

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>9</b>
3.1	PROBLEMÁTICA DE LOS DRENAJES ÁCIDOS DE MINAS .....	9
3.2	GENERACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS .....	10
3.3	TRATAMIENTOS PASIVOS DE DRENAJES ÁCIDOS .....	12
3.3.1	Humedales .....	15
3.3.1.1	Humedales aerobios .....	15
3.3.1.2	Humedales anaerobios o balsas orgánicas .....	16
3.3.1.3	Rendimiento de un humedal .....	20
3.3.2	Drenaje anoxico calizo (ALD) .....	23
3.3.3	Sistemas de reducción y producción de alcalinidad (RAPS) .....	26
3.3.4	Barreras reactivas permeables (PRB).....	27
3.4	SELECCIÓN DEL TIPO DE TRATAMIENTO EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA.....	28
3.5	CONCEPTOS PREVIOS AL ANÁLISIS EN COLUMNA PARA LA SIMULACIÓN DE UN HUMEDAL ANAEROBIO O Balsa ORGÁNICA.....	29
3.5.1	Porosidad y conductividad hidráulica en las columnas. Factores que las modifican. 30	
3.5.2	Posibles irregularidades en las columnas .....	33
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>METODOLOGÍA DE TRABAJO.....</b>	<b>37</b>
4.1	DISEÑO DEL SISTEMA EN COLUMNA A ESCALA DE LABORATORIO PARA LA EVALUACIÓN DE MATERIALES BARRERA .....	37
4.1.1	Necesidades que justifican el diseño .....	37
4.1.2	Preparación y montaje del sistema experimental. Factores a considerar .....	38
4.1.3	Descripción de los componentes del equipo experimental .....	40
4.1.3.1	Depósito de acumulación general del agua a tratar .....	40
4.1.3.2	Depósito de acumulación parcial del agua a tratar .....	41
4.1.3.3	Sistema de bombeo del agua a tratar.....	42
4.1.3.4	El sistema está formado por una bomba peristáltica ISMATEC, Modelo REGLO Digital 4 canales. Las especificaciones técnicas de la misma se muestran, a continuación:.....	42
4.1.3.5	Columna.....	43
4.1.3.6	Sistema de válvulas a la salida de la columna .....	45
4.1.3.7	Sistema de análisis químico en continuo (pH, Eh y Alcalinidad).....	47
4.1.3.8	Toma de muestras para análisis de metales y sulfuros .....	52
4.1.3.9	Sistema de análisis hidráulico. DPT .....	54
4.1.4	Disposición del sistema experimental .....	57

4.2	MATERIAL DE LA COLUMNA.....	57
4.3	COMPOSICIÓN DEL MATERIAL REACTIVO EMPLEADO EN LOS ENSAYOS EN COLUMNA	57
4.3.1	Características del material granular.....	59
4.3.2	Preparación de la mezcla y la columna.....	60
4.3.3	Composición del agua a tratar.....	64
4.4	METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE TRAZADORES.....	65
4.4.1	Selección del trazador y Método de Análisis.....	66
4.4.2	Elección de la masa e inyección del trazador.....	70
4.4.3	Inyección continua.....	70
4.4.4	T tiempo e intervalos de muestreo del efluente.....	71
4.4.5	Análisis de la serie de datos temporales.....	72
4.4.6	Interpretación de los parámetros que intervienen en el ensayo de trazadores.....	73
4.4.6.1	Porcentaje de Recuperación del Trazador.....	73
4.4.6.2	Tiempo de Residencia Nominal, $\tau_n$ .....	73
4.4.6.3	Tiempo de Residencia Medio, $\tau$ .....	74
4.4.6.4	Volumen efectivo, $V_{ef}$ .....	74

## **CAPÍTULO 5 EVALUACIÓN CRÍTICA DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL Y DEL MATERIAL REACTIVO EN EL REMEDIO DE AGUAS ÁCIDAS 75**

