.2.1. Elementos mayoritarios

Los contenidos de óxidos mayoritarios de las cenizas volantes se resumen en la Tabla 4.3. La concentración de elementos mayoritarios es de gran importancia por su influencia en el potencial de aplicación de las cenizas volantes y la concentración de algunos elementos traza pueden tener importancia en cuanto al impacto ambiental en la utilización de las cenizas. Los resultados permiten agrupar las cenizas seleccionadas en diferentes grupos dependiendo de su composición y propiedades. Estas pueden clasificarse, de acuerdo a la norma ASTM C618 (Tabla 1.1), en dos grupos; las

de carácter cementante catalogadas como de clase C y las de naturaleza puzolánica como de clase F. De acuerdo a esta clasificación la mayor parte de las cenizas volantes de este estudio se pueden catalogar dentro de las de tipo F, con excepción de Cercs que es de tipo C. Las cenizas volantes de Escatrón no pueden catalogarse dentro de la norma ASTM C618, debido a que el sistema de combustión utilizado en esta central es de lecho fluidizado con inyección de caliza y las cenizas volantes provenientes de Colombia tampoco debido a que exceden los parámetros de pérdidas a la incineración.

Algunos autores utilizan otras clasificaciones; ricas en calcio, ricas en hierro y ricas en Al-Si (Querol et al., 1997). De acuerdo a esta clasificación la ceniza FBC de Escatrón puede clasificarse como una ceniza volante de tipo sulfo-cálcico y la de Cercs como de tipo cálcico (Figura 4.8). Estas dos cenizas tienen un bajo potencial de aplicación como materia prima en la síntesis de zeolitas debido al bajo contenido en aluminosilicatos.

Las cenizas volantes de Dou He, SA1 y SA3 contienen altos contenidos de sílice (48.7, 53.0 y 55.5%, respectivamente) y alúmina (40.7, 34.2 y 33.0%, respectivamente) (Figura 4.8) y muy bajos contenidos de impurezas mayores (Fe, Ca, y S). Esta ceniza volante puede clasificarse como silíceo. Las cenizas volantes de Puertollano y Espiel presentan también un alto contenido de alúmina y sílice. Estas cenizas tienen un alto potencial para la síntesis de zeolitas.

Las cenizas volantes de Escucha, Teruel y La Robla se caracterizan por un contenido relativamente alto en óxidos de hierro (14.3, 16.6 y 14.3%, respectivamente) mientras que las de Los Barrios y la SA2 son relativamente altas en óxidos de calcio (9.0 y 8.3%) (Figura 4.8).

Las cenizas volantes de Soto de Ribera, Espiel, Compostilla y Narcea por un contenido relativamente alto de óxido potásico (4% K_2O). Las demás cenizas volantes seleccionadas presentan diferentes concentraciones de impurezas. Sin embargo, los contenidos de sílice y alúmina son similares. Estas cenizas volantes pueden clasificarse como de tipo ferro-calco-silíceas (Figura 4.8).

Otro parámetro importante en la síntesis de zeolitas es la relación SiO_2/Al_2O_3 (Tabla 4.3). Las cenizas volantes estudiadas tienen una relación entre 1.2 y 2.7, exceptuando a Escatrón 3.8. Estos valores representan un rango amplio con respecto a las cenizas volantes utilizadas en síntesis de zeolitas en trabajos anteriores (1.6-2.6). Las cenizas volantes de As Pontes, Teruel, La Robla y Escucha se caracterizan por contenidos altos de hierro y una relación SiO_2/Al_2O_3 entre 1.5 y 1.9. Las cenizas volantes de Soto de Ribera, Puertollano, Espiel, Compostilla, Dou He, SA1 y SA3, se caracterizan por bajos contenidos de óxidos de hierro y una relación SiO_2/Al_2O_3 desde 1.2 (Dou He) hasta 2.0 (Puertollano). Narcea y Meirama por contenidos de calcio y de hierro intermedios y una relación SiO_2/Al_2O_3 alta (2.0-2.4).

Tabla 4.3. Contenido en óxidos mayoritarios de las cenizas volantes seleccionadas. Las concentraciones vienen expresadas en % en peso.

