



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

**MANUAL DE RESTAURACION DE TERRENOS Y EVALUACION
DE IMPACTOS AMBIENTALES EN MINERIA**

SERIE: Ingeniería GeoAmbiental



MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA

01050

MANUAL DE RESTAURACION DE TERRENOS Y EVALUACION DE IMPACTOS AMBIENTALES EN MINERIA



Instituto Tecnológico GeoMinero de España

Este manual ha sido realizado por el siguiente equipo técnico:

ITGE:

D. FRANCISCO JAVIER AYALA CARCEDO
*Ing. de Minas. Jefe de la División de
Ingeniería GeoAmbiental
Director del Proyecto por el ITGE*

D. LUCAS VADILLO FERNANDEZ
*Ing. de Minas. División de Ingeniería
GeoAmbiental*

EPM, S. A.:

D. CARLOS LOPEZ JIMENO
*Dr. Ing. de Minas
Director del Proyecto por EPM, S. A.*

D.ª M.ª PAZ ARAMBURU MAQUA (*)
Dra. en Ciencias Biológicas

D.ª MILAGROS ESCRIBANO BOMBIN
Lda. en Química Agrícola

D. RAFAEL ESCRIBANO BOMBIN (*)
Dr. Ing. de Montes

D.ª MERCEDES DE FRUTOS GOMEZ (*)
Lda. en Ciencias Biológicas

D. SANTIAGO MANGLANO ALONSO
Ing. de Minas

D.ª CARMEN MATAIX GONZALEZ
Lda. en Ciencias Biológicas

D. JOSE M. TOLEDO SANTOS
Ingeniero de Minas

Este trabajo ha sido financiado íntegramente por el INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA y efectuado en régimen de contratación con la empresa EPM, S. A. (ESTUDIOS Y PROYECTOS MINEROS, S. A.), con la colaboración de las personas indicadas (*) del Departamento de Proyectos y Planificación Rural de la E.T.S. de Ingenieros de Montes de Madrid.

© INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA
C/ Ríos Rosas, 23. 28003 MADRID
Telf.: (91) 441 65 00. Télex: 48054
Fax 442 62 16

FOTO PORTADA: Zona restaurada y en explotación de Mina Emma.
ENCASUR (Puertollano. Ciudad Real). Autor: JOSE MARIA DE SALAS.

N.I.P.O.: 232-89-15-3
I.S.B.N.: 84-7840-019-2
Depósito Legal: M. 41.610-1989

Imprime: Rivadeneyra, S. A.
Cuesta de San Vicente, 28
28008 MADRID

PRESENTACION

La capacidad de actuación del hombre sobre la Naturaleza se ha incrementado durante nuestro siglo. En el sector de la Minería, el desarrollo de nuevas técnicas y equipos se ha traducido en un alto grado de mecanización, que ha hecho posible mover grandes volúmenes de rocas para extraer los minerales de la corteza terrestre. Esta actividad, necesaria para satisfacer las necesidades del hombre, ha llevado aparejada una serie de alteraciones en el medio biofísico, sobre todo en aquellas cuencas donde se concentran varios enclaves de extracción.

La preocupación actual por la calidad del Medio Ambiente ha trascendido del mundo científico y técnico que venía preocupándose por él, para formar parte de las inquietudes cotidianas de todos los ciudadanos. El aprovechamiento de los recursos minerales es necesario que se plantee con criterios técnicos racionales y juiciosos, que permitan establecer, al menos, un equilibrio entre el nivel de alteración del Medio Natural y los beneficios producidos por dicha actividad.

Este Manual de Restauración contribuye a alcanzar ese equilibrio, y responde a una de las actividades tecnológicas del ITGE, que le consolidan en su posición de servicio público, en este caso, con el trabajo realizado de interrelación entre la Minería y el Medio Ambiente. Con ello, el Instituto facilita el cumplimiento del Real Decreto 1131/88, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/86. Al mismo tiempo, este trabajo se integra en uno de los objetivos prioritarios del MINER de adaptar la industria española a la normativa medioambiental de la Comunidad Europea, que ha dado lugar al recientemente aprobado Programa de Creación de una Base Industrial, Energética y Tecnológica Medioambiental.

Enrique García Álvarez
Director General de Minas y de la Construcción

PROLOGO

Las explotaciones mineras producen diversas alteraciones en el medio ambiente, entre las que cabe destacar: la degradación del paisaje, la desaparición del uso productivo de la tierra, el aumento de la erosión de la zona al desaparecer la cubierta vegetal, la posible contaminación por sustancias tóxicas, por el ruido, etc.

Los proyectos de restauración, que son preceptivos realizar junto con el de explotación, persiguen la adecuación ecológica y paisajística de los terrenos afectados con vistas a la reinserción del área ocupada en el entorno medio-ambiental. Tal plan de restauración comenzará con el análisis y evaluación de las alteraciones producidas en cada una de las áreas y elementos que constituyen la zona considerada, y en distintas fases del desarrollo de la misma, para después establecer las medidas correctoras necesarias para anular o mitigar los impactos más significativos asociados a la explotación minera. Es en ese conjunto de actuaciones donde la revegetación juega un papel muy importante en el contexto de la recuperación de los terrenos, siendo una de las razones fundamentales de este manual.

La estructura de la obra se ha planteado con un enfoque sistémico y un lenguaje asequible y exento de complejidad para todos aquellos profesionales ligados a la minería, tanto directa como indirectamente, con el ánimo de aportar un abanico de soluciones y pautas, entre las cuales puede encontrarse la idónea a cada situación.

Por último, resaltar la necesidad de abordar esta temática por equipos interdisciplinarios, pues la formulación de un objetivo ecológico, como es la recuperación de los terrenos afectados, implica un extenso conjunto de operaciones y factores relacionados entre sí a los que muy difícilmente puede hacer frente un solo individuo.

INDICE

CAPÍTULO 1. LA MINERIA Y EL MEDIO AMBIENTE

1. INTRODUCCION	1
2. LOS MINERALES Y LA HUMANIDAD	1
3. EVOLUCION HISTORICA DE LA PRODUCCION DE MINERALES	2
4. CRECIMIENTO FUTURO DE LA DEMANDA DE MINERALES	3
5. EL MEDIO AMBIENTE Y SU RELACION CON LA MINERIA	4
5.1. El concepto de Medio Ambiente	4
5.2. La gestión de los recursos minerales y el medio ambiente	4
5.3. El papel de la restauración de los terrenos afectados por la minería	6
6. ELABORACION DE LOS ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL Y PROYECTOS DE RESTAURACION	6
6.1. Objetivos de los Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental	6
6.2. Contenidos de los proyectos de restauración	7
6.3. Bibliografía básica recomendada	10
BIBLIOGRAFIA	11

CAPÍTULO 2. TIPOS DE EXPLOTACIONES MINERAS

1. INTRODUCCION	13
2. FASES DE DESARROLLO DE UNA EXPLOTACION MINERA	13
3. TIPOS DE EXPLOTACIONES A CIELO ABIERTO	14
3.1. Cortas	15
3.2. Descubiertas	16
3.3. Terrazas	17
3.4. Contorno	18
3.5. Canteras	18
3.6. Graveras	19
4. ESTABILIZACION DE TALUDES EN ROCA ..	20
4.1. Modificaciones de la geometría	20

4.2. Drenaje	21
4.3. Empleo de elementos resistentes	21
4.4. Correcciones superficiales	21

BIBLIOGRAFIA	21
--------------------	----

CAPÍTULO 3. ESCOMBRERAS

1. INTRODUCCION	23
2. FACTORES LOCALES PARA LA UBICACION	23
2.1. Lugar del emplazamiento	23
2.2. Tamaño y forma	23
2.3. Geología y capacidad portante	24
2.4. Método de selección del emplazamiento	24
3. CARACTERISTICAS DE LOS ESTERILES ...	25
4. CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE LAS ESCOMBRERAS	25
4.1. Métodos y sistemas constructivos	25
4.2. Rehabilitación y auscultación de escombreras durante su construcción	26
4.3. Normas para garantizar la estabilidad de las escombreras	27
4.4. Cálculos de estabilidad de escombreras	33
5. RESTAURACION Y ABANDONO DE ESCOMBRERAS	40
5.1. Estabilización de escombreras y acondicionamiento para el abandono	40
5.2. Extinción de incendios en escombreras ..	41
6. REUTILIZACION Y APROVECHAMIENTO DE LOS ESTERILES	42
BIBLIOGRAFIA	43

CAPÍTULO 4. PRESAS DE RESIDUOS

1. INTRODUCCION	45
2. FACTORES LOCALES DE UBICACION	45
2.1. Topografía	46
2.2. Tamaño	46
2.3. Geología y sismicidad	46
2.4. Permeabilidad	46
2.5. Otros factores locales	47
3. CARACTERISTICAS DE LOS LODOS	47

4. CARACTERISTICAS DE LOS EFLUENTES ..	48
5. CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE LAS PRESAS DE ESTERILES	48
5.1. Construcción hacia aguas arriba	48
5.2. Construcción hacia aguas abajo	49
5.3. Construcción centrada	50
5.4. Otros métodos de construcción	51
5.5. Otras consideraciones de diseño	51
6. RESTAURACION Y ABANDONO DE PRESAS DE RESIDUOS	52
6.1. Estabilidad de las estructuras a largo plazo	52
6.2. Protección frente a los procesos erosivos a largo plazo	53
6.3. Prevención de la contaminación ambiental	54
6.4. Acondicionamiento para la recuperación y abandono de presas	56
6.5. Puesta en uso productivo de los terrenos recuperados	57
BIBLIOGRAFIA	57

CAPÍTULO 5. LA IDENTIFICACION DE ALTERACIONES Y LA EVALUACION DEL IMPACTO AMBIENTAL

1. INTRODUCCION	59
2. CONTENIDO DE LA E.I.A.M. EN LA INDUSTRIA EXTRACTIVA	59
2.1. Análisis del proyecto	59
2.2. Estudio del Medio	60
2.3. Identificación y predicción de impactos ..	61
2.4. Evaluación de impactos	64
2.5. Medidas correctoras	66
2.6. Plan de abandono y recuperación. Programa de seguimiento y control	71
2.7. Impactos positivos en el ámbito socio-económico	71
3. LEGISLACION AMBIENTAL EN MINERIA	71
BIBLIOGRAFIA	72

CAPÍTULO 6. CONTROL Y PREVENCIÓN DEL POLVO

1. INTRODUCCION	73
2. FUENTES DE CONTAMINACION ATMOSFERICA	73
3. CONCEPTOS DE EMISION E INMISION	73
3.1. Factores de emisión de motores diésel .	74
3.2. Factores de emisión en operaciones mineras	75
4. EVALUACION DEL NIVEL DE CONTAMINACION	75

5. PREVENCIÓN DEL POLVO Y METODOS DE CONTROL	77
6. RESUMEN DE RECOMENDACIONES	82
BIBLIOGRAFIA	83

CAPÍTULO 7. CONTROL Y PREVENCIÓN DEL RUIDO

1. INTRODUCCION	85
2. CARACTERISTICAS DEL RUIDO	85
2.1. Ruido	85
2.2. Tono	85
2.3. Sonoridad	86
2.4. Adición de niveles sonoros	87
2.5. Atenuación del sonido con la distancia ..	87
2.6. Tipos de ruidos	87
3. CAUSAS Y NIVELES DE RUIDOS EN EXPLOTACIONES MINERAS	88
4. CONTROL Y CORRECCION DEL RUIDO	90
5. MEDIDA Y ANALISIS DEL RUIDO	91
6. NIVELES MAXIMOS DE RUIDO ACEPTABLES	92
7. RESUMEN DE RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFIA	93

CAPÍTULO 8. CONTROL Y PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACION DEL AGUA

1. INTRODUCCION	95
2. AGUAS SUBTERRANEAS	95
2.1. Modificación del nivel piezométrico	96
2.2. Alteración de los niveles piezométricos por la extracción de arenas y gravas	96
2.3. Contaminación del agua subterránea ...	97
3. AGUAS SUPERFICIALES	97
3.1. Estándares de calidad	97
4. CARACTERISTICAS DE LAS AGUAS GENERADAS POR LAS ACTIVIDADES MINERAS ..	103
4.1. Aguas alcalinas	103
4.2. Aguas ácidas	103
5. TECNICAS PREVENTIVAS DE FORMACION DE AGUAS ACIDAS	104
5.1. Métodos de barrera	105
5.2. Métodos químicos	108
5.3. Métodos de inhibición bacteriana	109
5.4. Técnicas de predicción de formación de aguas ácidas	109

6. TRATAMIENTO DE EFLUENTES	112
6.1. Eliminación de sólidos en suspensión. Decantación	112
6.2. Neutralización química	112
6.2.1. Método convencional	112
6.2.2. Sistema ILS (In Line System) ...	114
6.2.3. Neutralización con aguas frescas	115
6.3. Osmosis inversa	115
6.4. Intercambio iónico	115
6.5. Tratamiento en ciénagas con especies vegetales y calizas	116
6.6. Tratamientos biológicos	116
BIBLIOGRAFIA	117

CAPÍTULO 9. CONTROL DE LAS VIBRACIONES Y ONDA AEREA PRODUCIDAS POR VOLADURAS

1. INTRODUCCION	119
2. VIBRACIONES DEL TERRENO	120
2.1. Tipos de perturbación derivadas de las vibraciones	120
2.2. Conceptos básicos del movimiento on- dulatorio	120
2.3. La fragmentación de la roca como meca- nismo fuente	121
2.4. Medida de la energía sísmica y ley de transmisión	121
2.5. Instrumentación	122
2.6. Criterios de daños	122
3. CONSIDERACIONES PRACTICAS EN EL DI- SEÑO DE VOLADURAS	125
3.1. Propiedades del macizo rocoso	125
3.2. Propiedades del explosivo	126
3.3. Geometría de la voladura y secuencia de iniciación	126
3.4. Cargas máximas recomendadas cuando no se dispone de instrumentación de registro	129
4. ONDA AEREA	129
4.1. Criterios de daños	130
5. PROYECCIONES	131
BIBLIOGRAFIA	131

CAPÍTULO 10. CONTROL DE HUNDIMIENTOS MINEROS

1. INTRODUCCION	133
2. METODOS DE PREDICCIÓN DE HUNDIMIEN- TOS	133
2.1. Estabilidad superficial en áreas minadas	135

3. DAÑOS PRODUCIDOS POR HUNDIMIENTOS	138
4. TECNICAS DE LOCALIZACION DE LABORES SUBTERRANEAS	139
4.1. Métodos indirectos	139
4.1.1. Métodos geofísicos	140
4.1.2. Métodos geoquímicos	140
4.2. Métodos directos	141
4.2.1. Calicatas y excavaciones piloto .	141
4.2.2. Pozos de investigación	141
4.2.3. Sondeos y barrenos	141
5. CONTROL Y CONSOLIDACION DE HUECOS MINEROS POCO PROFUNDOS. ABANDONO DE LABORES SUBTERRANEAS	141
5.1. Minados abiertos	142
5.2. Minados hundidos	143
5.3. Situaciones especiales de consolidación	144
5.4. Abandono de labores subterráneas	145
6. RECOMENDACIONES DE CONSTRUCCION SOBRE AREAS MINADAS SIN CONSOLIDAR	147
BIBLIOGRAFIA	148