5.1	EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS DE LAS COLUMNAS.....	76
5.1.1	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EN LOS ENSAYOS DE TRAZADOR.....	76
5.1.1.1	Resultados del ensayo de trazadores inicial mediante inyección continua ...	77
5.1.1.2	Resultados del ensayo de trazadores final mediante inyección continua.....	81
5.1.2	Conductividad hidráulica mediante el DPT.....	84
5.1.3	Factores que afectan las variaciones de la permeabilidad.....	88
5.2	EVOLUCIÓN DEL PH.....	88
5.3	EVOLUCIÓN DEL EH.....	93
5.4	EVOLUCIÓN DE LA ALCALINIDAD.....	96
5.5	EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	99
5.5.1	Contenido de metales y no metales.....	99
5.5.1.1	Concentración de Fe.....	99
5.5.1.2	Concentración de Zn.....	102
5.5.1.3	Concentración de Ca.....	104
5.5.1.4	Contenido de sulfatos.....	104
5.5.1.5	Concentración de S.....	106
5.5.1.6	Metales y no metales traza.....	107

## **CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 109**

## **CAPÍTULO 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 113**

## **CAPÍTULO 8 ANEXO..... 119**

## ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN .....	5
CAPÍTULO 2	OBJETIVOS .....	7
CAPÍTULO 3	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	9
TABLA 3.1	VALORES TÍPICOS DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA PARA DIVERSOS SUELOS (ADAPTAT DE KADLEC I KNIGHT, 1996) .....	31
CAPÍTULO 4	METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	37
TABLA 4.1	DETALLES SOBRE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS Y LOS PARÁMETROS DE CALIDAD. ....	52
TABLA 4.2	COMPOSICIÓN DEL MATERIAL REACTIVO DE LA COLUMNA. ....	58
TABLA 4.3	CONCENTRACIONES MEDIAS QUÍMICAS HABITUALES EN UN ABONO SEGÚN PROCEDENCIA. (CHANG ET AL., FONSTAD & MAULE ET AL. 1998) .....	59
TABLA 4.4	PORCENTAJE DE CALIZA Y ABONO EMPLEADO EN LAS TRES COLUMNAS .....	61
TABLA 4.5	COMPOSICIÓN DEL AGUA UTILIZADA EN EL EXPERIMENTO. ....	65
CAPÍTULO 5	EVALUACIÓN CRÍTICA DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL Y DEL MATERIAL REACTIVO EN EL REMEDIO DE AGUAS ÁCIDAS .....	75
TABLA 5.1	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS INICIALES DE LAS COLUMNAS .....	76
TABLA 5.2	VOLÚMENES MUERTOS A CONSIDERAR EN LAS COLUMNAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD. ....	79
TABLA 5.3	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS INICIALES DE LAS COLUMNAS .....	80
TABLA 5.4	RECUPERACIÓN DEL IÓN BROMURO, TIEMPO DE RESIDENCIA MEDIO Y TEÓRICO EN LAS COLUMNAS 1, 2 Y 3, Y TIEMPO DE INICIO DE CADA CURVA DE CONCENTRACIÓN DE IÓN BROMURO .....	80
TABLA 5.5	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS FINALES DE LAS COLUMNAS. ....	83
TABLA 5.6	RECUPERACIÓN DEL IÓN BROMURO, TIEMPO DE PERMANENCIA MEDIO Y TEÓRICO EN LAS COLUMNAS 1, 2 Y 3 Y TIEMPO DE INICIO DE CADA CURVA DE CONCENTRACIÓN DE IÓN BROMURO .....	83
TABLA 5.7	RANGOS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA PARA DIFERENTES MATERIALES .....	87
TABLA 5.8	CONCENTRACIONES DE $Fe^{+3}$ Y $Fe^{+2}$ A LA ENTRADA Y SALIDA DE LAS TRES COLUMNAS. ....	100
TABLA 5.9	CONCENTRACIÓN DE SULFURO A LA SALIDA DE LAS TRES COLUMNAS .....	105
CAPÍTULO 6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	109
CAPÍTULO 7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	113
CAPÍTULO 8	ANEXO .....	119