	Escatrón	Teruel	Escucha	Robla	Compostilla	Meirama	Narcea	As Pontes	Cercs	Puertollano
SiO ₂	19.6	47.2	49.5	40.1	49.8	51.9	54.3	46.7	27.8	58.4
Al ₂ O ₃	5.1	25.6	26.7	23.3	26.1	26.4	23.0	31.0	13.7	29.3
Fe ₂ O ₃	2.7	16.6	14.3	14.3	8.4	4.8	7.0	9.4	4.3	7.5
CaO	44.5	5.6	2.3	8.9	2.7	7.5	4.2	6.7	42.6	0.9
MgO	0.7	1.2	1.1	2.0	2.4	2.3	2.7	1.9	0.8	1.0
Na ₂ O	0.5	0.2	0.3	0.3	0.8	0.4	0.8	0.3	0.6	0.4
K ₂ O	0.6	1.6	2.3	2.6	4.3	0.8	3.9	1.3	0.9	2.4
P ₂ O ₅	0.08	0.2	0.3	0.8	0.5	0.4	0.2	0.2	0.4	0.1
TiO ₂	0.2	0.8	1.0	0.9	1.0	1.5	1.1	1.2	0.5	0.7
MnO	0.02	0.04	0.03	0.01	0.08	0.05	0.09	0.01	0.05	0.01
SO ₃	23.2	0.6	0.4	0.4	0.3	0.2	0.1	0.8	3.3	0.2
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3.8	1.8	1.9	1.7	1.9	2.0	2.4	1.5	2.0	2.0
	Espiel	Barrios	S. de Ribera	Dou He	SA1	SA2	SA3	Paipa	Tasajero	
SiO ₂	52.0	45.1	49.6	48.7	53.0	51.8	55.4	56.6	51.8	
Al ₂ O ₃	34.2	37.6	32.3	40.7	34.2	29.3	33.0	21.1	22.1	
Fe ₂ O ₃	6.1	2.8	7.7	3.5	2.5	3.0	2.6	4.6	6.2	
CaO	2.1	9.0	3.2	2.8	5.2	8.3	4.6	0.7	0.6	
MgO	1.6	2.2	1.7	0.5	1.4	2.3	1.2	0.6	0.4	
Na ₂ O	0.6	0.4	0.7	0.2	0.4	0.7	0.4	0.3	0.2	
K ₂ O	4.1	0.7	4.2	0.6	0.4	0.6	0.4	1.4	0.9	
P ₂ O ₅	0.4	1.7	0.1	0.4	0.8	1.5	0.4	0.4	0.1	
TiO ₂	0.9	1.5	0.9	1.3	1.6	1.4	1.5	1.0	1.0	
MnO	0.10	0.08	0.04	0.06	0.03	0.08	0.06	0.01	0.01	
SO ₃	0.1	0.7	0.4	0.4	0.4	1.0	0.3	0.5	0.5	
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1.5	1.2	1.5	1.2	1.5	1.8	1.7	2.7	2.2	