CAPÍTULO 11. CONTROL DE LA EROSION Y SEDIMENTACION. OBRAS ESTRUCTURALES

1. INTRODUCCION	149
2. EVALUACION DE LA EROSION HIDRICA	150
3. CONTROL DE LA EROSION Y SEDIMEN- TACION	154
3.1. Cálculo de los caudales a desaguar	154
3.2. Canales y diques	157
3.2.1. Protección de canales	161
3.3. Difusores laminares	163
3.4. Protección de sumideros	163
3.5. Protección de desagües	165
3.6. Barreras de sedimentos	165
3.7. Desagüe de taludes	167
3.8. Protección de bermas	170
3.9. Perfiles de los taludes	171
3.10. Balsas de decantación	171
3.10.1. Ubicación y tamaño	171
3.10.2. Elementos constructivos	173
3.11. Filtros de superficie	176
BIBLIOGRAFIA	176

CAPÍTULO 12. INTEGRACION PAISAJISTICA, CRITERIOS Y TECNICAS

1. INTRODUCCION	177
-----------------------	-----

2. ESTUDIO DEL PAISAJE	177
2.1. Elementos y componentes del paisaje ..	177
2.2. Cuenca visual	180
2.3. Alteración del paisaje natural	180
2.4. Técnicas de simulación	180
3. FUENTES DE IMPACTO VISUAL	182
3.1. Areas de excavación	182
3.2. Escombreras de estériles	182
3.3. Instalaciones fijas	182
3.4. Equipos móviles	183
3.5. Polución del agua y el aire	183
4. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA INTE- GRACION DE EXPLOTACIONES Y ESCOM- BRERAS EN EL PAISAJE	183
5. HUECOS DE EXPLOTACION	183
5.1. Ubicación y ocultación natural de las ex- plotaciones	183
5.2. Orientación de los frentes y dirección de avance	185
5.3. Apantallamiento artificial de las explo- taciones	186
5.4. Accesos a las explotaciones	186
5.5. Criterios de modelado de taludes finales de explotación en zonas secas	187
5.6. Criterios de modelado de taludes finales en zonas húmedas	191
6. ESCOMBRERAS	
6.1. Ubicación y ocultación natural de las es- combreras	191
6.2. Modelado de escombreras	193
6.3. Secuencias de construcción de escom- breras	196
6.4. Apantallamiento artificial de las escom- breras	196
7. INSTALACIONES	196
7.1. Ubicación de las instalaciones	196
7.2. Ocultación y enmascaramiento de las ins- talaciones	197
BIBLIOGRAFIA	198

CAPÍTULO 13. USOS POTENCIALES DE LOS TERRENOS AFECTADOS POR LAS ACTIVIDADES MINERAS

1. INTRODUCCION	199
2. POSIBILIDADES DE USO	201
2.1. Uso urbanístico e industrial	202
2.2. Recreativo intensivo y deportivo	202
2.3. Vertederos de estériles y basuras	203
2.4. Agrícola	204
2.5. Forestal	206
2.6. Recreativo no intensivo y educacional ..	207
2.7. Conservación de la naturaleza y refugios ecológicos	209
2.8. Depósitos de agua y abastecimiento	210

3. CAPACIDAD DE USO DE LOS TERRENOS ..	210
BIBLIOGRAFIA	214

CAPÍTULO 14. FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN A LA RESTAURACION DE LA VEGETACION

1. INTRODUCCION	215
2. FACTORES DE INFLUENCIA GENERAL	215
2.1. Factores climáticos	215
2.2. Factores edáficos	216
2.3. Factores topográficos	217
3. EL MEDIO TECNICO	217
3.1. Modificaciones de carácter físico	217
3.2. Características de los materiales	218
3.2.1. Propiedades físicas	218
3.2.2. Propiedades químicas	219
4. FACTORES AMBIENTALES MODIFICADOS POR LA ACTIVIDAD MINERA	219
4.1. Factores físicos	219
4.1.1. Temperatura	219
4.1.2. Humedad	222
4.1.3. Aireación del suelo	222
4.2. Factores químicos	223
4.2.1. Presencia y disponibilidad de nu- trientes	223
4.2.2. Acidez y alcalinidad	224
4.2.3. Toxicidad	225
BIBLIOGRAFIA	225

CAPÍTULO 15. ANALISIS Y PREPARACION DE LOS TERRENOS PARA EFECTUAR LA REVEGETACION

1. INTRODUCCION	227
2. MANEJO DE LA CAPA SUPERFICIAL DEL SUELO	229
3. TRATAMIENTO DE LA COMPACTACION. DESCOMPACTACION	232
4. ENMIENDAS O MEJORAS EDAFICAS	233
4.1. Fertilización	234
4.1.1. Fertilización indirecta. Fertiliza- ción orgánica o enmiendas or- gánicas	234
4.1.2. Fertilización directa. Fertilizantes inorgánicos	234

4.2. Enmiendas para corregir la acidez o alcalinidad del suelo	237
4.3. Mejora de la toxicidad	238
5. TRATAMIENTOS ESPECIALES DE LOS TALUDES EN LA PREPARACION DEL TERRENO	238
5.1. Areas llanas y taludes suaves	238
5.2. Taludes escarpados o con fuertes pendientes	238
5.2.1. Remodelación	238
5.2.2. Estabilización del talud. Drenajes	239
5.2.3. Protección superficial	241
6. ESQUEMAS SOBRE LA PREPARACION DEL TERRENO EN DISTINTOS TIPOS DE EXPLOTACIONES MINERAS	243
7. MAQUINARIA UTILIZADA EN LA PREPARACION DEL TERRENO	245
BIBLIOGRAFIA	247

CAPÍTULO 16. SELECCION DE ESPECIES VEGETALES

1. INTRODUCCION	249
2. DINAMICA DE LA VEGETACION Y SELECCION DE ESPECIES	253
2.1. Selección vegetal	253
2.1.1. Introducción	253
2.1.2. Especies indicadoras	256
2.1.3. Otras herramientas	261
2.2. Estrategias de las plantas	261
3. ESQUEMA METODOLOGICO BASICO PARA LA SELECCION DE ESPECIES	264
3.1. Preselección de especies	266
3.1.1. Utilización de especies exóticas	271
3.2. Valoración de especies	274
3.2.1. Adecuación de las especies al medio	275
3.2.2. Adecuación de las especies a los objetivos	276
3.2.3. Adecuación de las especies a las directrices y restricciones de diseño	277
3.2.4. Otros factores que pueden condicionar la utilización de la especie	
3.3. Especies idóneas	277
4. ESTUDIO DE UN CASO PRACTICO	278
4.1. Introducción	278
4.2. Siembras	280
4.2.1. Dosis de siembras	280
4.3. Hidrosiembra	280
4.4. Plantación	281
BIBLIOGRAFIA	282

CAPÍTULO 17. METODOS DE IMPLANTACION DE LA VEGETACION

1. INTRODUCCION	283
2. PLANTACION	284
2.1. Tipo de vegetación y formas de cultivo	284
2.1.1. Tipo de vegetación	284
2.1.2. Formas de cultivo	285
2.2. Métodos de plantación	286
2.2.1. Plantación manual	287
2.2.2. Plantación mecánica	289
2.3. Epoca de plantación	289
2.4. Densidad de plantación	289
3. SIEMBRA	290
3.1. Métodos de siembra	291
3.1.1. Siembra en hileras	291
3.1.2. Siembra a voleo	292
3.2. Hidrosiembra	293
3.3. Otros métodos de siembra	296
3.4. Epoca de siembra	297
3.5. Calidad de las semillas y dosis de siembra	297
4. MULCHES Y ESTABILIZADORES	298
5. OTROS METODOS DE IMPLANTACION	300
5.1. Horizonte superficial del suelo como fuente de semillas naturales	300
5.2. Encespedamiento	300
5.3. Trasplante de la vegetación natural	301
6. CUIDADOS POSTERIORES A LA IMPLANTACION	301
6.1. Riego	301
6.2. Fertilización	302
6.3. Reposición de marras	302
6.4. Colocación de vientos y tutores	303
6.5. Repetición de la hidrosiembra	303
6.6. Control de la calidad del sustrato	303
6.7. Aclareo y eliminación de las malas hierbas	303
6.8. Siegas	303
BIBLIOGRAFIA	304

CAPÍTULO 18. EVALUACION ECONOMICA DE LOS PROYECTOS DE RESTAURACION

1. INTRODUCCION	305
2. OPERACIONES PRINCIPALES. UNIDADES DE OBRA	306
3. PRECIOS UNITARIOS	307

3.1. Maquinaria	310
3.1.1. Costes directos de funcionamiento	311
3.1.2. Coste indirecto o de propiedad ..	312
4. PRESUPUESTOS PARCIALES Y GENERALES	314
5. INDICES DE REPERCUSION ECONOMICA DE LA RESTAURACION EN LOS COSTES DE EXPLOTACION.....	315
BIBLIOGRAFIA	316

CAPÍTULO 19. SEGUIMIENTO Y CONTROL

1. INTRODUCCION	317
2. EVALUACION DE IMPACTO AMBIENTAL	317
2.1. Exposición de un ejemplo	317
3. PROYECTOS DE RESTAURACION	318
3.1. Exposición de un ejemplo	318

LA MINERIA Y EL MEDIO AMBIENTE

1. INTRODUCCION

El despertar universal de la conciencia sobre el medio ambiente surgió al comienzo de la década de los años setenta. Fue entonces cuando se empezó a percibir con nitidez en los países más avanzados que el bienestar económico, fruto del desarrollo, iba acompañado de unas secuelas no deseadas sobre la naturaleza y que empezaban a ser difícilmente aceptables para las poblaciones.

En épocas anteriores también surgieron problemas de medio ambiente, pero es en la actualidad cuando, con el espectacular aumento de la facultad humana de transformación del entorno natural, se ha originado un desequilibrio entre los deterioros ocasionados y la capacidad de recuperación del medio frente a los mismos.

Existen infinidad de testimonios históricos que demuestran la inquietud del hombre por el medio ambiente. Cabe citar, entre los relacionados con las actividades extractivas en España, el conflicto de 1888 entre los mineros de Río Tinto y la compañía explotadora por la devastación del entorno y el daño a la salud que causaba la calcinación al aire libre de los minerales de cobre en las denominadas «teleras». Ya surgieron entonces las primeras disposiciones oficiales sobre la higiene y la salubridad pública, así como sobre la protección del medio ambiente.

Con respecto a la minería, que es la actividad industrial básica dedicada a la obtención de georrecursos para el abastecimiento a la población de materias primas, en ningún momento ha sido más importante para la humanidad que hoy día reconocer su dependencia de los minerales y metales, y confesar su influencia sobre su calidad de vida, su progreso y su destino. Es, pues, evidente, que no se puede prescindir de la explotación de los recursos minerales y que esta actividad probablemente se intensifique en el futuro.

Sin embargo, la conciencia que se tiene hoy de la limitación de los recursos naturales, así como la de los diversos elementos que constituyen los ecosistemas que nos rodean, obliga a ejercitar la capacidad inventiva y creativa para solucionar los problemas de demanda de materias primas minerales en todo el mundo, en claro equilibrio con la conservación de la naturaleza, permitiendo así salvaguardar el patrimonio que representa el medio y los recursos naturales para poder legarlo a las generaciones futuras.

2. LOS MINERALES Y LA HUMANIDAD

Los minerales y sus productos derivados han estado siempre estrechamente ligados a todos los aspectos de la civilización, a sus instituciones, a sus actividades, a su bienestar y a su calidad de vida. Incluso muchos enfrentamientos bélicos han nacido por la disputa de la posesión de yacimientos mineros.

La búsqueda incansable por el hombre de las riquezas naturales le ha llevado a través de la historia al descubrimiento y colonización de nuevas tierras y a la expansión del comercio, además del arte y la tecnología.

Con frecuencia, el nivel de desarrollo de una sociedad se mide por los usos que cada nación hace de sus propios recursos mineros o con los importados y su valor económico en las diferentes etapas de utilización y procesamiento.

Los minerales y la sociedad han estado ligados desde los tiempos más remotos de la Humanidad, conociéndose así las etapas prehistóricas con el nombre de «Edad de Piedra», «Edad de Cobre» y «Edad de Hierro», en clara alusión a la naturaleza de los utensilios en ellas empleados. Fig. 1.1.

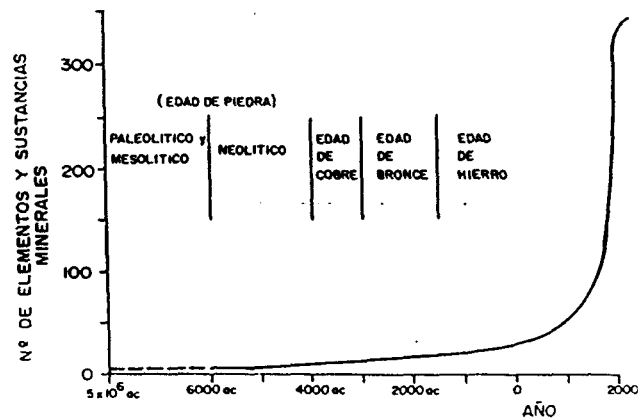


Figura 1.1. Elementos y sustancias explotadas desde la prehistoria.

Desde el principio del Paleolítico, hace 250.000 años o quizás 500.000 años, cuando el hombre emergió como un ser extraño, las herramientas de piedra fueron pacientemente esculpidas en cuarzo, pedernal y otros materiales duros, desde el Cabo de Buena Esperanza al Mediterrá-

neo y desde el Atlántico a la India. Parece como si hubiera existido un contacto entre los diferentes grupos dispersos que compartieron aisladamente ideas y experiencias similares.

Durante el Neolítico, hace 10.000 ó 12.000 años, el pedernal fue el principal mineral utilizado en el arte y en la industria para la fabricación de herramientas, hachas, arpones y otros utensilios. No obstante, ya se empleaban más de 13 sustancias minerales, algunas de las cuales se aplicaban en la pintura y decoración.

El hombre salió de la Edad de Piedra cuando fue capaz de dominar algunas técnicas metalúrgicas elementales. La Edad de Bronce durante la que se aprendió a trabajar el cobre y el bronce, a utilizar los animales como fuerza de tiro, a emplear la rueda en los vehículos y en el arte, a construir con ladrillos, etc., supuso tal revolución en descubrimientos y en invenciones que no fue superada hasta pasado el siglo XVI.

La metalurgia del cobre prosperó gracias a los descubrimientos relacionados con la maleabilidad y fusibilidad del metal, a la reducción de los minerales de cobre con carbón vegetal y a la aleación del cobre con otros metales.

Hacia el año 3000 a. de C., los pueblos que ocupaban los valles aluviales del Nilo, Tigris, Eúfrates e Indo presentaban un notable rasgo común: la dependencia de los metales escasos y no comunes, y de las aleaciones para un equipamiento industrial.

Paralelamente, el oro que debió ser uno de los primeros metales en atraer la atención del hombre primitivo, pues se encontraba en la naturaleza en estado nativo y sobre todo en las rocas y gravas de muchos ríos, ya se consideraba como un símbolo de riqueza, estando ligado al crecimiento y florecimiento de los diferentes pueblos. Una de las zonas que más oro produjo fue Egipto donde, según Diodoro, se explotaban depósitos aluviales mediante minería a cielo abierto, habiéndose hallado en tumbas fechadas en el 2500 a. de C. representaciones de los procesos de trituración del cuarzo y refinamiento del oro. Otra evidencia de la importancia del oro para los egipcios fue la relación de ese metal con la inmortalidad, pues dejaban los restos de sus faraones en sarcófagos revestidos de oro y diferentes tesoros de ese metal para acompañarlos en el Más Allá.

La plata se utilizó probablemente como moneda antes que el oro, existiendo referencias de esto en el Antiguo Testamento. Parece que hay indicios de que purificaban la plata mediante un proceso de copelación.

También se emplearon en los tiempos antiguos, el estaño, apareciendo algunas muestras en las tumbas egipcias; el mercurio en forma de cinabrio, que se usaba como pigmento para colorear; y el plomo, que si bien se empezó a utilizar en Egipto en el 3000 a. de C. no fue hasta el tiempo de los romanos cuando tuvo un uso más extensivo.