## ÍNDICE DEL ANEJO

TABLA A.1 RANGO DE CAUDALES SEGÚN DIÁMETRO DE TUBO .....	119
TABLA A.2 PH A LA SALIDA SUPERIOR DE LA COLUMNA 1 (COL1-S).....	120
TABLA A.3 PH A LA SALIDA SUPERIOR DE LA COLUMNA 2 (COL2-S).....	121
TABLA A.4 PH A LA SALIDA SUPERIOR DE LA COLUMNA 3 (COL3-S).....	121
TABLA A.5 PH EN EL PUNTO 1 DE LA COLUMNA 1 (COL1-II).....	122
TABLA A.6 PH EN EL PUNTO 1 DE LA COLUMNA 2 (COL2-II).....	122
TABLA A.7 PH EN EL PUNTO 1 DE LA COLUMNA 3 (COL3-II).....	122
TABLA A.8 EH A LA SALIDA SUPERIOR DE LA COLUMNA 1 (COL1-S).....	123
TABLA A.9 EH A LA SALIDA SUPERIOR DE LA COLUMNA 2 (COL2-S).....	123
TABLA A.10 EH A LA SALIDA SUPERIOR DE LA COLUMNA 3 (COL3-S).....	124
TABLA A.11 EH EN EL PUNTO 1 DE LA COLUMNA 1 (COL1-II).....	125
TABLA A.12 EH EN EL PUNTO 1 DE LA COLUMNA 2 (COL2-II).....	125
TABLA A.13 EH EN EL PUNTO 1 DE LA COLUMNA 3 (COL3-II).....	125
TABLA A.14 EVOLUCIÓN DE LA ALCALINIDAD EN EL TIEMPO A LA SALIDA DE LA COLUMNA 1.....	126
TABLA A.15 EVOLUCIÓN DE LA ALCALINIDAD EN EL TIEMPO EN UN PUNTO INTERMEDIO DE LA COLUMNA 1. .....	126
TABLA A.16 EVOLUCIÓN DE LA ALCALINIDAD EN EL TIEMPO A LA SALIDA DE LA COLUMNA 2.....	127
TABLA A.17 EVOLUCIÓN DE LA ALCALINIDAD EN EL TIEMPO EN UN PUNTO INTERMEDIO DE LA COLUMNA 2. .....	127
TABLA A.18 EVOLUCIÓN DE LA ALCALINIDAD EN EL TIEMPO A LA SALIDA DE LA COLUMNA 3.....	127
TABLA A.19 EVOLUCIÓN DE LA ALCALINIDAD EN EL TIEMPO EN UN PUNTO INTERMEDIO DE LA COLUMNA 3. .....	128
TABLA A.20 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LOS METALES EN LAS COLUMNAS 1,2,3 .....	128
TABLA A.21 CONCENTRACIÓN DE HIERRO A LA SALIDA DE LAS TRES COLUMNAS.....	129
TABLA A.22 CONCENTRACIÓN DE ALUMINIO A LA SALIDA DE LAS TRES COLUMNAS.....	129
TABLA A.23 CONCENTRACIÓN DE ZINC A LA SALIDA DE LAS TRES COLUMNAS.....	129
TABLA A.24 CONCENTRACIÓN DE CALCIO A LA SALIDA DE LAS TRES COLUMNAS.....	130
TABLA A.25 CONCENTRACIÓN DE AZUFRE A LA SALIDA DE LAS TRES COLUMNAS.....	130
TABLA A.26 ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON EL TIEMPO EN LA COLUMNA 1.....	130
TABLA A.27 ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON EL TIEMPO EN LA COLUMNA 2.....	131
TABLA A.28 ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON EL TIEMPO EN LA COLUMNA 3.....	131
TABLA A.29 PROCEDIMIENTO DESCRIPTIVO DE LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD .....	133
FIGURA A.1.....	120

## ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN .....	5
CAPÍTULO 2	OBJETIVOS .....	7
FIGURA 2.1	SISTEMA EN COLUMNA .....	7
CAPÍTULO 3	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	9
FIGURA 3.1	HUMEDAL ANAEROBIO DE FLUJO HORIZONTAL (A) Y VERTICAL (B) (BRIX, 1993 Y USEPA, 2000) .....	18
FIGURA 3.2	TRATAMIENTO COMBINADO COMPUESTO POR SISTEMA ALD Y HUMEDAL (BRODIE ET AL. 1993) .....	23
FIGURA 3.3	ESQUEMA DE LA DISPOSICIÓN DE LOS SUBSTRATOS Y DIRECCIÓN DEL FLUJO DE AGUA EN UN RAPS (USEPA, 2000) .....	26
FIGURA 3.4	DIAGRAMA DE FLUJO PARA SELECCIONAR EL SISTEMA O LA COMBINACIÓN DE SISTEMAS PARA EL TRATAMIENTO PASIVO DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA (MODIFICADA DE SKOUSEN ET AL., 1994, 1998; WATZLAF E HYMAN, 1995 Y HEDIN, 1997). .....	29
FIGURA 3.5	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS (KADLEC I KNIGHT, 1996). .....	31
FIGURA 3.6	DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES (KADLEC I KNIGHT, 1996) .....	32
FIGURA 3.7	EVOLUCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE TRAZADOR REGISTRADAS EN DETERMINADOS PUNTOS DEL ANCHO DE LA Balsa, REALIZADA UNA INYECCIÓN UNIFORME DE TRAZADOR (KADLEC I KNIGHT, 1996) .....	34
CAPÍTULO 4	METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	37
FIGURA 4.1	DISPOSICIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL PROPUESTO .....	38
FIGURA 4.2	DEPÓSITO DE ACUMULACIÓN PARCIAL DEL AGUA A TRATAR .....	41
FIGURA 4.3	BOMBA PERISTÁLTICA ISMATEC, MODELO REGLO DIGITAL 4 CANALES. ....	42
FIGURA 4.4	COLUMNA DE METACRILATO RELLENA CON CALIZA Y MATERIAL REACTIVO EN LA QUE SE APRECIAN LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN. ....	44
FIGURA 4.5	COLUMNA AISLADA DE LA LUZ MEDIANTE PAPEL DE ALUMINIO EN LA QUE SE REFLEJAN LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN LATERAL. ....	45
FIGURA 4.6	VÁLVULA SUPERIOR LATERAL DE LAS COLUMNAS .....	46
FIGURA 4.7	SISTEMA DE VÁLVULAS DE 8 DIRECCIONES .....	46
FIGURA 4.8	ANÁLISIS DE EH Y TOMA DE MUESTRA. ....	47
FIGURA 4.9	VISTA GENERAL DEL ANÁLISIS EN CONTINUO DEL EH CON EL ELECTRODO CORRESPONDIENTE. ....	49
FIGURA 4.10	VISTA GENERAL DEL ANÁLISIS EN CONTINUO DEL pH CON EL ELECTRODO CORRESPONDIENTE. ....	50
FIGURA 4.11	SISTEMA DE ANÁLISIS HIDRÁULICO MEDIANTE EL SENSOR DPT Y UN VOTÍMETRO. ....	54
FIGURA 4.12	RECTA DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR DIFERENCIAL DPT .....	56
FIGURA 4.13	DISPOSICIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL .....	57
FIGURA 4.14	FILTRO INFERIOR DE LA COLUMNA. ....	62
FIGURA 4.15	FILTRO SUPERIOR DE LA COLUMNA. ....	63
FIGURA 4.16	RECTA DE CALIBRACIÓN DEL BROMURO AL INICIO DEL ENSAYO DE TRAZADORES. ....	68
FIGURA 4.17	RECTA DE CALIBRACIÓN DEL BROMURO AL FINAL DEL ENSAYO DE TRAZADORES .....	69
FIGURA 4.18	INYECCIÓN CONTINUA DEL IÓN Br <sup>-</sup> DURANTE EL ENSAYO DE TRAZADORES. ....	70
CAPÍTULO 5	EVALUACIÓN CRÍTICA DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL Y DEL MATERIAL REACTIVO EN EL REMEDIO DE AGUAS ÁCIDAS .....	75
FIGURA 5.1	RESPUESTA DE LA COLUMNA 1 FRENTE A LA INYECCIÓN CONTINUA DE TRAZADOR IÓN BROMURO. ESTADO INICIAL .....	77
FIGURA 5.2	RESPUESTA DE LA COLUMNA 2 FRENTE A LA INYECCIÓN CONTINUA DE TRAZADOR IÓN BROMURO. ESTADO INICIAL .....	78