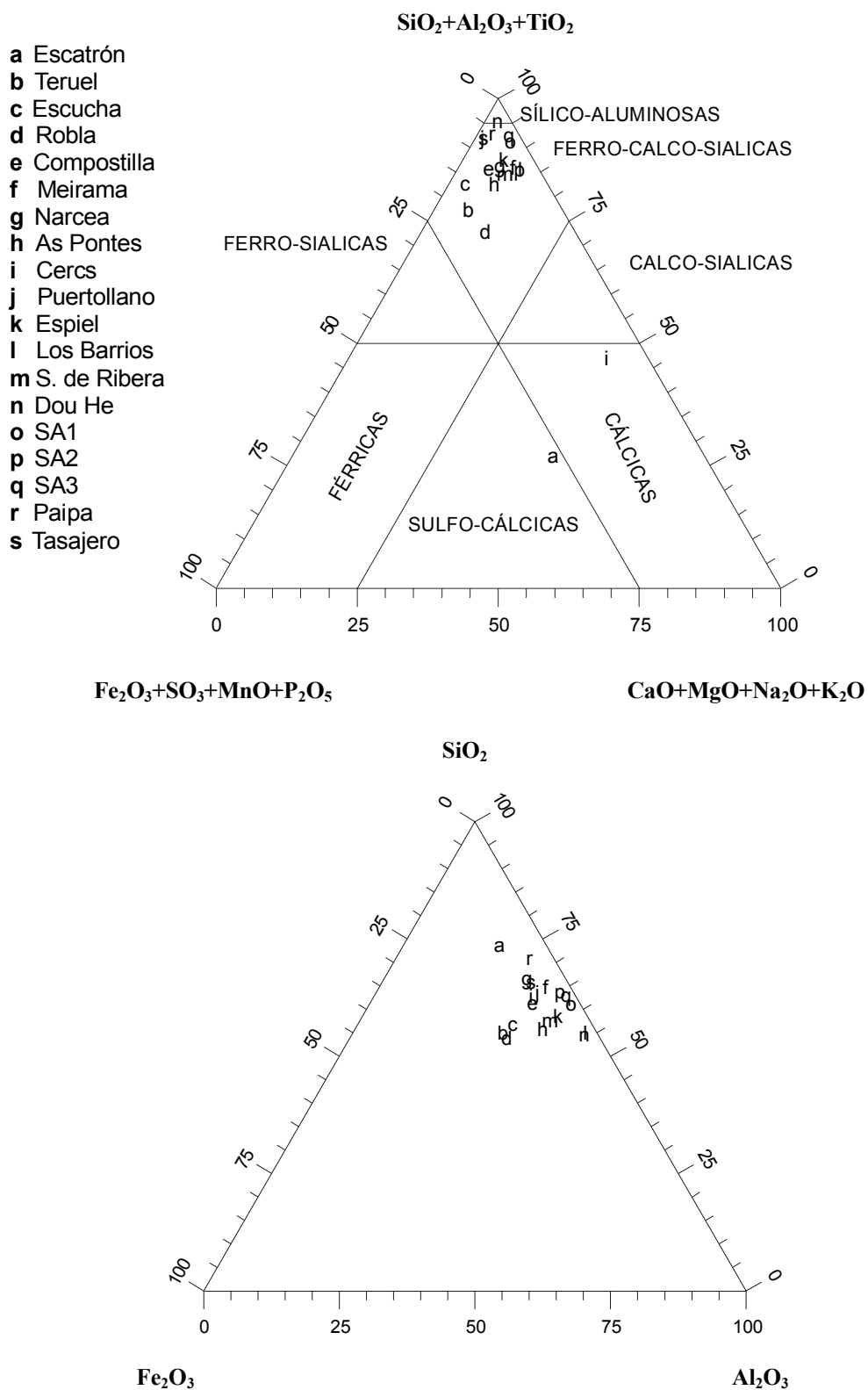


Figura 4.8. Clasificación de las cenizas volantes seleccionadas en función del contenido relativo de óxidos mayoritarios.

4. Resultados y discusión

Las cenizas volantes colombianas se caracterizan por una relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ alta (2.2 y 2.7%).

El contenido de nitrógeno de las cenizas volantes estudiadas (Tabla 4.4) es bajo (<0.25%). En cuanto al contenido de carbono (Tabla 4.4), se observan valores muy altos en las cenizas volantes de Paipa y Tasajero (Aproximadamente 13%) y niveles entre 2.1 y 4% en Escatrón, Escucha, Compostilla, Meirama, Narcea, Espiel, Barrios. Las demás cenizas volantes presentan valores inferiores a 1.5%.

Tabla 4.4. Contenido en nitrógeno y carbono de las cenizas volantes (%).

	N	C
Escatrón	0.024	3.7
Teruel	0.024	0.6
Escucha	0.054	4.0
Robla	0.096	0.9
Compostilla	0.047	3.8
Meirama	0.068	2.4
Narcea	0.036	2.1
As Pontes	0.005	0.9
Cerco	0.026	1.4
Puertollano	0.106	1.5
Espiel	0.027	2.3
Barrios	0.042	3.9
S. de Ribera	0.026	1.0
Dou He	<0.01	0.5
SA1	0.025	0.6
SA2	0.025	0.5
SA3	0.025	0.8
Paipa	0.190	12.5
Tasajero	0.220	13.4

4.1.2.2. Elementos traza

La concentración de elementos traza tiene implicaciones importantes debido al impacto ambiental que se puede llegar a derivar a partir del potencial de solubilización de determinados elementos peligrosos durante la síntesis de zeolitas, y a posteriori, durante sus diferentes aplicaciones.

La Tabla 4.5 resume el contenido de elementos traza en las cenizas estudiadas. Los contenidos de Be (1.6-13 mg kg⁻¹), Co (6-59 mg kg⁻¹), Cr (36-349 mg kg⁻¹), Cu (11-170 mg kg⁻¹), Ni (14-190 mg kg⁻¹), Sn (2.4-15 mg kg⁻¹), Th (6.3-66 mg kg⁻¹) y V (72-419 mg kg⁻¹) no muestran grandes variaciones entre las cenizas en estudio. Sin embargo los siguientes elementos presentan enriquecimiento en una o varias de las cenizas estudiadas:

Síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes de centrales termoeléctricas de carbón