Los avances tecnológicos le permitieron al hombre en el 1200 a. de C. pasar a la Edad de Hierro. Algunas teorías indican que el primer hierro utilizado por los pueblos primitivos, procedía de meteoritos caídos a la tierra. El descubrimiento de una pieza de hierro en la pirámide de Gizeh, que tiene unos 5.000 años de antigüedad, avalan esta teoría.

Posteriormente, se desarrollaron los procesos de obtención del hierro hasta los momentos actuales en que este metal aún juega un papel importante en el desarrollo industrial de los países.

Es evidente que no en todos los continentes las Edades cronológicas comenzaron al mismo tiempo, pues los egipcios y otras civilizaciones obtuvieron metales siglos antes que los aztecas y los incas, y todavía hay ciertas tribus de África y de Sudamérica que viven en el Neolítico.

En cuanto al carbón, el hombre pudo haberlo descubierto ya en la Edad de Piedra, tal y como se ha puesto de manifiesto en minas inglesas con la aparición de algunas hachas neolíticas. No obstante, entre las primeras civilizaciones orientales que explotaron carbón se encuentra la China. También hace más de 2000 años, los griegos utilizaron carbón en los procesos metalúrgicos y los romanos lo extrajeron de los yacimientos de Bretaña durante su ocupación. A pesar de todo, no fue hasta el siglo XVI, cuando con la desaparición progresiva de los bosques empezó a utilizarse como fuente de energía.

Pero fue a partir de los siglos XVIII y XIX cuando la vida económica, sobre todo en Inglaterra, sufrió una rápida transformación estimulada por las guerras de Europa y el aumento de los precios de los productos agrícolas. La invención de la máquina de vapor por James Watt en 1870 y su aplicación al desagüe de minas y accionamiento de maquinaria, el descubrimiento de la dinamita para la fragmentación de las rocas y la aplicación de importantes ingenios mecánicos hicieron que la minería progresara espectacularmente. La industria del hierro y el acero, sobre la que se basó la Revolución Industrial, fue posible gracias al empleo efectivo del carbón en las fundiciones y en el accionamiento de las máquinas de vapor.

También constituyó un acontecimiento histórico trascendental el descubrimiento del petróleo en 1859 por el Coronel E. L. Drake, cuando perforó un pozo de 20 m del que obtenía 2 toneladas al día. Comenzó así la Edad del Petróleo en la cual aún nos encontramos inmersos.

3. EVOLUCION HISTORICA DE LA PRODUCCION DE MINERALES

Con el fin de situar el momento actual bajo una amplia perspectiva histórica, en la Fig. 1.2 se ha representado la evolución de la producción de algunos metales básicos de nuestra civilización, tales como el hierro, el cobre, el plomo, el zinc, el aluminio, el níquel y el molibdeno, desde 1870, año en el que la Revolución Industrial entró en una etapa decisiva de desarrollo a través de la construcción de ferrocarriles, de la electrificación y, en suma, de una industrialización masiva, como ya se ha indicado.

Como queda reflejado en la citada figura, todos los metales muestran una evolución en los esquemas de producción y consumo muy similares, siendo los hechos más destacables los siguientes:

- Un crecimiento prácticamente exponencial a largo plazo. Como la escala es logarítmica, la tendencia se representa como una línea recta cuya pendiente media indica el incremento anual de producción.
- Las Guerras Mundiales y los períodos económicos de depresión subsiguientes que se caracterizan por un comportamiento errático y fuertes oscilaciones en la producción y en la demanda, tales como el descenso de la actividad económica durante la I y II Guerras Mundiales, la Gran Depresión y el período de post-guerra del último enfrentamiento.

— Tras esos períodos, el crecimiento se eleva generalmente durante un tiempo prolongado, pero que desaparece a largo plazo.

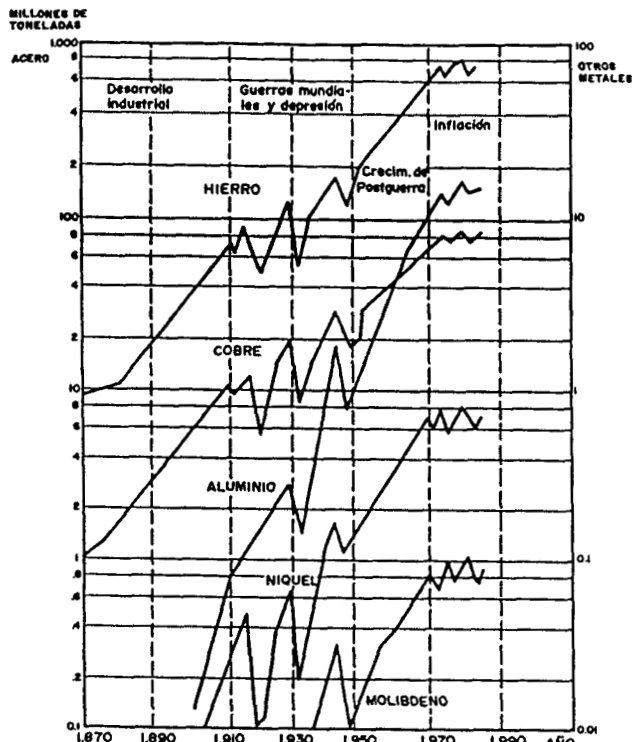


Figura 1.2. Evolución histórica de la producción de metales.

En la citada figura se ve claramente que en el caso del hierro y el cobre, el crecimiento exponencial de la demanda continúa con más o menos fuerza ya que los ciclos de depresión a largo plazo fueron superados. Si esos períodos no hubieran existido, los ritmos anuales de producción se hubieran alcanzado 15 ó 20 años antes.

En este siglo el fenómeno de crecimiento más importante ha sido el del aluminio. Desde su comienzo humilde como un metal raro en la última década del siglo pasado, noventa años después se ha afianzado sólidamente como el segundo metal más importante después del hierro, desplazando al que ocupaba históricamente ese puesto que era el cobre. El aluminio ha alcanzado una firme posición en el mercado mundial, fundamentalmente al sustituir a otros metales y materiales.

4. CRECIMIENTO FUTURO DE LA DEMANDA DE MINERALES

El crecimiento en la demanda de minerales se restablecerá tras superar los efectos negativos del ciclo depresivo, pues dicha demanda está íntimamente relacionada con el crecimiento económico, con la expansión demográfica y con la mejora de la calidad de vida.

En la Fig. 1.3 se muestra gráficamente el proceso de expansión demográfica prevista a partir de los ritmos de crecimiento actuales de la población mundial. Ese aumento es de reducida magnitud si se compara con la evolución del consumo de metales. Tabla 1.1.

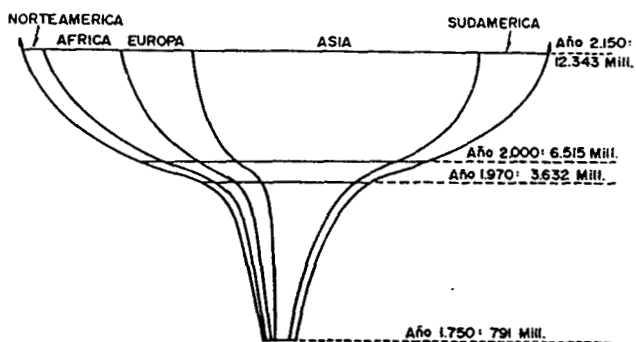


Figura 1.3. Previsión de la expansión demográfica.

TABLA 1.1. CRECIMIENTO DE LA POBLACION Y DEL CONSUMO DE METALES

	1870	1970	1983	2000
Población (millones)	1.200	3.632	4.679	6.270
Índice	1	3	3,9	5,2
Hierro y acero (millones de toneladas)	21,3	595,4	664,3	850-950
Índice	1	28	31	42
Cobre (miles de toneladas)	105	6.420	9.115	12.500-14.500
Índice	1	62	87	128
Plomo (miles de toneladas)	286	3.410	5.285	10.300-12.000
Índice	1	12	18	39
Zinc (miles de toneladas)	177	5.465	6.355	10.600-12.000
Índice	1	31	36	64
Aluminio (miles de toneladas)	1	10.257	15.466	36.500-50.000
Índice	1	10.257	15.466	43.000
Molibdeno (miles de toneladas)	—	72	77	150-170

Fuente: W. Malenbaum (1978).

Mientras que la población mundial se multiplicó por 3,9 desde 1870 a 1983, el consumo de los diferentes metales durante el mismo período de tiempo lo hizo de la siguiente manera:

METAL	FACTOR DE CRECIMIENTO
Hierro	31
Cobre	87
Plomo	18
Zinc	31
Aluminio	15.466
Molibdeno	77

Esto solamente indica que la demanda de metales probablemente se incrementará entre 8 y varios cientos de veces más que la población mundial.

En lo que respecta al conjunto de los minerales no energéticos, el consumo actual per cápita, Fig. 1.4, en los países más desarrollados como Estados Unidos superan las 8 toneladas. Este consumo probablemente se va a ir incrementando en dichos países en los próximos años, pero más espectacularmente en los menos desarrollados que intentan seguir el modelo de economía libre de los primeros. En el caso específico de España, se prevé que hacia 1995 se habrá logrado pasar de las casi 4,5 toneladas de minerales no energéticos actuales a las 8 toneladas citadas anteriormente.

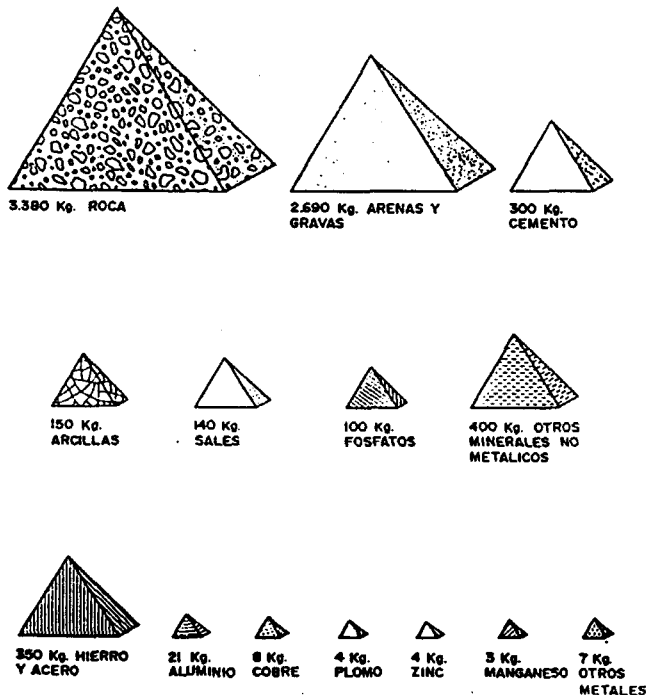


Figura. 1.4. Consumo per cápita de minerales no energéticos en Estados Unidos (1986).

Por otro lado, aunque aquí no se ha hecho referencia a los minerales energéticos, existe un estrecho nexo de unión entre unos y otros. Así, por ejemplo, en Estados Unidos el consumo de energía en la extracción y procesamiento de materias primas supone el 25% de todo el consumo de energía del país y las dos terceras partes de toda la energía del sector industrial. Este hecho constituye, pues, un círculo vicioso que hace imposible desligar un sector de los otros.

5. EL MEDIO AMBIENTE Y SU RELACION CON LA MINERIA

5.1. El concepto de medio ambiente y de ecología

El término medio ambiente, al cual se alude de manera reiterada en nuestros días, no posee una única definición que de una forma clara y concisa permita entender su alcance y satisfaga a todos.

Las definiciones existentes son en su mayoría complejas y subjetivas, pero entre todas ellas caben destacar las de dos grupos que pudieran clasificarse como amplias y sistemáticas. De las primeras, sobresale la propuesta por el Comité Internacional de la Lengua Francesa, que fue aceptada en la Conferencia de Estocolmo celebrada en 1972, y que define el medio ambiente como «el conjunto, en un momento dado, de los agentes físicos, químicos, biológicos y de los factores sociales susceptibles de causar un efecto directo o indirecto, inmediato o a plazo, sobre los seres vivientes y las actividades humanas».

Entre las definiciones sistémicas se encuentra la del grupo de trabajo del MAB, enunciada en 1973 «Los medios ambientes son sistemas multidimensionales de interrelaciones complejas en continuo estado de cambio». Posteriormente Gallopin en 1981, aclara aún más el concepto al decir «El medio ambiente de un sistema es todo aquello en el universo que no es parte integrante en él... El medio ambiente de un sistema podría definirse como otro sistema que influye en el sistema considerado y recibe la influencia de éste... Otro sistema cuya organización determina aquellos aspectos del comportamiento del sistema que no se desprenden de su propia organización... Una especificación mayor del medio ambiente de un biosistema se obtiene cuando nos interesamos por la organización interna y la dinámica del medio ambiente de un biosistema con su interés propio, o sea, porque elegimos el medio ambiente de un biosistema como objeto de análisis o, como a menudo sucede con el hombre, nos interesan las formas en que el hombre influye en otros biosistemas, etcétera».

Se puede ver, pues, que siempre se habla del ambiente de algo o de alguien, y que no ponen límites ni para la naturaleza ni para los componentes del ambiente, ni para los componentes de su par, por lo que unos y otros pueden tener naturaleza física, química o biótica.

Los recursos minerales, como parte de los recursos naturales, se integran en el propio sistema multidimensional que configura el medio ambiente. El ser humano mediante la extracción de los recursos naturales y transformación posterior en productos y/o residuos introduce lo que se denomina el medio ambiente transformado y cuya incidencia puede haberse concretado sobre el medio físico, químico, biótico y social.

5.2. La gestión de los recursos minerales y el medio ambiente

La explotación y aprovechamiento de los recursos minerales, dentro de una política global de desarrollo industrial y, al mismo tiempo, de conservación del medio ambiente, debe realizarse con el concurso de una serie de factores que coadyuvan a la obtención de esos objetivos y,

en definitiva, que permitan la gestión del sector minero con una visión racional e integradora.

En la Fig. 5. se representa un esquema del modelo de funcionamiento del proceso minero donde se pone de manifiesto su carácter dinámico, espacial y temporal, y la gran influencia que ejerce el mercado mediante la demanda de materias primas minerales.

Entre las consideraciones a tener en cuenta en la gestión de los recursos minerales que sirven para «utilizar» de forma más eficiente el medio natural, pueden citarse los siguientes:

- **Aprovechamiento integral de las materias primas.** Durante el procesamiento y concentración de las menas se produce un volumen considerable de residuos y estériles, que podrían sustituir, en parte, a los recursos que actualmente es preciso obtener de gran número de explotaciones. Por ejemplo, en la construcción y obras públicas como áridos, gravas, arenas, etc., que se usan para formar la base y sub-base en carreteras, para la elaboración de cementos y hormigones, para la fabricación de ladrillos, etc.