FIGURA 5.3 RESPUESTA DE LA COLUMNA 3 FRENTE A LA INYECCIÓN CONTINUA DE TRAZADOR IÓN BROMURO. ESTADO INICIAL.....	78
FIGURA 5.4 RESPUESTA DE LA COLUMNA 1 FRENTE A LA INYECCIÓN CONTINUA DE TRAZADOR IÓN BROMURO. ESTADO FINAL .....	81
FIGURA 5.5 RESPUESTA DE LA COLUMNA 2 FRENTE A LA INYECCIÓN CONTINUA DE TRAZADOR IÓN BROMURO. ESTADO FINAL .....	82
FIGURA 5.6 RESPUESTA DE LA COLUMNA 3 FRENTE A LA INYECCIÓN CONTINUA DE TRAZADOR IÓN BROMURO. ESTADO FINAL .....	82
FIGURA 5.7 EVOLUCIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE LA COLUMNA 1 EN EL TIEMPO.....	85
FIGURA 5.8 EVOLUCIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE LA COLUMNA 2 EN EL TIEMPO.....	85
FIGURA 5.9 EVOLUCIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE LA COLUMNA 3 EN EL TIEMPO.....	86
FIGURA 5.10 EVOLUCIÓN DEL PARÁMETRO pH EN UN PUNTO INTERMEDIO (COL1-I1) Y A LA SALIDA (COL1-S) DE LA COLUMNA 1. ....	88
FIGURA 5.11 EVOLUCIÓN DEL PARÁMETRO pH EN UN PUNTO INTERMEDIO (COL2-I1) Y A LA SALIDA (COL2-S) DE LA COLUMNA 2. ....	89
FIGURA 5.12 EVOLUCIÓN DEL PARÁMETRO pH EN UN PUNTO INTERMEDIO (COL3-I1) Y A LA SALIDA (COL3-S) DE LA COLUMNA 3. ....	89
FIGURA 5.13 PRECIPITADO BLANCO EN EL CENTRO DE LA COLUMNA 1 .....	91
FIGURA 5.14 LÍNEAS VERTICALES BLANCAS DE PRECIPITADO BLANCO EN LA COLUMNA 2 .....	91
FIGURA 5.15 PRECIPITADO BLANCO EN LOS PRIMEROS CENTÍMETROS DE LA COLUMNA 3.....	92
FIGURA 5.16 PRECIPITADO DE COLOR OCRE EN LOS PRIMEROS CENTÍMETROS DE LA COLUMNA. ....	92
FIGURA 5.17 EVOLUCIÓN DEL POTENCIAL CON EL TIEMPO EN LA COLUMNA 1.....	93
FIGURA 5.18 EVOLUCIÓN DEL POTENCIAL CON EL TIEMPO EN LA COLUMNA 2.....	94
FIGURA 5.19 EVOLUCIÓN DEL POTENCIAL CON EL TIEMPO EN LA COLUMNA 3.....	94
FIGURA 5.20 DIAGRAMA DE ÁREAS DE PREDOMINANCIA DEL AZUFRE.....	95
FIGURA 5.21 DIAGRAMA DE ÁREAS DE PREDOMINANCIA DEL HIERRO. ....	96
FIGURA 5.22 EVOLUCIÓN DE LA ALCALINIDAD A LA SALIDA Y EN UN PUNTO INTERMEDIO DE LA COLUMNA 1.....	97
FIGURA 5.23 EVOLUCIÓN DE LA ALCALINIDAD A LA SALIDA Y EN UN PUNTO INTERMEDIO DE LA COLUMNA 2.....	98
FIGURA 5.24 EVOLUCIÓN DE LA ALCALINIDAD A LA SALIDA Y EN UN PUNTO INTERMEDIO DE LA COLUMNA 3.....	99
FIGURA 5.25 EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL Fe EN LAS TRES COLUMNAS CON EL TIEMPO SIENDO $[Fe]_{INICIAL} = 141,7$ PPM.....	100
FIGURA 5.26 DIAGRAMA DE BARRAS QUE REFLEJA LA TABLA REPRESENTADA ANTERIORMENTE.....	101
FIGURA 5.27 EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL Al EN LAS TRES COLUMNAS CON EL TIEMPO SIENDO LA $[Al]_{INICIAL} = 127,1$ PPM .....	102
FIGURA 5.28 EVOLUCIÓN DE $[Zn]$ EN LAS TRES COLUMNAS CON EL TIEMPO SIENDO $[Zn]_{INICIAL} = 387,1$ PPM.....	103
FIGURA 5.29 EVOLUCIÓN DE $[Ca]$ EN LAS TRES COLUMNAS CON EL TIEMPO SIENDO LA $[Ca]_{INICIAL} = 248,60$ PPM.....	104
FIGURA 5.30 EVOLUCIÓN DEL S EN LAS 3 COLUMNAS SABRIENDO QUE $[S]_{INICIAL} = 1205$ PPM.....	106
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	109
CAPÍTULO 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
CAPÍTULO 8 ANEXO .....	119