- As En las cenizas volantes de La Robla, Puertollano y Compostilla(107-129 mg kg⁻¹), las demás cenizas volantes muestran entre 14-71 mg kg⁻¹.
- B En las cenizas volantes de Teruel y Escucha (339-313 mg kg⁻¹) las otras cenizas volantes presentan entre 61-173 mg kg⁻¹.
- Ba En las cenizas volantes SA2, Los Barrios, As Pontes, Compostilla, Meirama, SA1, Narcea y SA3 (2511, 2260, 2254, 1202, 1296, 1199,1143 y 1029 mg kg⁻¹), las demás cenizas volantes contienen entre 351-973 mg kg⁻¹.
- Cd En la ceniza volante de Tasajero 11.0 y Puertollano 3.4 mg kg⁻¹, en las demás cenizas volantes se encuentra entre 0.5-1.5 mg kg⁻¹.
- Cr En las cenizas volantes SA1 y SA3 (349 y 325 mg kg⁻¹), en las restantes cenizas volantes entre 36-199 mg kg⁻¹
- Ge En las cenizas volantes de Puertollano, Tasajero y Los Barrios 70, 23 y 15 mg kg⁻¹ respectivamente, las demás contienen entre 2.3-9.2 mg kg⁻¹.
- Hg En las cenizas volantes de Cercs y Puertollano 0.63 y 0.16 mg kg⁻¹ las otras cenizas volantes entre <0.01-0.05 mg kg⁻¹.
- Li En las cenizas volantes de Dou He, SA2, Los Barrios, Espiel (328-453 mg kg⁻¹) en las demás cenizas volantes entre 77-298 mg kg⁻¹.
- Mo en las cenizas volantes de Cercs, Tasajero y Escatrón 60, 46 y 32 mg kg⁻¹ respectivamente las demás cenizas volantes contienen entre 4-17 mg kg⁻¹.
- Ni En la ceniza volante SA1, 990 mg kg⁻¹, en las demás entre 14 y 190 mg kg⁻¹.
- Pb En la ceniza volante de Puertollano 751 mg kg⁻¹, las demás entre 44-164 mg kg⁻¹.
- Rb En las cenizas volantes de Compostilla, Espiel, Soto de Ribera, Narcea, Robla, Puertollano y Escucha (121-201 mg kg⁻¹), las demás cenizas entre 24-83 mg kg⁻¹.
- Se En las cenizas volantes de Tasajero, Paipa, SA2, SA1, SA3, Cercs, y Dou He (52, 20, 16,12, 10, 9 y 8 mg kg⁻¹ respectivamente, las otras cenizas volantes muestran entre 0.9-3.5 mg kg⁻¹.
- Sr En las cenizas volantes de SA-2, Cercs, Los Barrios, Meirama, Dou He, SA1, SA3, y As Pontes (2887, 2691, 2688, 918, 891, 784, 766 mg kg⁻¹

Tabla 4.5. Contenido en elementos traza (mg kg⁻¹) de las cenizas volantes estudiadas.

	Escatrón	Teruel	Escucha	La Robla	Compostilla	Meirama	Narcea	As Pontes	Cercs	Puertollano
As	18	48	38	129	107	33	69	67	36	112
B	101	339	313	80	61	88	66	150	142	77
Ba	134	351	512	679	1202	1296	1143	2254	696	531
Be	1.6	9.2	10.4	4.6	5.6	5.2	4.0	7.5	4.8	13.0
Cd	0.5	0.6	0.6	1.0	1.0	0.6	1.1	1.3	0.7	3.4
Co	6	28	22	42	37	15	33	59	18	31
Cr	36	114	123	163	159	98	157	129	94	130
Cu	11	61	43	86	101	64	85	137	35	88
Ge	2.5	3.6	4.9	2.8	3.0	5.6	2.3	4.5	6.9	70
Hg	<0.01	0.01	<0.01	0.02	0.05	<0.01	0.05	<0.01	0.63	0.16
Li	17	200	267	187	230	87	189	77	118	146
Mo	60	15	7	20	12	7	9	8	32	10
Ni	14	89	75	123	97	60	102	190	68	101
Pb	9.8	52	70	142	124	59	63	73	44	770
Rb	36	83	121	144	201	36	160	69	84	135
Se	1.1	0.9	1.6	3.3	2.3	3.4	2.4	2.7	9.5	2.5
Sn	2.4	5.3	8.8	5.6	7.4	7.5	5.7	8.0	6.5	11.5
Sr	339	568	489	433	339	918	272	766	2691	152
Th	6.3	23	30	30	33	32	3	44	22	34
U	49	21	12.7	17.1	9.6	10.9	9	12.6	37	12.6
V	72	154	168	278	210	252	202	233	137	191
Zn	73	147	274	262	208	79	166	230	86	1233

Tabla 4.5. Continuación.