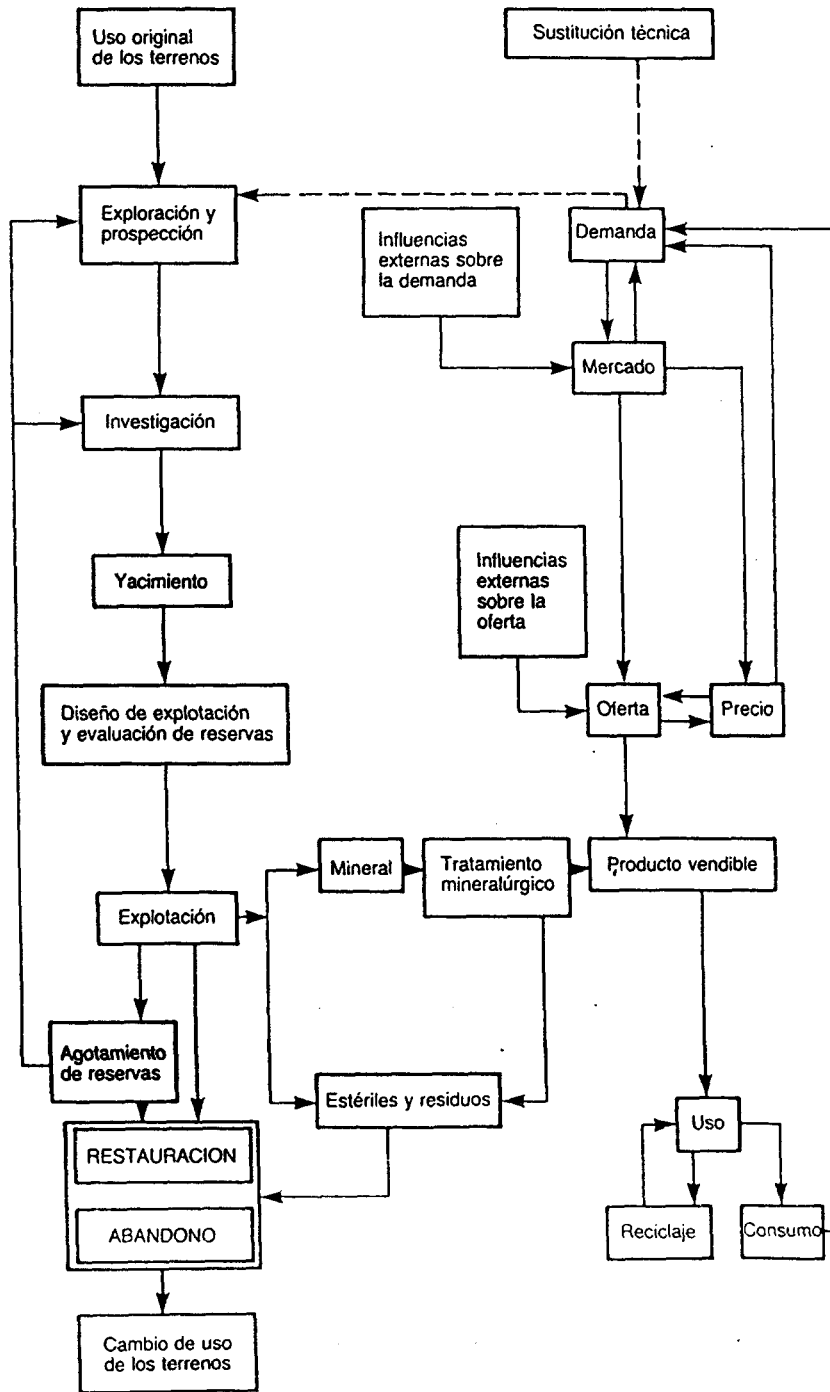


Figura. 1.5. Modelo de funcionamiento del ciclo minero.

Otros residuos como son las cenizas metálicas de tostación de la pirita y las escorias y cenizas volantes de las térmicas ya se están utilizando de un modo integral con un claro beneficio económico y una repercusión muy favorable en el medio ambiente.

— **Reciclado de materiales de desecho.**

Muchos productos, después de su uso o consumo generan importantes cantidades de materiales que pueden reciclarse económicamente. Como ejemplo demostrativo de esto, está el caso del aluminio cuya producción secundaria de 1 t requiere solamente el 5 % de la energía necesaria para producir la misma cantidad de metal a partir de bauxita.

— **Utilización eficiente de la energía.**

Los procesos fabriles e industriales demandan grandes cantidades de energía y, en ocasiones, presentan unos rendimientos energéticos muy bajos. Además de las medidas de conservación de la energía, otro factor es la sustitución de determinados productos por materiales cuya elaboración suponga menores consumos específicos de energía. Las innovaciones tecnológicas juegan aquí un papel muy importante, así como la producción masiva de nuevos materiales, entre los que cabría destacar los siguientes: cerámicas avanzadas, aleaciones especiales, etc.

— **Explotación racional de los yacimientos.**

Muchos depósitos albergan minerales con diferentes contenidos de sustancias aprovechables, con curvas que relacionan los tonelajes y las leyes del tipo normal y lognormal. La aplicación de leyes de corte altas se traduce en la pérdida de minerales pobres o marginales cuyo tratamiento sería viable con procesos más eficientes o condiciones económicas más favorables. La ubicación de tales minerales en zonas diferenciadas para una posible explotación futura sería la primera medida.

El mejor conocimiento geológico de los yacimientos y el correcto diseño de las minas son actuaciones fundamentales para conseguir unas recuperaciones mineras más eficientes y básicas para su aprovechamiento racional.

— **Planificación del abastecimiento de minerales.**

La elaboración de planes de abastecimiento a partir de las proyecciones de crecimiento de la población y, consecuentemente, de la demanda, alternando las fuentes y modalidades de aprovisionamiento de los recursos constituye una buena herramienta de gestión para asegurar el suministro de materias primas, al mismo tiempo que sirven de base para la puesta en marcha y ejecución de programas de ordenación minero-ambiental en algunos subsectores.

— **Legislación ambiental.**

Por último, la aplicación de la legislación en materia ambiental y de seguridad afectará a la gestión de los recursos en dos facetas distintas. Primero, se logrará de una forma directa que los impactos producidos sean menores al aplicarse medidas correctoras sobre las alteraciones de carácter temporal y permanente, y procederse a la recuperación de los terrenos y, segundo, al entrar en vigor cierta reglamentación en otros sectores o áreas industriales se producirán unos efectos indirectos claramente beneficiosos al obtenerse sustancias sustitutivas de las naturales. Por ejemplo,

la limitación de la cantidad de plomo en la gasolina, además de permitir unos índices de contaminación más bajos, dará lugar a un menor dispendio y demanda de dicho metal, tal como está sucediendo en los últimos años en los países más industrializados.

5.3. El papel de la restauración de los terrenos afectados por la minería

La mayor parte de las actividades que desarrolla el hombre son, en mayor o menor medida, agresivas para la Naturaleza. La minería reviste especial interés, ya que después de proceder a la extracción de los recursos minerales, si no existe una restauración posterior, los terrenos abandonados quedan en una situación de degradación sin posibilidades reales de aprovechamiento.

La sociedad actual consciente de esta situación, ha comenzado a considerar la explotación de recursos minerales en el marco de la ordenación del territorio, con las salvedades lógicas que están ligadas a la ocurrencia y descubrimiento de los yacimientos, contemplando las operaciones extractivas como usos transitorios y no terminales, por lo que es necesario reacondicionar los terrenos afectados para alcanzar un equilibrio entre el desarrollo económico y la conservación de la naturaleza.

El reacondicionamiento de esos terrenos puede ir desde la reduplicación exacta de las condiciones originales, que es cuando se debe hablar con rigor de restauración, hasta el intento de conseguir un aprovechamiento nuevo y sustancialmente diferente al que correspondía a la situación primitiva, que es lo que se entiende por rehabilitación o recuperación. Cualquiera que sea el camino seguido, es obvio que se trata de una obligación social cuya viabilidad es a todas luces factible y que, en no pocas ocasiones, supone un valor añadido al propio proyecto minero.

Independientemente del uso previsto para los terrenos afectados por las labores mineras, la revegetación suele jugar un papel de protagonista, ya que posibilita:

- La restauración de la producción biológica del suelo.
- La reducción y control de la erosión.
- La estabilización de los terrenos sin consolidar.
- La protección de los recursos hidráulicos, y
- La integración paisajística.

Por ello, la implantación de la vegetación es la razón fundamental de este manual.

6. ELABORACION DE LOS ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL Y PROYECTOS DE RESTAURACION

6.1. Objetivos de los Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental

El objetivo de los estudios de Evaluación del Impacto Ambiental en minería es identificar, predecir y prevenir las alteraciones ambientales producidas por las actividades extractivas, desde la investigación y explotación minera

hasta el procesamiento de las sustancias a beneficiar. Estos estudios deben basarse sobre los proyectos de explotación, efectuados previamente o de forma simultánea con los de restauración. Esta forma de proceder es la más lógica y racional, ya que permite mantener una coherencia entre todas las labores previstas, incorporando determinadas modificaciones o criterios en las mismas, de cara a conseguir una recuperación de los terrenos más rápida en

el tiempo y a menor coste, y de esta forma garantizar la viabilidad de la explotación.

El proceso ideal debe tener un carácter interactivo, con el fin de alcanzar la solución óptima o la alternativa más favorable para compaginar los diferentes objetivos: mineros, ecológicos, económicos, etc.

En la Fig. 1.6 se pueden observar las relaciones entre los distintos estudios y etapas de ejecución.

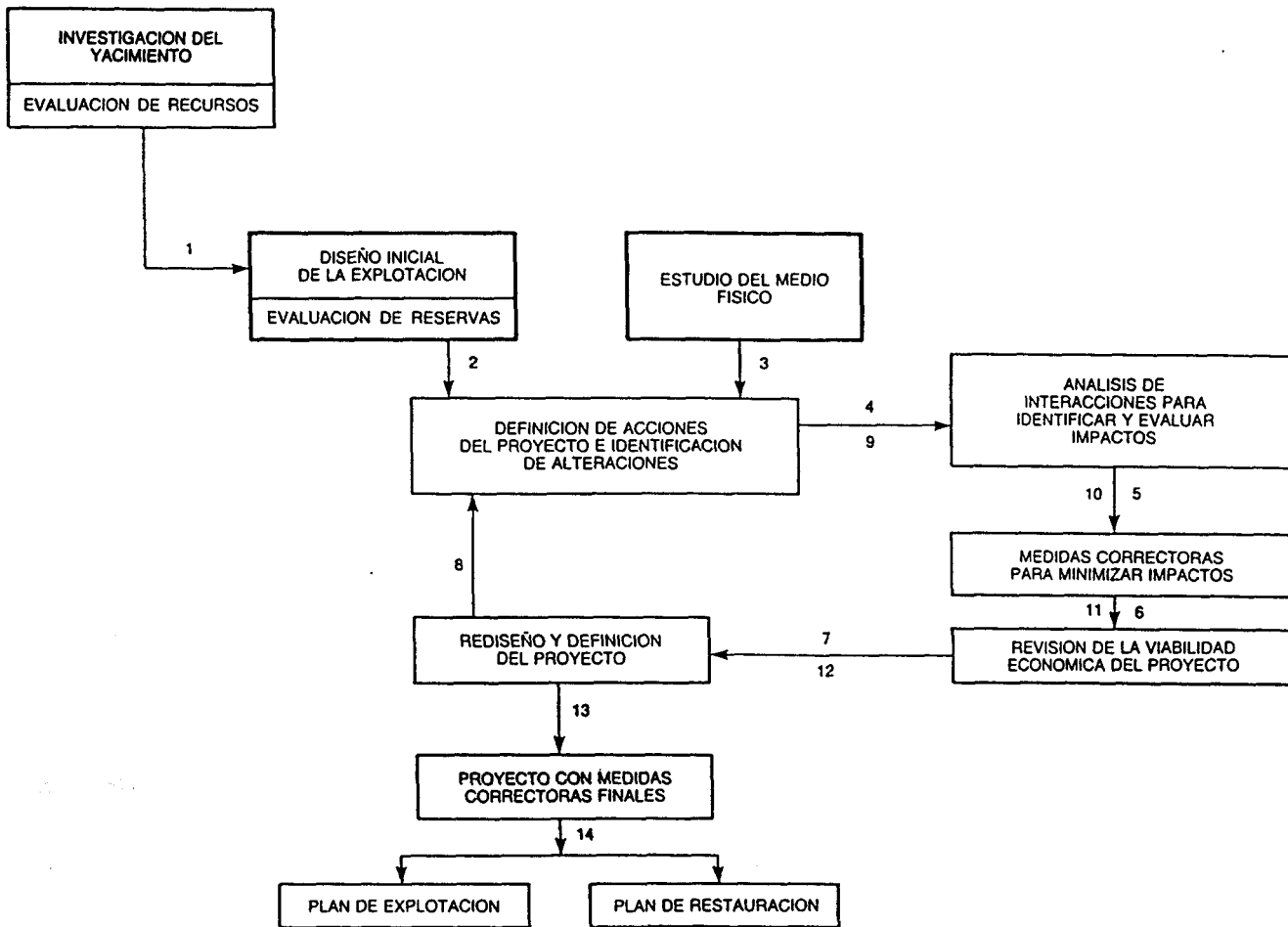


Figura 1.6. Etapas de ejecución de un proyecto minero y su interacción con el medio ambiente.

6.2. Contenidos de los proyectos de restauración

En lo referente al contenido de estos trabajos, un índice básico es el que se propone a continuación en el que se combina la Evaluación del Impacto Ambiental con el Proyecto de Restauración.

CONTENIDO DE UN ESTUDIO DE EVALUACION DE IMPACTO AMBIENTAL Y PROYECTO DE RESTAURACION

I. INTRODUCCION

1. Presentación
2. Antecedentes

3. Alternativas de ubicación. Justificación de la solución propuesta
4. Legislación aplicable

II. DESCRIPCION DE MEDIO AMBIENTE

1. Marco Geológico
2. Hidrogeología
3. Hidrografía
4. Fisiografía
5. Climatología
6. Edafología
7. Flora y vegetación
8. Fauna
9. Paisaje
10. Usos y aprovechamientos
11. Medio socioeconómico y cultural

III. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO MINERO

1. Investigación realizada y síntesis del yacimiento.
2. Descripción del método de explotación
3. Diseño de los huecos finales y reservas explotables
4. Planificación de la explotación
5. Escombreras y presas de residuos
6. Infraestructura e instalaciones mineras

IV. EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL PRODUCIDO POR LA EXPLOTACIÓN MINERA

1. Identificación y caracterización de impactos
 - Impactos sobre el suelo
 - Impacto sobre las aguas superficiales y subterráneas
 - Impacto sobre la atmósfera
 - Impactos sobre la vegetación
 - Impactos sobre la fauna
 - Impactos en los procesos ecológicos (cadenas y redes tróficas)
 - Impactos sobre los procesos geofísicos (erosión, sedimentación, inestabilidad, etc.)
 - Impactos sobre el paisaje
 - Impactos en el ámbito sociocultural (valores culturales naturales, caracteres socio-económicos)
2. Evaluación de los efectos previsible

V. MEDIDAS CORRECTORAS

VI. ESTUDIO DE RESTAURACIÓN DEL MEDIO ALTERADO

1. Medidas para la recuperación mediante el uso de la vegetación
 - Remodelado de taludes
 - Retirada, acopio y mantenimiento del horizonte fértil
 - Mejoras edáficas
 - Modelado del paisaje vegetal a desarrollar
 - Selección de especies vegetales y densidad
 - Método y época de ejecución de las plantaciones y siembra
2. Otras medidas complementarias, demoliciones, obras de drenaje, etc.

VII. ESTIMACIONES ECONÓMICAS Y CALENDARIO DE EJECUCIÓN

1. Operaciones principales
2. Mediciones de materiales utilizados. Mano de obra
3. Obras estructurales
4. Precios unitarios
5. Presupuesto de ejecución
6. Calendario de ejecución

VIII. SEGUIMIENTO Y CONTROL

IX. PLANOS Y ANEXOS

A. Memoria

En el primer capítulo se hará una breve presentación del proyecto indicando los objetivos y alcance del mismo. Si la explotación existiera con anterioridad se recogerán algunos datos en el epígrafe de antecedentes, indicando la antigüedad de la misma, el nombre y titular de la concesión, la empresa explotadora, etc.

