

## ÍNDICE

	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>1.1. Cenizas volantes de la combustión del carbón</b>	1
<b>1.2. Producción de cenizas volantes y reciclaje</b>	3
<b>1.3. Aplicaciones de las cenizas volantes</b>	5
1.3.1. Nuevos productos y aplicaciones	7
1.3.2. Síntesis de zeolitas	8
1.3.3. Aplicaciones de las zeolitas obtenidas de cenizas volantes	10
<b>2. OBJETIVOS</b>	13
<b>3. METODOLOGÍA</b>	15
<b>3.1. SELECCIÓN Y TOMA DE MUESTRAS</b>	15
<b>3.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y MINERALÓGICA</b>	16
3.2.1. Humedad y pérdidas a la incineración	17
3.2.2. Densidad real y aparente	17
3.2.3. Porosidad	17
3.2.4. Superficie específica BET	17
3.2.5. Distribución del tamaño de grano	17
3.2.6. Análisis morfológico	18
3.2.7. Caracterización química	18
3.2.8. Caracterización mineralógica	19
<b>3.3. TRATAMIENTOS PREVIOS A LA SÍNTESIS</b>	19
3.3.1. Ensayos de lixiviación	20
3.3.1.1. Sistema de lixiviación cerrada a temperatura ambiente	20
3.3.1.2. Sistema de lixiviación abierta	20

3.3.1.3. Sistema de lixiviación cerrada con calentamiento (95 °C)	21
3.3.2. Extracción magnética de óxidos de hierro	22
<b>3.4. SÍNTESIS DE ZEOLITAS</b>	<b>22</b>
3.4.1. Síntesis a escala de laboratorio	23
3.4.1.1. Síntesis convencional a escala de gramos	23
3.4.1.2. Síntesis convencional a escala de kilogramos	24
3.4.1.3. Síntesis con microondas	25
3.4.2. Síntesis a escala de planta piloto	26
<b>3.5. APLICACIONES DE LAS ZEOLITAS SINTETIZADAS</b>	<b>27</b>
3.5.1. Aplicaciones como intercambiadores iónicos	28
3.5.1.1. Absorción de amonio y metales pesados en soluciones preparadas	28
3.5.1.1.1. Muestras de zeolitas obtenidas a escala de laboratorio	28
3.5.1.1.2. Muestras de zeolitas obtenidas a escala de planta piloto	29
3.5.1.2. Experimentos de absorción de amonio y de metales pesados en soluciones reales	31
3.5.1.2.1. Absorción de amonio en aguas residuales industriales	31
3.5.1.2.2. Retención de metales pesados en suelos y aguas contaminadas	32
3.5.1.2.3. Retención de metales pesados en lixiviados de pilas mediante la utilización de NaP1	33
3.5.2. Adsorción de gases	33
3.5.2.1. Caracterización de la textura porosa mediante la adsorción de N <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub>	34
3.5.2.2. Adsorción de SO <sub>2</sub> y NH <sub>3</sub>	35
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>37</b>

<b>4.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS VOLANTES</b>	<b>37</b>
<b>4.1.1. Caracterización física</b>	<b>37</b>
4.1.1.1. Humedad y pérdidas a la incineración	37
4.1.1.2. Densidad real y aparente	38
4.1.1.3. Porosidad	39
4.1.1.4. Superficie específica BET	40
4.1.1.5. Distribución del tamaño de grano	41
4.1.1.6. Análisis morfológico	44
<b>4.1.2. Caracterización química</b>	<b>48</b>
4.1.2.1. Elementos mayoritarios	48
4.1.2.2. Elementos traza	52
<b>4.1.3. Caracterización mineralógica</b>	<b>56</b>
<b>4.1.4. Conclusiones</b>	<b>60</b>
<b>4.2. TRATAMIENTOS PREVIOS A LA SÍNTESIS</b>	<b>62</b>
<b>4.2.1. Sistemas de lixiviación</b>	<b>63</b>
4.2.1.1. Sistema de lixiviación cerrado a temperatura ambiente	63
4.2.1.2. Sistema de lixiviación abierto	81
4.2.1.2.1. pH y conductividad	81
4.2.1.2.2. Evolución de la concentración de los elementos en los lixiviados	83
4.2.1.2.3. Comportamiento de los elementos durante la lixiviación de las cenizas volantes	94
4.2.1.3. Comparación entre los sistemas de lixiviación abierto y cerrado	99
4.2.1.4. Sistema de lixiviación cerrada a 95 °C	104
<b>4.2.2. Extracción magnética de óxidos de hierro</b>	<b>106</b>
<b>4.2.3 Conclusiones</b>	<b>108</b>

<b>4.3. SÍNTESIS DE ZEOLITAS</b>	109
<b>4.3.1. Síntesis a escala de laboratorio</b>	109
4.3.1.1. Síntesis convencional a escala de gramos	109
4.3.1.1.1. Soluciones activantes	110
4.3.1.1.1.1. NaOH/KOH	110
4.3.1.1.1.2. Relación solución activante/ceniza volante	112
4.3.1.1.1.3. Concentración de la solución activante	113
4.3.1.1.2. Temperatura	114
4.3.1.1.3. Influencia de la composición química y mineralógica de las cenizas volantes	115
4.3.1.1.4. Tiempo de activación	118
4.3.1.1.5. Zeolitas sintetizadas	119
4.3.1.1.6. Comportamiento de las cenizas volantes durante la síntesis a escala de laboratorio	124
4.3.1.2. Síntesis convencional a escala de kilogramos	172
4.3.1.3. Síntesis con microondas	173
<b>4.3.2. Síntesis a escala de planta piloto</b>	179
<b>4.3.3. Conclusiones</b>	186
<b>4.4. APLICACIONES DE LAS ZEOLITAS SINTETIZADAS</b>	191
<b>4.4.1. Aplicaciones como intercambiadores iónicos</b>	192
4.4.1.1. Retención/intercambio de amonio y metales pesados en soluciones preparadas	192
4.4.1.1.1. Intercambio iónico de los productos zeolíticos obtenidos a escala de laboratorio	192
4.4.1.1.2. Intercambio catiónico de los productos zeolíticos obtenidos a escala de planta piloto	196

4.4.1.1.2.1. Metales pesados	196
4.4.1.1.2.2. Absorción de amonio	201
4.4.1.2. Absorción de amonio y metales pesados en soluciones reales	202
4.4.1.2.1. Absorción de amonio en aguas residuales industriales	202
4.4.1.2.2. Retención e inmovilización de metales pesados en muestras del vertido de lodos piríticos de Aznalcóllar	205
4.4.1.2.2.1. Pruebas de inmovilización de metales en muestras de lodos	206
4.4.1.2.2.2. Pruebas de intercambio iónico en muestras de aguas	207
4.4.1.2.3. Retención de metales pesados en lixiviados de pilas mediante la utilización de NaP1	210
<b>4.4.2. Adsorción de gases</b>	<b>212</b>
4.4.2.1. Determinación del volumen microporoso	213
4.4.2.2. Determinación de la adsorción de SO <sub>2</sub> y NH <sub>3</sub>	215
<b>4.4.3. Conclusiones</b>	<b>218</b>
<b>5. CONCLUSIONES GENERALES</b>	<b>223</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>241</b>
<b>ANEXO, Artículos publicados</b>	