	Espiel	Los Barrios	S. de Ribera	Dou He	SA1	SA2	SA3	Paipa	Tasajero
As	71	14	59	15	25	23	23	26	49
B	188	151	82	126	125	85	104	173	68
Ba	973	2260	755	455	1199	2511	1029	790	670
Be	5.1	8.9	5.3	7.4	10.7	10.9	10.0	4.0	11.0
Cd	0.7	1.3	0.8	1.6	1.5	0.8	1.2	<1	11.0
Co	26	42	32	14	23	25	21	20	50
Cr	199	171	166	54	349	196	325	96	129
Cu	87	75	79	72	82	73	77	70	170
Ge	4.6	15.2	4.1	7.5	7.3	9.2	6.3	9.0	23.0
Hg	0.04	0.03	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Li	453	331	230	385	298	328	297	85	69
Mo	40	10	7	15	17	11	7	15	46
Ni	76	103	112	32	990	64	94	56	138
Pb	85	97	88	164	140	64	111	52	48
Rb	200	33	200	24	38	43	37	80	49
Se	2.7	1.7	3.5	8.0	12.2	16.1	9.7	20	52
Sn	6.7	12.8	7.0	14.8	18.3	16.2	16.0	5.0	5.0
Sr	438	2688	317	918	891	2887	784	596	181
Th	33	66	28	62	66	58	63	26	23
U	6.2	18.3	7.5	17.2	24.8	20.3	22.5	4.0	11.0
V	249	164	298	128	262	185	225	218	419
Zn	169	171	215	218	148	75	131	141	309

4. Resultados y discusión

respectivamente). Las restantes cenizas volantes contienen entre 152-596 mg kg⁻¹.

U En Escatrón y Cercs 49 y 37 mg kg⁻¹, respectivamente, las demás cenizas volantes entre 3.2 -24.8 mg kg⁻¹.

Zn Las cenizas volantes de Puertollano contienen 1233 mg kg⁻¹, mientras que las demás presentan entre 79 -309 mg kg⁻¹.

4.1.3. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

Es de importancia para favorecer la síntesis de zeolitas que las cenizas volantes presenten un alto contenido en fase vítreas y/o en minerales aluminosilicatados así como, bajos contenidos de óxidos y sales de hierro, azufre y calcio

Las fases inorgánicas mayoritarias presentes en las cenizas volantes estudiadas son (Figura 4.9): vidrio, mullita (Al₆Si₂O₁₃), cuarzo (SiO₂), magnetita (Fe₃O₄), anortita-albita ((Ca,Na)(Al,Si)₄O₈), anhidrita (CaSO₄), hematita (Fe₂O₃) y cal (CaO).

En la Tabla 4.6, se pueden observar los diferentes contenidos de cada una de estas fases presentes en las cenizas volantes en estudio. De esta Tabla se deduce que las cenizas volantes de Compostilla, Espiel y Soto de Ribera presentan el contenido más alto en vidrio (93.9, 92.0 y 81.3% respectivamente), mientras que las cenizas volantes de Escatrón, Cercs, SA1, SA3, Paipa y Tasajero (12.3, 50.3, 52.9, 50.1, 50.4 y 50.2% respectivamente) muestran el contenido más bajo.

Escatrón y Cercs, presentan además altos contenidos en cal, anhidrita y carbonatos (Figura 4.9.).

La Robla y Los Barrios también presentan pequeñas cantidades de cal. Las cenizas volantes de As Pontes, Teruel, Escucha, Narcea, Puertollano y Meirama mostraron una composición mineralógica similar con diferentes proporciones de cuarzo, mullita y óxidos de hierro (Figura 4.9.).

Las cenizas volantes de Los Barrios, Dou He, SA1, SA2, SA3, Paipa y Tasajero muestran altos contenidos de mullita (Figura 4.9). Paipa y Tasajero presentan los niveles más altos en cuarzo (37.8% y 29.7% respectivamente).

Tabla 4.6. Composición mineralógica de las cenizas volantes. Contenidos en % en peso cuantificados por DRX.