Seguidamente, se justificará el lugar donde se pretende llevar a cabo, o se realiza, la explotación, efectuándose un análisis comparativo preliminar cuando existan diferentes alternativas de ubicación. Asimismo, se reflejará el nombre del lugar, paraje y municipio, así como una breve descripción de la infraestructura existente: vías de comunicación, líneas eléctricas, etc.

Por último, dentro de este capítulo se hará mención a toda aquella legislación vigente que afecta directa o indirectamente a las actividades objeto del estudio.

En el segundo capítulo se pasará a hacer una descripción detallada de la realidad físico-biológica del medio natural y socioeconómico, ya que constituirá una de las bases de partida del estudio. La primera etapa consistirá en la recogida de información de los elementos o variables que constituyen el medio físico, y la segunda en la valoración de la información recogida. Es necesario expresarla de manera sencilla para que pueda utilizarse posteriormente en los EIA. Por lo general, los principales apartados son:

Geología

Se deberá contemplar el marco geológico en el que se encuentra el depósito de mineral, así como algunos aspectos relacionados con la estructura geológica de la zona, propiedades y composiciones de las formaciones litológicas del recubrimiento y mineral. Determinados análisis químicos deberán aportarse cuando se trate de materiales susceptibles de generar acidez, toxicidad o alcalinidad que puedan producir una contaminación posterior de los suelos.

Hidrogeología

En este epígrafe se comentarán las características hidrogeológicas más sobresalientes del área de explotación, haciendo mención a la existencia o no de recursos hídricos, extensión y localización de los acuíferos, permeabilidad de los materiales a explotar, etc.

Hidrografía

Se reflejarán todos aquellos cauces superficiales y manantiales existentes que puedan verse afectados por la explotación, así como las características principales de las cuencas y redes de drenaje. También se indicarán la calidad y uso de las aguas.

Fisiografía

El entorno del área de trabajo se analizará para definir, básicamente, las formas del relieve, recogiendo aquellos puntos relacionados con la complejidad topográfica, altitudes, desniveles, accesibilidad natural, pendientes, exposición, etc.

Climatología

El clima de un lugar queda definido por la variabilidad a largo plazo de los caracteres que describen el tiempo de dicho lugar. La información básica que se recogerá, procedente de las estaciones pluviométricas más próximas, será: precipitaciones medias anuales y su distribución, precipitaciones máximas diarias previsibles, dirección y velocidad de los vientos dominantes, humedad atmosférica, temperaturas medias mensuales y anuales, valores medios de insolación, evaporación y evapotranspiración, índices de clasificación climática, etc. Algunos de esos datos se representarán en gráficos, tales como los diagramas de balance hídrico, rosas de frecuencias y velocidades de vientos, etc.

Edafología

Se indicarán todas aquellas formaciones edáficas desarrolladas en el área y entorno de la explotación. En la caracterización de los suelos se indicarán algunas propiedades físicas: profundidad, porosidad, textura, estructura, pedregosidad y proporción de afloramientos rocosos, capacidad de retención del agua, etc.; y propiedades químicas: contenido en materia orgánica, pH, disponibilidad de elementos nutritivos, contenidos en sales solubles, etc.

Flora y vegetación

Por un lado, se estudiará la flora elaborando la lista de todos los vegetales de diverso rango taxonómico (especie, subespecie, variedad, etc.), presentes en el área de trabajo y alrededores y, por otro, se realizará el estudio de la vegetación, es decir, de las comunidades vegetales presentes y susceptibles de ser afectadas por las actividades extractivas, así como el análisis de carácter dinámico de ellas: su estado regresivo, evolución previsible, etc. Estos estudios constituyen un importante apoyo para las labores de recuperación de los terrenos mediante la revegetación.

Fauna

Se llevará a cabo un inventario a la escala adecuada de los diferentes animales que vivan en la zona, indicando, a ser posible, la abundancia y rareza de los mismos y las especies o comunidades que se ven afectadas en alguna de sus etapas críticas: cría, desarrollo, desplazamientos, etc.

Paisaje

Se definirán y delimitarán las unidades de paisaje que cubren la totalidad del territorio que rodea a la explotación, pasando a continuación a realizar una evaluación de la calidad del paisaje. Por otro lado, se determinarán las cuencas visuales, o zonas desde las que es visible un punto o conjunto de puntos. Este es un aspecto de gran importancia de cara a minimizar los impactos visuales.

Usos y aprovechamientos

Se indicarán los usos de los terrenos y el aprovechamiento que se hace de los mismos en el momento del estudio: agrícola, ganadero, industrial, urbanístico, etc. Para cada uno se detallará la incidencia de las actividades mineras principales que se realizarán.

Aspectos socioeconómicos y culturales

Para definir el medio socioeconómico se aportará la siguiente información: núcleos de población, monumentos, edificios y viviendas próximas, infraestructura existente, abastecimientos de agua a poblaciones o para cualquier otro uso, zonas de interés público, recreativas, culturales, puntos singulares, etc.

Asimismo, se indicarán los regímenes especiales que existan en la zona e índices económicos y sociales de la misma.

El tercer capítulo de la memoria contendrá una descripción del proyecto de explotación con, al menos, los siguientes apartados.

Investigación realizada

Se hará un resumen de las labores de investigación, incluyendo los datos más significativos obtenidos en las campañas de reconocimiento: sondeos, pocillos, calicatas, diagráfias, etc. y ubicación de las mismas.

Se describirá el yacimiento haciendo referencia al tipo, estructura, forma, etc.

Método de explotación

Se justificará el método aplicado, explicando brevemente en qué consiste y cuál es la secuencia de extracción y el plan de trabajo. Asimismo, se hará un resumen del tipo y número de máquinas necesarias para el conjunto de las operaciones a realizar, los ritmos de producción de estéril y mineral, organización, plantilla, etc.

Diseño de los huecos finales y reservas explotables

En primer lugar se recogerán los criterios que han servido para la delimitación geométrica de la explotación; geotécnicos, operativos y económicos, haciendo especial mención a ángulos de taludes finales, alturas de banco, anchuras de bermas, anchuras de pistas, taludes de trabajo, profundidades máximas, dimensiones de los huecos, ratios medios, etc.

Se aportará un resumen de la evaluación de las reservas explotables y volúmenes de estéril a mover.

Planificación de la explotación

Se describirá cuál es el área de apertura de la explotación y el plan de trabajo a lo largo de la vida de la misma, indicando a ser posible el ritmo en que se van afectando los terrenos al progresar las labores extractivas y confec-

cionando un plano que refleje el aspecto y características fisiográficas del estado postoperacional.

Escombreras y presas de residuos

De igual forma a como se hace con la explotación se hará mención al tipo de vertederos de estériles, justificando su ubicación, capacidad, diseño y método constructivo.

Infraestructura e instalaciones mineras

En este apartado se hará una síntesis de toda la infraestructura de nueva creación para llevar a cabo el proyecto, así como de las instalaciones que se construirán dentro del complejo minero.

El Capítulo IV está dedicado a la Evaluación del Impacto Ambiental, y comprende dos apartados importantes, como son: la identificación y caracterización de las alteraciones que pueden incidir sobre los diferentes elementos o factores ambientales y la evaluación de los efectos previsible. En el Capítulo 5 de este Manual se expone la metodología a seguir para realizar tales trabajos.

Partiendo del conocimiento que se tiene del medio físico, de las actividades a desarrollar y los impactos más significativos que éstas generan, se pasa a elaborar un plan de medidas correctoras. Estas medidas servirán en algunos casos para anular los impactos y en otros sólo para reducirlos o mitigarlos.

A continuación, se pasa al capítulo dedicado al estudio de la recuperación de los terrenos, en el cual se explicarán todas las acciones a llevar a cabo, fundamentalmente las relacionadas con:

- El modelado y conformación de los huecos y escombreras.
- El aprovechamiento de los horizontes fértiles de los suelos.
- El tratamiento y mejora del sustrato.
- La selección de las especies vegetales a implantar.
- La técnica y época de implantación de la vegetación.

Asimismo, se indicarán otras medidas y obras complementarias como son las obras estructurales de drenaje y control de la erosión, la demolición de estructuras o instalaciones antes del abandono, etc.

Finalmente, el Capítulo VII se dedicará al estudio económico, en el que tras definir las operaciones principales, las cantidades de materiales y especies vegetales, las obras a realizar y los precios unitarios, se elaborará el presupuesto de ejecución y el calendario donde se reflejará cómo se van a llevar a cabo los trabajos de restauración y la distribución de los gastos a lo largo del tiempo. Es interesante terminar el estudio económico indicando el coste total de la restauración de la siguiente forma:

- Por hectárea de terreno recuperada (PTA/ha).
- Por tonelada extraída (PTA/t).
- Como porcentaje con respecto al precio de venta de la tonelada de mineral vendible.

B. Planos y anexos

Estos documentos son de vital importancia en un proyecto de estas características. A título meramente orientativo se indican a continuación los tipos de planos y escalas recomendadas que se deben incluir.

- Plano topográfico de situación (1:25.000-1:50.000).
- Plano geológico (1:25.000-1:50.000).
- Plano de concesión.
- Plano geológico de detalle y secciones transversales (1:500 a 1:2000).
- Plano topográfico del diseño final de la explotación y perfiles transversales (1:500 a 1:2000).
- Planos de situaciones finales de restauración y perfiles transversales (1:500 a 1:2000).

A ser posible, los planos deberán tener referencias en las coordenadas UTM, estando normalizados en los formatos de acuerdo con la norma UNE y llevar cajetines en los que se recoja como mínimo:

- Nombre de la empresa propietaria y/o consultora.
- Título del proyecto.
- Título del plano.
- Número de orden del plano.
- Escala.
- Fecha de realización.
- Nombre de las personas que lo han dibujado y revisado, etc.

Podrá adjuntarse otra documentación complementaria como son los planos temáticos, realizados sobre la misma base cartográfica y referidos a: usos de los suelos, re-vegetación, paisaje, socioeconómicos, etc.

Los anexos pueden estar constituidos por estudios de apoyo; hidrogeológicos, geotécnicos, etc., fichas y análisis de suelos, agua, mineral, estériles, etc. Reportajes fotográficos, simulaciones artísticas o con ordenador de situaciones iniciales, parciales y finales, etc.

6.3. Bibliografía básica recomendada

La bibliografía existente en materia de medio ambiente es muy extensa, tal como se pone de manifiesto en las referencias que se recogen al final de cada capítulo de este Manual. No obstante, se relaciona a continuación una serie de publicaciones generales que pueden servir de ayuda para elaborar los proyectos de restauración.

SITUACION GEOGRAFICA

- Mapa Topográfico Nacional (Escala 1:50.000). Instituto Geográfico y Catastral.
- Mapa Militar de España (Escala 1:200.000 y 1:400.000). Servicio Geográfico del Ejército.

GEOLOGIA E HIDROLOGIA

- Mapa Geológico Nacional-MAGNA (Escala 1:50.000). Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Mapa de Rocas Industriales (Escala 1:200.000). Instituto Tecnológico Geominero de España.

CLIMATOLOGIA Y METEOROLOGIA

- Atlas Agroclimático Nacional de España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA).
- Calendario Meteorológico. Instituto Nacional de Meteorología.
- Caracterización Agroclimática (por provincias). MAPA.
- Diagramas Bioclimáticos. MAPA-ICONA.
- Mapa Eólico Nacional. Instituto Nacional de Meteorología.

USOS DEL SUELO Y VEGETACION

- Mapa de Cultivos y Aprovechamiento (Escala 1:200.000) (por provincias).
- Guía de los Arboles y Arbustos de la Península Ibérica e Islas Baleares. INCAFO.

BIBLIOGRAFIA

- FERNANDEZ-ESPINAR, L. C.: «El Conflicto de Intereses entre el Medio Ambiente y el Desarrollo del Sector Económico-Minero». Industria Minera, 1986.
- LOPEZ JIMENO, C.: «La Gestión de Recursos Mineros no Energéticos y el Medio Ambiente». I Curso de Geología Aplicada al Medio Ambiente. IGME, 1988.
- PETER, W. C.: «The Environment of Ore Genesis» Proc. Inst. on Mining Exploration Technology for Lawyers and Landmen, 1980.
- RAMOS, A. (Ed): «Diccionario de la Naturaleza». Espasa Calpe. 1987.
- VILJOEN, D. A.: «Minerals from the Dawn of Mankind to the Twenty-First Century». J.S.A.I.M.M. September 1979.

TIPOS DE EXPLOTACIONES MINERAS

1. INTRODUCCION

Los tipos de explotaciones mineras son tan variados en su concepción y diseño como los yacimientos que se benefician. La elección del método a aplicar depende de numerosos factores tales como: la profundidad, la forma e inclinación del depósito, la distribución de leyes del mineral, las características geomecánicas de las rocas encajantes y del propio mineral, los costes de explotación, etc.

La incidencia de las minas en el medio-ambiente es muy distinta según se trate de explotaciones subterráneas o a cielo abierto, ya que en este último caso la superficie de los terrenos afectados es bastante mayor que en el primero, como consecuencia de los taludes tendidos de los huecos excavados y de la necesidad de disponer de terrenos para almacenar todos los materiales estériles. También influyen las características del mineral que se explota, pues, por ejemplo, a los productos de cantera, una vez extraídos, sólo se les somete a una preparación mecánica y el volumen de residuos es nulo o muy pequeño, mientras que los minerales metálicos y algunos minerales industriales pueden tener ya en el yacimiento una elevada relación estéril/mineral y además es necesario un proceso de concentración que implica, primero, la liberación de las sustancias útiles mediante la trituración y molienda y, después, la separación del material estéril o de baja ley del aprovechable. En este último caso las instalaciones poseen mayores dimensiones y la ocupación de terrenos es más importante.

2. FASES DE DESARROLLO DE UNA EXPLOTACION MINERA

Las principales fases de desarrollo de una explotación minera, tanto subterránea como a cielo abierto, se concretan en:

- Prospección e investigación.
- Evaluación de reservas y diseño de la explotación.
- Desarrollo y puesta en marcha.
- Explotación.
- Abandono.

La prospección geológica tiene como objetivo la localización de anomalías debidas a depósitos minerales, mientras que la investigación tiene como finalidad definir tales indicios y evaluar los recursos y las reservas que albergan los yacimientos. Las técnicas que se utilizan en la prospección, tanto geofísicas como geoquímicas, no suponen, generalmente, un impacto sobre el medio ambiente. Sin embargo, los trabajos de investigación conllevan una serie de alteraciones sobre el territorio en el que se realizan, pues es habitual la apertura de accesos para llegar a los puntos donde se van a realizar las pequeñas excavaciones o calicatas, o los sondeos de investigación. En el primer caso, después de la toma de datos se debe proceder a tapar los huecos creados y, en el segundo, a tomar las debidas precauciones para evitar la contaminación de los suelos por el vertido incontrolado de lodos u otros materiales y efectuar el sellado de las perforaciones realizadas. La superficie ocupada por los accesos se debe recuperar, especialmente en aquellos lugares montañosos en los que es preciso un gran desarrollo de pistas y las condiciones climatológicas pueden incidir negativamente sobre los terrenos que no dispongan de la cubierta vegetal protectora.

Tras la adquisición de datos en campo, geológicos, geotécnicos, etc. se efectúan los estudios de viabilidad oportunos que permiten definir todo el conjunto de parámetros técnicos, económicos y financieros para tomar la decisión de desarrollo del proyecto. Una etapa básica es la constituida por la modelización de los yacimientos sobre la que se realizan la evaluación de los recursos geológicos y el diseño de las explotaciones, para determinar después el volumen de las reservas recuperables. El mencionado diseño tendrá en cuenta no sólo criterios técnicos, operativos, geotécnicos, etc., sino también medio ambientales, encaminados a facilitar el inicio de las labores de restauración en el menor tiempo y coste posible, y ayudar a mitigar el impacto visual. El Proyecto de Explotación y el de Restauración se recomienda que se lleven a cabo de manera simultánea, coordinando esfuerzos, parámetros y pautas de actuación, ya que al final, ello se traducirá en unos resultados más eficaces y más rentables.

