

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

ABSTRACT/RESUMEN/RESUM

OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS	1
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. RESIDUOS DE COMBUSTIÓN DEL CARBÓN	8
1.1.1. Cenizas volantes	10
1.1.2. Producción	15
1.1.3. Utilización	16
1.1.4. Legislación	18
1.2. LAS ZEOLITAS	19
1.2.1. Estructura	20
1.2.2. Propiedades y aplicaciones	20
1.2.3. Formación y síntesis	22
1.2.4. Síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes	24
1.3. SOLUBILIDAD DE SÍLICE Y ALÚMINA	26
2. CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS VOLANTES	33
2.1. METODOLOGÍA	34
2.1.1. Cenizas volantes seleccionadas	34
2.1.2. Caracterización química	35
2.1.3. Caracterización mineralógica	39
2.1.4. Caracterización física	39
2.1.5. Composición de la matriz vítrea	40
2.1.6. Ensayos de lixiviación	41

2.2. RESULTADOS	41
2.2.1. Caracterización química	41
2.2.2. Ensayos de lixiviación	47
2.2.3. Caracterización mineralógica	52
2.2.4. Caracterización física	55
2.2.5. Composición de la matriz vítrea	62
2.2.6. Evolución térmica de la matriz vítrea	64
2.3. CONCLUSIONES	68
3. EXTRACCIÓN DE SÍLICE	73
3.1. METODOLOGÍA	74
3.1.1. Extracción de sílice	74
3.1.2. Análisis	78
3.2. RESULTADOS	79
3.2.1. Experimentos preliminares de extracción de sílice	80
3.2.1.1. Condiciones de extracción iniciales	80
3.2.1.2. Extracción de SiO ₂ con condiciones óptimas para la conversión directa	86
3.2.2. Optimización de los parámetros de extracción	89
3.2.2.1. Tiempo de extracción	89
3.2.2.2. Temperatura	95
3.2.2.3. Relación extractante / ceniza volante	97
3.2.2.4. NaOH ó KOH	99
3.2.2.5. Concentración de extractante alcalino	101
3.2.2.6. Influencia de los tratamientos térmicos	104
3.2.2.7. Condiciones óptimas de extracción en función del tipo de ceniza volante	107
3.2.2.8. Extracción de sílice mediante microondas	119
3.2.3. Lixiviación de elementos traza durante procesos de extracción de sílice	132
3.3. CONCLUSIONES	134
4. SÍNTESIS DE ZEOLITAS CON EXTRACTOS DE SÍLICE	141

4.1. METODOLOGÍA	142
4.1.1. Síntesis de materiales zeolíticos de elevada pureza	142
4.1.2. Evaluación de la calidad	145
4.2. RESULTADOS	146
4.2.1. Síntesis de materiales zeolíticos de elevada pureza	146
4.2.2. Evaluación de la calidad	151
4.3. CONCLUSIONES	153
5. SÍNTESIS DE ZEOLITAS POR CONVERSIÓN DIRECTA	157
5.1. METODOLOGÍA	158
5.1.1. Síntesis de zeolitas	158
5.1.1.1. Conversión directa convencional a escala de laboratorio	158
5.1.1.2. Conversión directa mediante microondas	159
5.1.1.3. Conversión directa convencional a escala de planta piloto	160
5.1.2. Evaluación de la calidad	160
5.1.3. Pelletización del producto zeolítico	160
5.1.4. Análisis	161
5.2. RESULTADOS	161
5.2.1. Síntesis de zeolitas	162
5.2.1.1. Conversión directa convencional a escala de laboratorio	162
5.2.1.2. Conversión directa mediante microondas	167
5.2.1.3. Conversión directa convencional a escala de planta piloto	172
5.2.2. Evaluación de la calidad de los productos zeolíticos	176
5.2.3. Pelletización del producto zeolítico	177
5.3. CONCLUSIONES	178
6. APLICACIONES AMBIENTALES	183
6.1. INMOVILIZACIÓN DE METALES	184
6.1.1. Metodología	186
6.1.1.1. Material zeolítico y dosificación	186
6.1.1.2. Muestreo	188
6.1.1.3. Tratamiento de las muestras	188

6.1.2. Resultados	189
6.2. RETENCIÓN DE METALES EN AGUAS	194
6.2.1. Metodología	195
6.2.1.1. Materiales	195
6.2.1.2. Tratamiento de aguas	196
6.2.1.3. Ensayos de lixiviación de los productos zeolíticos	198
6.2.2. Resultados	198
6.3. RETENCIÓN DE CONTAMINANTES GASEOSOS	211
6.3.1. Metodología	213
6.3.1.1. Materiales	213
6.3.1.2. Experimental	214
6.3.2. Resultados	216
6.4. CONCLUSIONES	224
6.4.1. Inmovilización de metales	224
6.4.2. Retención de metales en aguas	224
6.4.3. Retención de contaminantes gaseosos	225
7. CONCLUSIONES GENERALES	229
8. BIBLIOGRAFÍA	239
9. ANEXO	251