	Mullita	Cuarzo	Anhidrita	Calcita	Cal	Magnetita	Feldspato	Vidrio
Escatrón	<0.1	21.1	38.6	27.9	<0.1	0.2	<0.1	12.3
Teruel	4.4	18.2	1.5	<0.1	<0.1	8.9	<0.1	67.0
Escucha	7.8	16.9	0.9	<0.1	<0.1	2.7	<0.1	71.7
Robla	1.8	8.0	1.5	<0.1	4.9	7.9	0.9	75.1
Compostilla	0.4	3.1	0.2	<0.1	<0.1	2.4	<0.1	93.9
Meirama	3.0	22.6	3.0	<0.1	<0.1	1.8	0.7	68.8
Narcea	0.7	15.7	0.2	<0.1	0.7	2.1	0.2	80.4
As Pontes	7.2	12.3	1.0	<0.1	<0.1	3.5	7.2	68.8
Cercs	1.0	3.0	4.9	<0.1	39.3	1.5	0.0	50.3
Puertollano	3.2	17.0	0.0	<0.1	<0.1	1.3	0.0	78.5
Espiel	2.9	3.3	0.0	<0.1	<0.1	1.8	0.0	92.0
Barrios	20.8	4.5	1.3	<0.1	4.1	0.5	2.5	66.4
S. de Ribera	8.1	9.3	<0.1	<0.1	<0.1	1.4	<0.1	81.3
Dou He	30.2	1.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	68.2
SA1	41.3	5.8	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	52.9
SA2	29.4	7.5	1.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	61.7
SA3	42.6	6.4	0.9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	50.1
Paipa	10.8	37.8	<0.1	<0.1	<0.1	1.1	<0.1	50.4
Tasajero	19.4	29.7	<0.1	<0.1	<0.1	0.8	<0.1	50.2