También es preceptivo en estos momentos realizar la Evaluación de Impacto Ambiental, de acuerdo con la legislación vigente (Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio).

Después de efectuar todos los estudios de ingeniería básica y de detalle, comienzan los trabajos preparatorios del área donde se ubicarán la mina y las instalaciones. Desde esos instantes podrá cumplirse con algunas de las medidas recomendadas en el citado plan de restauración, tales como retirada, acopio y conservación de los suelos de recubrimiento, construcción de pantallas visuales con esos suelos o materiales estériles, plantación de especies vegetales de rápido desarrollo y gran porte para la ocultación de la explotación, recogida de semillas de especies autóctonas, preparación de parcelas para utilización como viveros y lugares de experimentación, etc.

Entre las obras de infraestructura caben destacar aquellas dirigidas al control de las aguas superficiales. Estas son muy importantes, ya que, por un lado, impedirán la entrada de agua a las explotaciones y futuros depósitos de estériles y, por otro, se evitará su contaminación física y química.

Tanto en el emplazamiento como en el diseño de las instalaciones se habrán tenido en cuenta aquellos factores encaminados a la reducción de la intrusión visual en el entorno de la futura explotación, a partir del análisis de los elementos del paisaje.

Durante el período de producción o de actividad de la mina o cantera, se observarán todas las medidas correctoras dirigidas a anular o reducir las principales alteraciones temporales, siendo muy recomendable, si el tipo de explotación lo permite, alcanzar la situación final en algunas áreas y efectuar los primeros trabajos de recuperación de los terrenos. Esta manera de proceder permite mejorar la imagen de las empresas explotadoras, demostrando una sensibilidad y concienciación por la conservación del medio ambiente, y al mismo tiempo corregir, ampliar o modificar las actividades contempladas en los planes de restauración, a tenor de los resultados que se vayan obteniendo. No existen fórmulas o recetas únicas en este campo, por lo que es necesario proceder con una metodología iterativa basada en la técnica de los ensayos y análisis de los fracasos.

Tras finalizar la vida productiva de las explotaciones se pondrá en marcha el plan de abandono y clausura de las mismas. Este plan incluirá desde el desmantelamiento y demolición de aquellas instalaciones que no vayan a cumplir ninguna función y puedan suponer una alteración o llegar a provocar accidentes, hasta el acondicionamiento de los huecos excavados y depósitos de estériles, con vistas a eliminar posibles fuentes de contaminación de las aguas, riesgos de accidentes, etc. En esta etapa final se

realizarán, pues, los últimos trabajos de recuperación al tiempo que se inician las labores de seguimiento y control propias de la fase post-operacional.

3. TIPOS DE EXPLOTACIONES A CIELO ABIERTO

Las explotaciones mineras pueden clasificarse genéricamente en dos grandes grupos: subterráneas y a cielo abierto. Existen casos intermedios en los que se combinan o coexisten técnicas propias de cada uno de los grupos. También cabe mencionar la minería marina que de manera incipiente empieza a realizarse en algunos países y que en las próximas décadas se extenderá su aplicación, con unos impactos sobre el medio ambiente distintos a los que se tratan en esta obra.

Desde el punto de vista de la restauración de terrenos, las labores que conllevan una mayor alteración son las relacionadas con la minería de superficie, pues son las que dan lugar, por lo general, a grandes huecos excavados o cicatrices en el terreno y a importantes depósitos de estériles. No obstante, las actividades subterráneas presentan una problemática algo similar, pues también es preciso disponer de obras de infraestructura, instalaciones mineras y mineralúrgicas, depósitos de estériles, etc. Los cambios morfológicos no son tan acusados, pero los terrenos bajo los que yacen las labores de explotación sí pueden verse afectados como consecuencia de los hundimientos de los huecos o cavidades de interior.

Por otro lado, es interesante ver la estructura del sector minero en España, pues la problemática de las explotaciones de cada subsector es muy distinta. En la Tabla 2.1 se resumen los principales datos correspondientes al año 1986.

De su análisis se deduce la atomización del subsector de los productos de cantera, con una plantilla media muy reducida, lo que se traduce, en la mayoría de los casos, en explotaciones muy poco tecnificadas y con escasa capacidad económica para abordar los proyectos adecuadamente. Es por ello, por lo que en dicho subsector se deben invertir la mayor parte de los esfuerzos, de los estudios e investigaciones para la recuperación de los terrenos.

En lo que sigue, se describen someramente los métodos de explotación que más frecuentemente se utilizan en la minería de superficie, destacando algunas particularidades y aspectos de interés.

TABLA 2.1

	MINERIA ENERGETICA	MINERIA METALICA	MINERIA NO METALICA	PRODUCTOS DE CANTERA	TOTAL
Número de explotaciones	253	56	256	2.983	3.508
Empleo	52.166	7.767	6.414	14.416	80.763
Número de trabajadores/explotación	206	139	25	5	23
Valor de la producción (MPTA.)	205.200	53.000	45.100	55.400	358.700

3.1. Cortas

En yacimientos masivos o de capas inclinadas la explotación se lleva a cabo tridimensionalmente por banqueo descendente, con secciones transversales en forma troncocónica. Este método es el tradicional de la minería metálica y se adaptó, en las últimas décadas a los yacimientos de carbón, introduciendo algunas modificaciones.

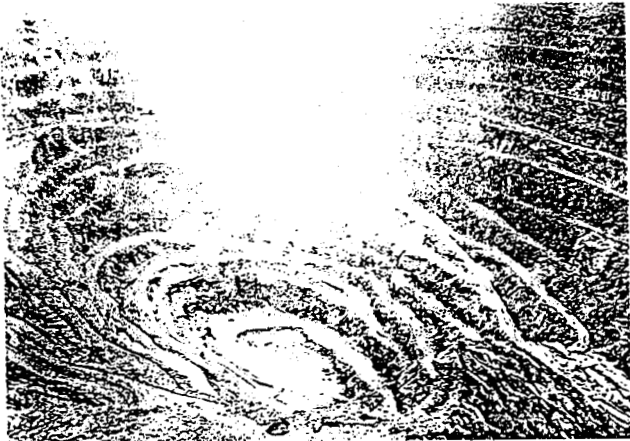


Foto 2.1. Mina metálica. Corta Atalaya (Riotinto-Huelva).

La profundidad de estas explotaciones suele ser grande, llegándose en algunos casos a superar los 300 m. Salvo en los yacimientos con una gran corrida, como sucede

con los de carbón, las posibilidades de relleno del hueco con los propios estériles son escasas. Es siempre necesario crear depósitos exteriores para albergar esos desechos. Las estructuras típicas son: las escombreras para los materiales gruesos que se extraen de las minas para descubrir el mineral, y las balsas o presas para almacenar los residuos procedentes de las plantas de concentración.

Las minas metálicas se caracterizan, pues, por el importante cambio de formas y volúmenes en el paisaje, debido a la excavación de grandes huecos y a la creación de estructuras para almacenar a todos los materiales de desecho que se producen. Por otro lado, como los procesos mineralúrgicos suelen ser más complejos, se precisan instalaciones de dimensiones apreciables, en las que se llevan a cabo la trituración, molienda y concentración de los metales que se benefician. Además se dispone de otra serie de obras e instalaciones auxiliares, tanto para el servicio de la planta como de la propia mina. Entre ellas caben destacar las presas de agua que se necesitan para el funcionamiento de las plantas de tratamiento, pues aunque se proceda a la recirculación de una gran parte de ese recurso siempre se precisa contar con un cierto aporte de agua fresca.

La vida de las minas metálicas suele ser grande, por lo general superior a los 15 o 20 años, existiendo algunas explotaciones dentro del territorio nacional que se están trabajando desde hace siglos.

En cuanto a las cortas de carbón, cuya apertura tuvo lugar, en la mayoría de los casos, a mediados de los años 70, suele ser viable la transferencia de los estériles a los

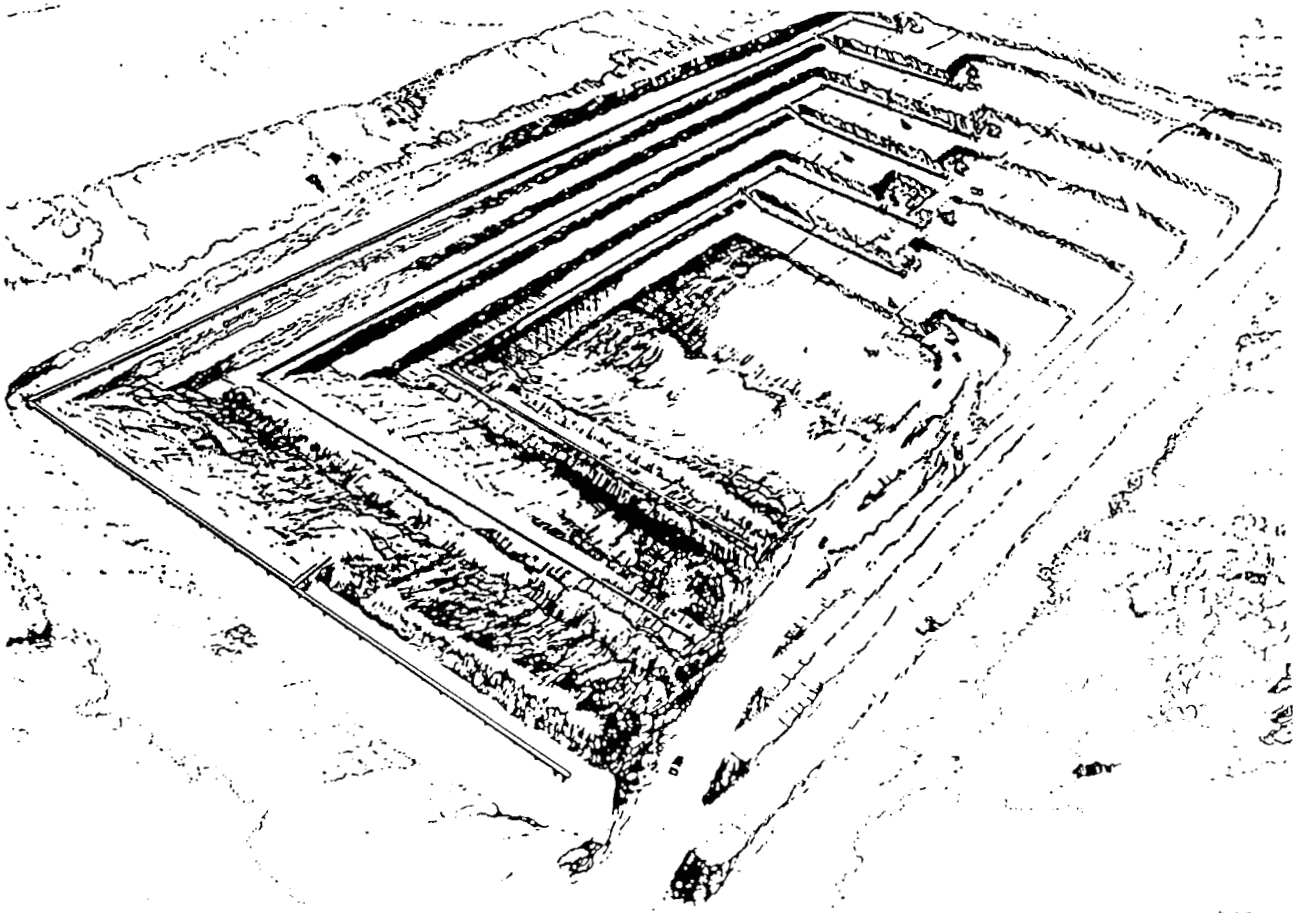


Figura 2.1. Corta de carbón. (Leroy, D., 1979)

huecos creados, pues los yacimientos son, como ya se ha indicado, alargados y, una vez alcanzada la fase de hueco inicial en un extremo del depósito, es factible efectuar el autorrelleno. Las escombreras exteriores de estériles que se crean sólo proceden de los materiales del hueco inicial, por lo que en estas explotaciones las posibilidades de recuperación son más amplias al ser las modificaciones fisiográficas menos importantes que si fuera preciso abandonar grandes huecos y depósitos de estériles.

El autorrelleno de los huecos no sólo es conveniente desde la óptica medio ambiental, sino que operativamente es ventajoso al reducirse las distancias de transporte.

Se precisa, pues, cubrir inicialmente con unos criterios múltiples las etapas de diseño y planificación de las explotaciones.

Un fenómeno que puede ser común a las minas metálicas y a las de carbón es el constituido por la producción de aguas ácidas, como consecuencia de la oxidación de la pirita presente en el mineral, e incluso en los estériles. Medidas especiales se deben tomar antes del vertido de los efluentes a los cauces públicos, y en la ubicación y abandono de los estériles que sean contaminantes. También es aconsejable, en la etapa de revegetación, contem-

plar la posible incidencia que pueden tener los suelos con un pH excesivamente bajo sobre la implantación y desarrollo de las diferentes especies vegetales.

Las experiencias de recuperación de terrenos afectados por minas de carbón en España son numerosas y los resultados positivos, habiéndose demostrado que el coste de tales labores es insignificante comparado con el valor de la riqueza generada por las propias actividades extractivas.

En algunas minas, además de la propia revegetación de los terrenos con fines ecológicos, se está consiguiendo un uso posterior de los suelos con un aprovechamiento agrícola y forestal aceptable, habiéndose incluso recuperado antiguos manantiales y surgencias de agua.

3.2. Descubiertas

Estos métodos se aplican en yacimientos tumbados u horizontales con unos recubrimientos de estéril inferiores, por lo general, a los 50 m. Consisten en el avance unidireccional de un módulo con un solo banco desde el que

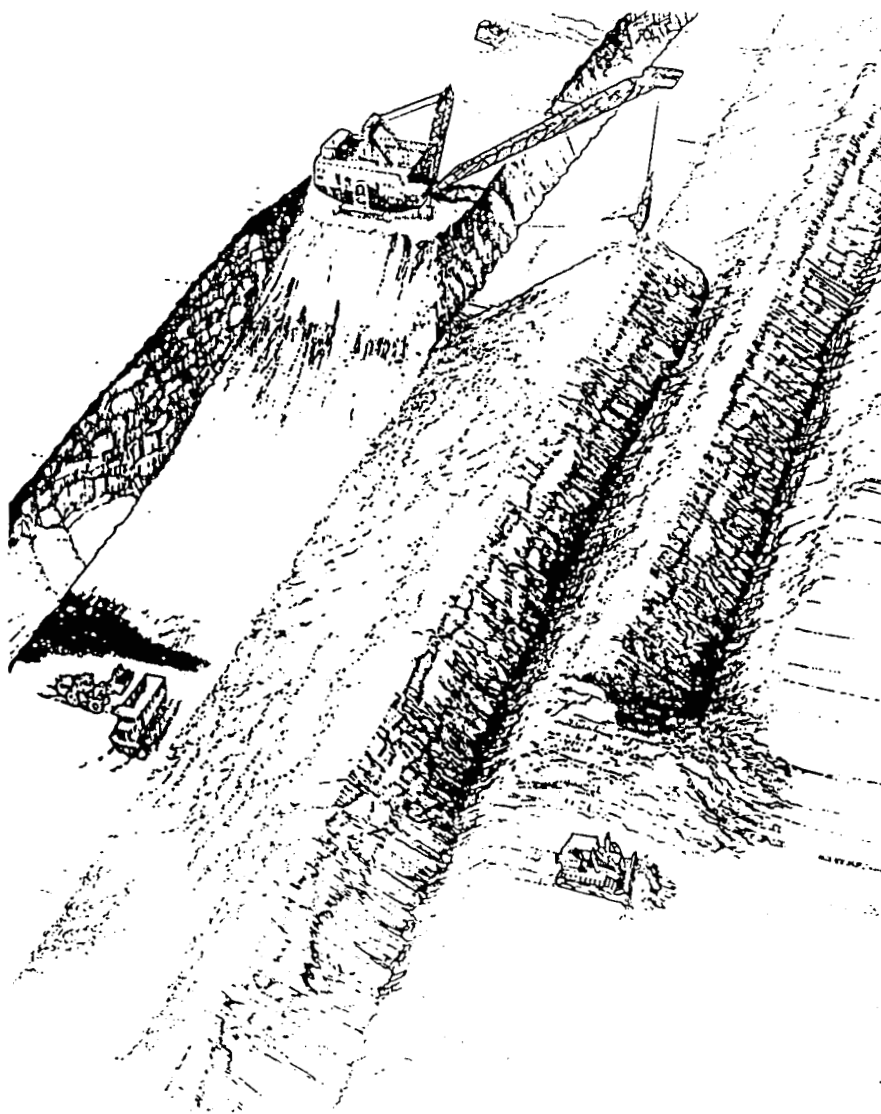


Figura 2.2. Descubierta de carbón. (Leroy, D., 1979)

se efectúa el arranque del estéril y vertido de éste al hueco de las fases anteriores; el mineral es entonces extraído desde el fondo de la explotación que coincide con el muro del depósito.

Después de efectuar la excavación del primer módulo o hueco inicial, el estéril de los siguientes es vertido en el propio hueco de las fases anteriores, de ahí que sea por naturaleza el más representativo de los métodos de transferencia.

La maquinaria que se utiliza depende del volumen de las reservas extraíbles, siendo en las grandes minas de aplicación frecuente las dragalinas, y en las pequeñas, si no se justifican las fuertes inversiones en maquinaria, los equipos convencionales como son los tractores de orugas, excavadoras hidráulicas, palas cargadoras, etc.

La recuperación de los terrenos cuando es posible aplicar estos métodos resulta sencilla, pues el remodelado se suele traducir en una simple nivelación de los materiales superficiales y extendido de la tierra vegetal que progresivamente se retira de los módulos que se preparan para su explotación.

En muchas minas se ha conseguido una revalorización de los terrenos, al disponer de extensas áreas en las cuales pueden llevarse a cabo aprovechamientos agrícolas con un alto grado de mecanización de las labores.

3.3. Terrazas

Este método se basa en una minería de banqueo con avance unidireccional. Se aplica en yacimientos relativa-

mente horizontales, de uno o varios niveles mineralizados, y con recubrimientos potentes pero que permiten depositar el estéril en el hueco creado, transportándolo alrededor de la explotación.

Aunque puede ser extensivo a todos los tipos de mineral, los ejemplos más representativos se encuentran en depósitos de carbón, como es el caso de Puertollano en España.

Las profundidades que se alcanzan son importantes, existiendo casi exclusivamente una limitación de tipo económico en la determinación de cual es el último nivel mineralizado que se explotará. Al igual que sucede con los métodos de descubierta, y tal como se ha indicado, se efectúa un autorrelleno del hueco creado, por lo que desde el punto de vista de la restauración de los terrenos las posibilidades de actuación son grandes. Suele existir igualmente un vertedero exterior próximo al área de apertura de la mina.

En algunas explotaciones alemanas de lignito pardo, los huecos finales, que son precisos dejar tras la extracción, se preparan y proyectan como lagos o grandes estanques en los que se desarrollan todo tipo de actividades deportivas y recreativas, al mismo tiempo que se recuperan los propios ecosistemas.

Los equipos y sistemas mineros que se utilizan son muy variados, desde los totalmente discontinuos con equipos convencionales, hasta los continuos con transporte con cintas y trituración dentro de la explotación, que poseen un alto grado de electrificación.

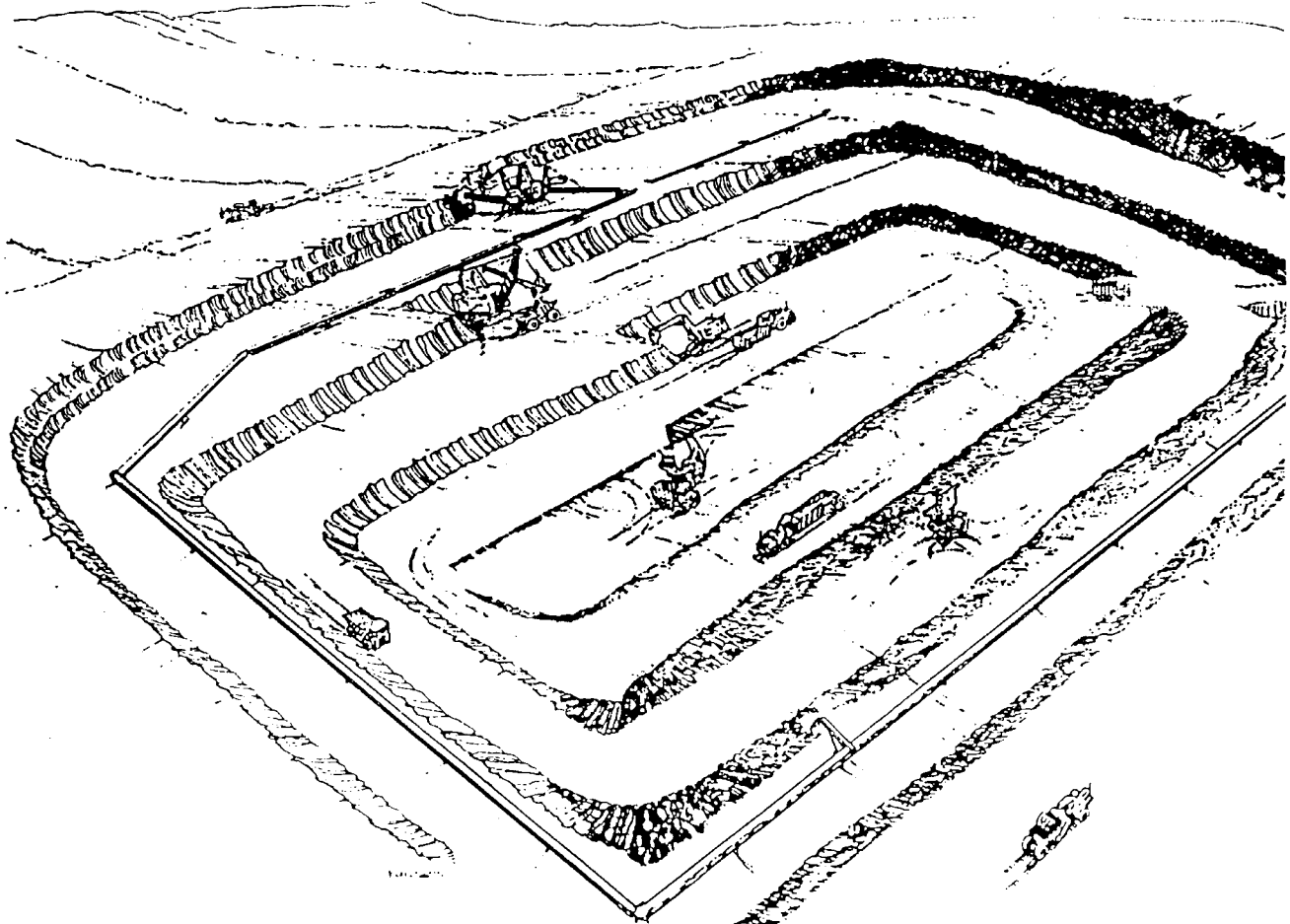


Figura 2.3. Explotación por el método de terrazas. (Leroy, D., 1979)

3.4. Contorno

En yacimientos de carbón con capas tumbadas de reducida potencia y topografía generalmente desfavorable, se aplica el método conocido por minería de contorno.

Consiste en la excavación del estéril y mineral en sentido transversal hasta alcanzar el límite económico, dejando un talud de banco único, y progresión longitudinal siguiendo el citado afloramiento. Dado el gran desarrollo de estas explotaciones y la escasa profundidad de los huecos, es posible realizar una transferencia de los estériles para la posterior recuperación de los terrenos.

La maquinaria que se utiliza suele ser del tipo convencional.

El relleno de los huecos puede efectuarse una vez que se haya alcanzado una situación que permita el vertido dentro de la explotación. Para garantizar la estabilidad de los materiales, se aconseja que el vertido de éstos se lleve a cabo de forma selectiva colocando los tamaños más gruesos en la base para que actúen como drenes. Al mismo tiempo, se adoptarán medidas encaminadas al aislamiento de materiales contaminantes con el fin de reducir al máximo la producción de aguas ácidas durante la explotación y después de finalizar ésta.

3.5. Canteras

Canteras es el término genérico que se utiliza para referirse a las explotaciones de rocas industriales y ornamentales. Constituyen, con mucho, el sector más importante en cuanto a número, ya que desde muy antiguo se han venido explotando para la extracción y abastecimiento de materias primas con uso final en la construcción, en las áreas próximas a núcleos habitados, y en obras de infraestructura en las más alejadas.

Debido al valor relativamente pequeño que tienen los materiales extraídos, las canteras se sitúan muy cercanas a los centros de consumo y poseen unas dimensiones muy reducidas. El método de explotación aplicado suele ser el de banqueo, con uno o varios niveles, situándose un gran número de canteras a media ladera.

Las canteras pueden subdividirse en dos grandes grupos: el primero, donde se desea obtener un todo-uno fragmentado apto para alimentar a las plantas de tratamiento y obtener un producto destinado a la construcción en forma de áridos, a la fabricación de cementos, etc.; y el segundo, dedicado a la explotación cuidadosa de grandes bloques paralelepípedicos, que posteriormente se cortan y elaboran. Estas últimas canteras se caracterizan por el

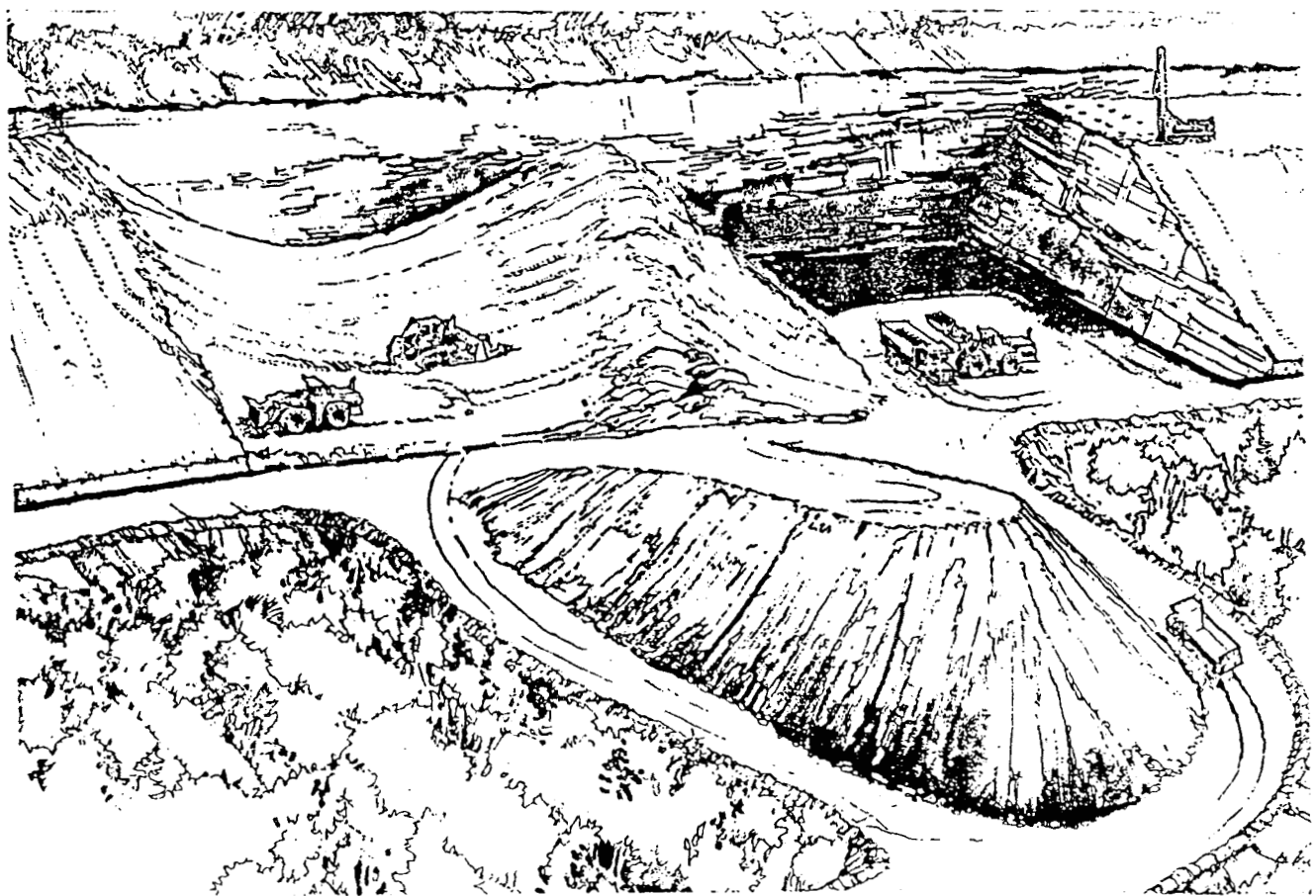


Figura 2.4. Minería de contorno. (Leroy, D., 1979)

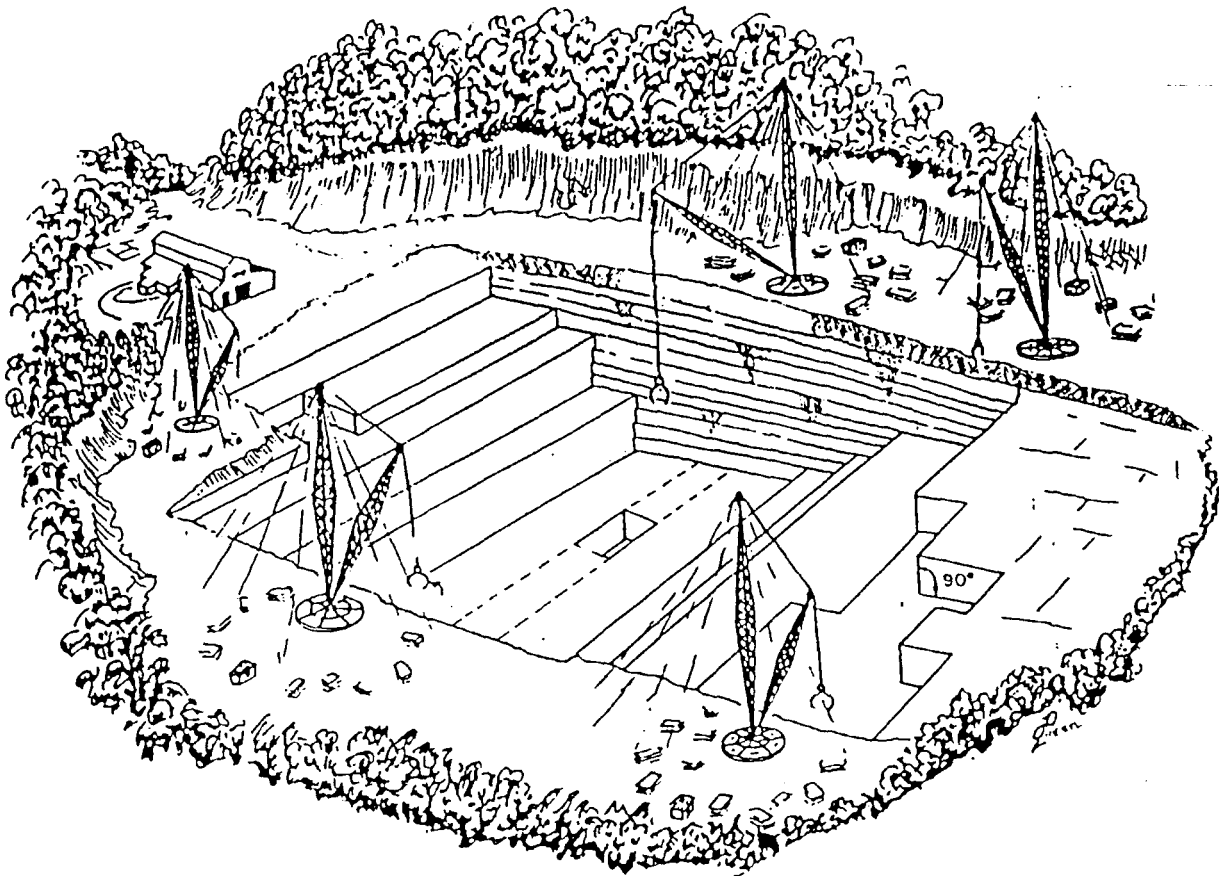


Figura. 2.5. *Cantera de roca ornamental.*

gran número de bancos que se abren para arrancar los bloques y la maquinaria especial con la que se obtienen planos de corte limpios. En claro contraste con estas canteras se encuentran las primeras, en las que la extracción no suele ser tan cuidadosa y son frecuentes los problemas de inestabilidad y desprendimientos, propiciados en buena parte por las grandes alturas de banco con las que se trabaja.