4. Resultados y discusión

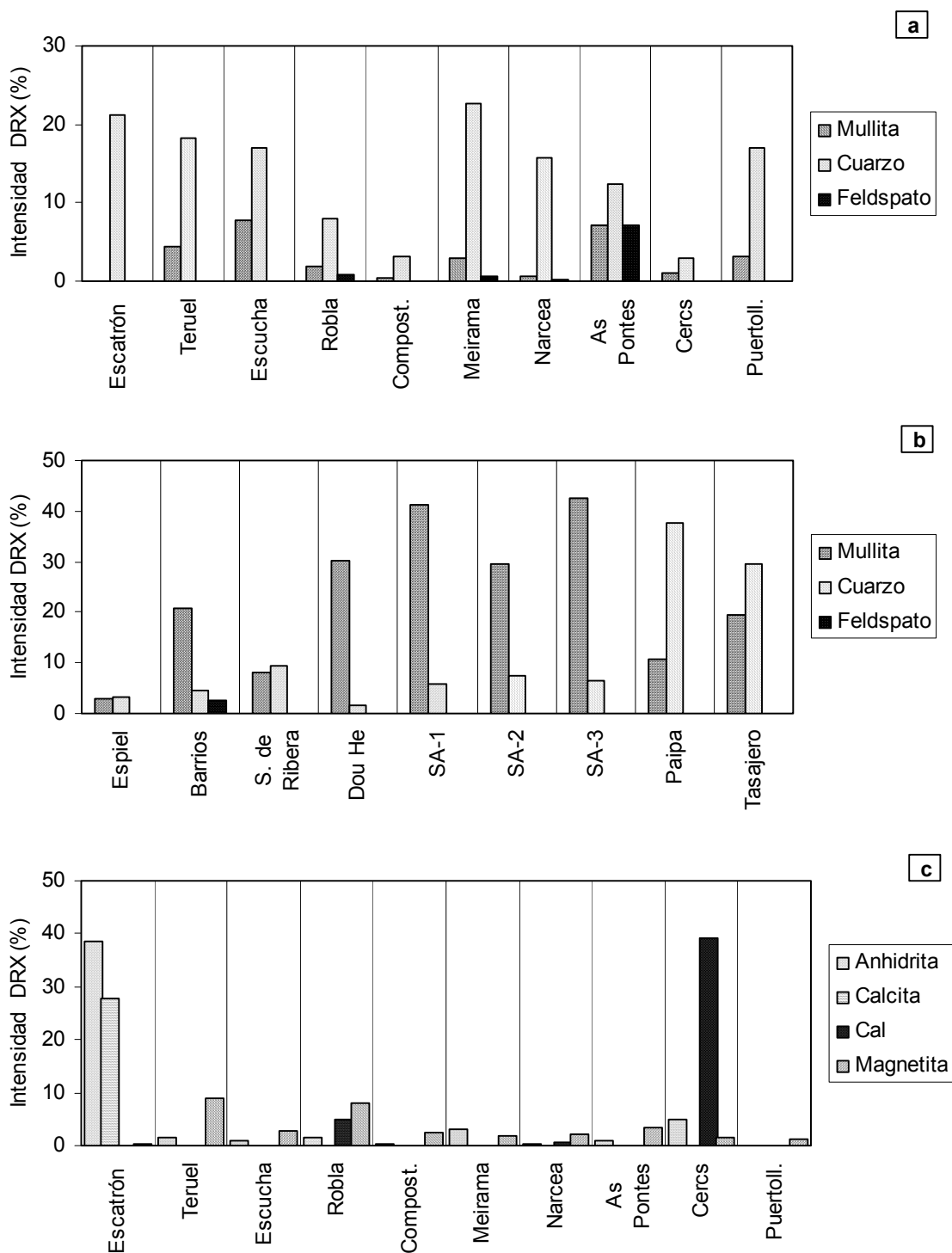


Figura 4.9. a, b, c, d, e y f. Composición mineralógica y contenido en vidrio de las cenizas volantes.

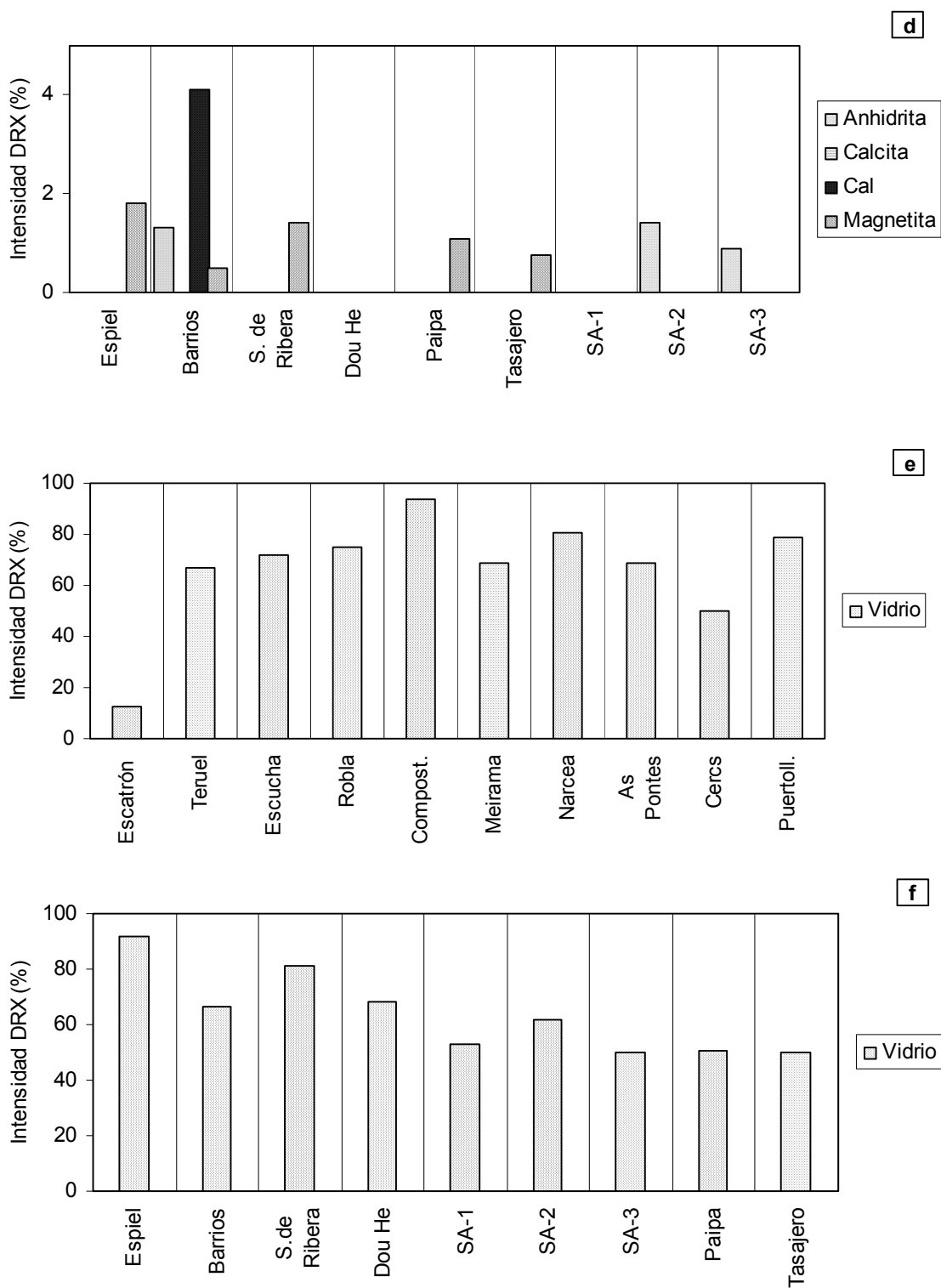


Figura 4.9. Continuación.

4.1.4. CONCLUSIONES

Caracterización física

El contenido de carbón inquemado no afecta de modo significativo a la eficiencia de la síntesis de zeolitas, pero sí debe considerarse como una impureza poco reactiva. Las cenizas volantes colombianas y Escatrón presentan los valores más altos de inquemados entre el 12 y 16%. Las sudafricanas valores cercanos al 1%, y las restantes cenizas volantes presentan entre 1.1 y 6.5%.

El rango de valores de densidad real y aparente ($2.2 - 2.8 \text{ g cm}^{-3}$ y $0.6 - 1.0 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente) es bastante estrecho y tiene poca influencia en la aplicabilidad de una ceniza en la síntesis de zeolitas.

El valor de la superficie específica BET tiene un valor promedio de $3.6 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, este valor es afectado principalmente por la porosidad de la muestra y la morfología de las partículas. Meirama destaca con un valor de $12.4 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$.

La distribución del tamaño de grano de la mayor parte de las partículas en las cenizas volantes presenta una media granulométrica entre 1 y 100 μm , exceptuando la ceniza volante de As Pontes debido a que está formada por una mezcla de ceniza volante y escoria, y a Soto de Ribera con presencia de cenoesferas gruesas. La única ceniza con una morfología específica es la ceniza de Meirama. Ésta presenta una morfología irregular con partículas aluminosilicatadas muy porosas, probablemente origen de los altos valores de superficie específica BET obtenidos.

Análisis morfológico

Este tipo de análisis es básico para la interpretación de algunos de los resultados de caracterización física como la porosidad y la superficie específica. Las cenizas volantes están compuestas principalmente por microesferas; unas sólidas, otras huecas y otras rellenas de esferas más pequeñas compuestas principalmente por aluminosilicatos amorfos aunque en algunas de ellas se puede ver la cristalización de mullita y cuarzo. Algunas esferas están constituidas en su totalidad por óxidos de hierro. Además, se observan partículas irregulares de vidrio o cuarzo, calcita, anhidrita y partículas esponjiformes de inquemados.

Caracterización química y mineralógica

De acuerdo con lo expresado anteriormente respecto al contenido de elementos mayoritarios y traza en las cenizas volantes, Compostilla, Dou He y las de Sudáfrica tienen un potencial alto de aplicación en la síntesis de zeolitas debido a su bajo contenido de impurezas y también al bajo contenido de metales peligrosos solubles.

Las cenizas volantes de Espiel, Escucha, Los Barrios As Pontes, Soto de Ribera, Meirama, Narcea y Teruel presentan un importante potencial de aplicación, pero ligeramente limitado por el contenido intermedio de impurezas no reactivas como el hierro y el calcio.

Las cenizas volantes de Cercs y Escatrón tienen poco potencial de aplicación debido a los bajos contenidos de aluminio y silicio y al alto contenido de elementos solubles (S, Mo, Sr y Ba) y peligrosos (Hg, Mo, Se y U).

Las cenizas volantes colombianas a pesar de que tienen alto contenido en silicio, tienen un nivel de aplicación bajo debido al alto contenido en carbono y también se ha de resaltar el alto contenido en cadmio en Tasajero.

La ceniza volante de La Robla es de interés intermedio debido al relativamente alto contenido de óxidos de calcio y hierro que reducen su potencial de aplicación.

Puertollano también presenta un limitado potencial de aplicación debido a la presencia de algunos metales pesados como As, Cd, Ge, Hg, Pb y Zn ($>1000 \text{ mg kg}^{-1}$).

Los altos contenidos de Ba y Sr en la ceniza volante de Los Barrios limitan también el potencial de utilización de este residuo.

Las principales fases presentes en las cenizas volantes son vidrio, mullita, cuarzo, magnetita, anortita-albita, anhidrita, hematita y cal.

Las cenizas de Compostilla, Soto de Ribera, Espiel y Narcea tienen un elevado potencial de aplicación para la síntesis de zeolitas dado el alto contenido en vidrio. Esta fase es mucho más soluble que el resto de los aluminosilicatos, y por tanto, a altos contenidos de vidrio se esperan altos rendimientos de síntesis.