Este tipo de canteras no tiene una fácil recuperación, ya que, por un lado, casi no se dispone de materiales estériles para el relleno de los huecos y, por otro, las labores de remodelado, si no se han contemplado desde la fase de proyecto, son difíciles y costosas de llevar a cabo.

En lo referente a las alteraciones, tal vez la más importante sea la constituida por el impacto visual y modificación del paisaje, pues muy raramente se ha estudiado la ubicación de las canteras en zonas de mínima visibilidad. Esto último es totalmente viable, debido a la gran abundancia de recursos geológicos que existe de esos materiales.

La recuperación dependerá de las características del lugar y de los objetivos medio-ambientales y usos que se prevean para dichos terrenos. En algunos casos, las medidas pasan por la ocultación de los frentes, eligiendo los lugares adecuados, y el empleo de pantallas visuales y el tratamiento de los taludes finales para garantizar su estabilidad e implantación de la vegetación.

Debido a la escasez de materiales de desecho es preciso proceder con sumo cuidado en lo relativo a la retira-

da y acopio de la tierra vegetal, que por lo común es escasa.

El resto de los impactos producidos por este tipo de minería son los que habitualmente se presentan en la explotación de rocas competentes, con maquinaria móvil de dimensiones medias a grandes, e instalaciones de preparación mecánica de los materiales extraídos. Es pues habitual la generación de polvo, ruido, vibraciones, etc.

3.6. Graveras

Los materiales detríticos, como las arenas y las gravas, albergados en los depósitos de valle y terrazas de los ríos son objeto de una explotación intensa debido a la demanda de dichos materiales por el sector de la construcción.

Las arenas y los cantos rodados se encuentran poco cohesionados, por lo que las labores de arranque se efectúan directamente por equipos mecánicos. Las explotaciones suelen llevarse a cabo en un solo banco con una profundidad inferior, por lo general, a los 20 m.

Cuando las formaciones se encuentran en niveles altos se utilizan equipos convencionales, como son las palas de ruedas y los volquetes. Pero es frecuente que los materiales se presenten en contacto con el subalveo o con los acuíferos intrayacentes, empleándose entonces otros equipos mineros como son las dragas, las dragalinas o las raspas, dando lugar a la posterior formación de lagunas.

Los terrenos ocupados son, por lo general, bastante ricos, con usos agrícolas de vega o de ribera. Los huecos

de explotación cuando se abandonan como zonas inundadas y estancadas, sin aplicar medidas correctoras, dan lugar a un aumento de contaminación y eutrofización de las aguas, máxime teniendo en cuenta que dichas lagunas se convierten en un gran número de casos en vertederos incontrolados.

Las depresiones creadas en estas zonas húmedas, donde es bastante probable que permanezcan inundadas, presentan unas grandes posibilidades de recuperación. Además de poderse rellenar y remodelar los huecos con materiales y estériles inertes, es factible convertir esas zonas en parajes más o menos naturales o silvestres con fines ecológicos o en áreas con usos recreativos con instalaciones deportivas y de ocio. En cualquier caso, es preciso garantizar la calidad de las aguas y la mejor medida consistirá en acondicionar las explotaciones de manera que exista una circulación y drenaje del agua en aquellas zonas inundadas para que, estando debidamente oxigenadas, se permita la vida acuática. Especial cuidado se prestará a la modificación de la red de drenaje superficial y control de la erosión, ya que de lo contrario se producirá un enturbiamiento de las aguas por el arrastre de materiales con una posible incidencia sobre la fauna piscícola.

Por otro lado, como los suelos existentes sobre los terrenos ocupados suelen ser muy fértiles, se deberá contemplar, desde los primeros momentos, las actuaciones para su acopio, conservación y reutilización en las labores de recuperación, toda vez que facilitan la implantación de la vegetación y de la propia fauna que pudiera tenerla como hábitat.

Finalmente, indicar que el resto de las alteraciones temporales que se producen durante los períodos de explotación son de escasa entidad en la mayoría de los casos.



Foto 2.2. Gravera en la margen de un río.

4. ESTABILIZACIÓN DE TALUDES EN ROCA

Los huecos excavados en las explotaciones mineras a cielo abierto que no son susceptibles de rellenarse con los propios estériles, deben quedar en condiciones seguras y estables antes de proceder a cualquier intento de recuperación de los terrenos. Es, por ello, preceptivo que el diseño geométrico de tales labores contemple el correspondiente estudio geotécnico de los taludes para un factor de seguridad preestablecido.

Si a pesar de realizar esos trabajos se ve la necesidad de recurrir a sistemas de estabilización o, como sucede en algunas ocasiones, compensa económicamente su aplicación, se dispone de un amplio abanico de posibilidades que pueden agruparse de la siguiente forma:

- Modificaciones de la geometría
- Drenaje
- Empleo de elementos resistentes
- Corrección superficial.

En la Fig. 2.6 se representan los tipos de rotura más frecuentes en taludes rocosos.

Dado que el tratamiento de este tema se sale del objeto de esta obra, seguidamente se expondrá de forma muy somera en qué consiste cada uno de los sistemas.

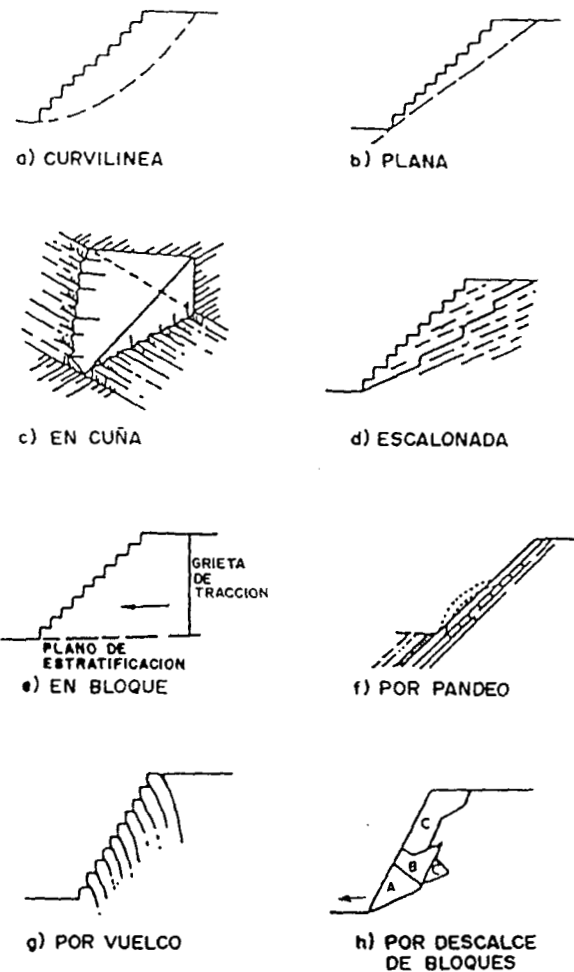


Figura 2.6. Tipos de rotura más frecuentes.

4.1. Modificaciones de la geometría

Se basan en el cambio de la configuración del talud con vistas a disminuir las fuerzas que tienden al movimiento de las masas y a alcanzar una mayor resistencia al corte del terreno. Los procedimientos que se siguen son: la eliminación de las masas inestables, el descabezamiento de los taludes y la construcción de contrafuertes en el pie de los taludes.

4.2. Drenaje

Consiste en eliminar el agua contenida en los macizos rocosos con vistas a reducir las presiones intersticiales que actúan sobre las posibles superficies de rotura, disminuyendo las fuerzas desestabilizadoras y reducir, además, el peso total de la masa rocosa.

En la Fig. 2.7 se representan los principales sistemas de drenaje tanto superficiales como profundos.

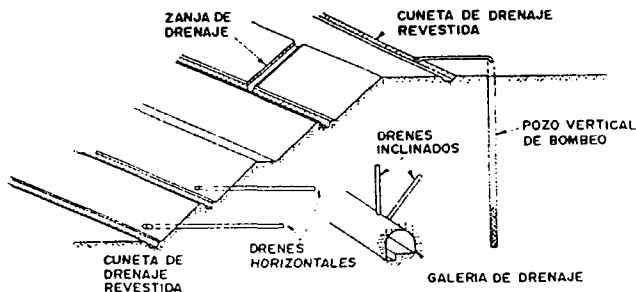


Figura 2.7. Sistemas de drenaje en taludes.

Como innovación dentro de este campo cabe mencionar los sistemas de drenaje de vacío que se aplican en barrenos o drenes horizontales para incrementar los caudales de agua, sobre todo, en rocas de baja permeabilidad (10^{-6} a 10^{-8} cm/s). Su empleo se inició a comienzo de los ochenta en algunas minas canadienses y está solo justificado durante el período de explotación.

4.3. Empleo de elementos resistentes

Los tipos de elementos resistentes permanentes, de uso extensivo en obra pública, pero no tanto en minería de superficie, pueden ser de diferentes tipos: bulones, cables de anclaje y carriles. Según su forma de trabajar se clasifican en: pasivos, activos o mixtos.

Los cables de anclaje constituyen el sistema con más futuro, ya que su actuación se extiende a mayor profundidad que el resto.

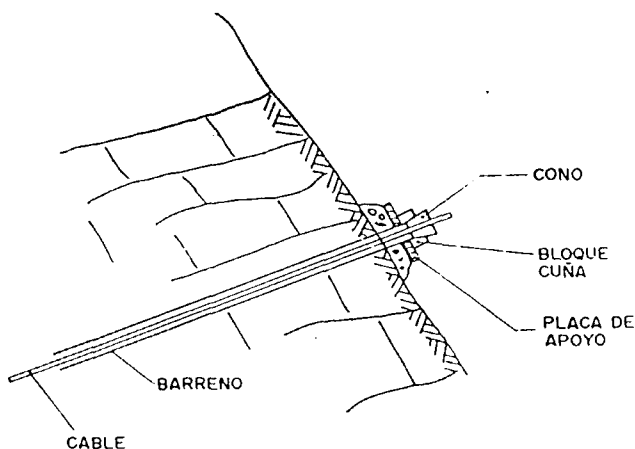


Figura 2.8. Cabeza de un cable de anclaje.

En ocasiones, cuando las masas inestables son pequeñas, ej.: una cuña en un banco, puede recurrirse al empleo de carriles que se introducen en perforaciones que atraviesan dichas masas para introducir en ellas tales elementos y retenerlas.

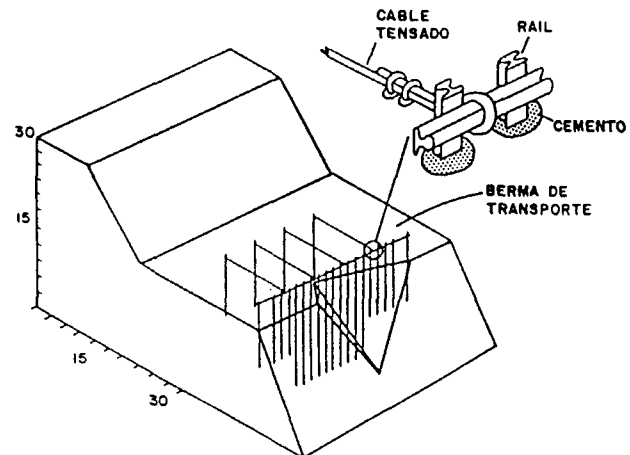


Figura 2.9. Estabilización de una cuña mediante el empleo de carriles y cables de retención.

Los muros de contención, que es otro sistema de estabilización, se tratarán en el capítulo de escombreras.

4.4. Correcciones superficiales

Si el macizo remanente a pesar de ser estable presenta una roca degradada que pueda dar lugar a frecuentes desprendimientos de pequeños fragmentos, puede recurrirse a la utilización de mallas de guiado y proyección de hormigón, aunque este último método imposibilita la siembra y revegetación de los taludes.

Finalmente, indicar que el resto de las alteraciones temporales que se producen durante los periodos de explotación son de escasa entidad en la mayoría de los casos.

BIBLIOGRAFIA

- AYALA, F. J. et al.: «Manual de Taludes». IGME, 1987.
- BRAWNER, C. O. et al.: «Recent Developments in Rock Characterization and Rock Mechanics for Surface Mining». Hardy Associates Ltd, 1987.
- LEROY, D.: «Present and Future Surface Coal Extraction Technologies in the United States. Proceedings of the Second U.S.-Polish Symposium Coal Surface Mining and Power Production in the Face of Environmental Protection Requirements». EPA, 1979.
- LOPEZ JIMENO, C.: «La Minería del Carbón a Cielo Abierto». Curso sobre Rehabilitación y Restauración de la Minería del Carbón. ETSI de Minas de Oviedo, 1988.
- MANGLANO ALONSO, S.: «Criterios de Diseño de Canteras y Minas a Cielo Abierto». I Seminario sobre la Restauración de Canteras y Minas a Cielo Abierto. Fundación Gómez Pardo. Madrid, 1988.
- MINER: «Panorama Minero-1986», 1988.

ESCOMBRERAS

1. INTRODUCCION

Las actividades mineras producen, tanto si son superficiales como subterráneas, una gran cantidad de materiales de desecho que plantean el problema de su almacenamiento en condiciones adecuadas de estabilidad, seguridad e integración en el entorno.

Las rocas estériles procedentes de la cobertera en las operaciones a cielo abierto o de las labores de preparación en las subterráneas se depositan, generalmente, como fragmentos gruesos en montones que constituyen las denominadas escombreras. También se almacenan de la misma manera los rechazos de la plantas de tratamiento y concentración con una granulometría inferior a la de los materiales anteriores, pero sin llegar al rango de las arenas y lodos. Estos últimos residuos se albergan en estructuras semejantes a las presas y por presentar una problemática muy específica, se tratan en capítulo aparte dentro de este manual.

2. FACTORES LOCALES PARA LA UBICACION

2.1. Lugar de emplazamiento

La elección del emplazamiento de una escombrera se debe basar en criterios de diversa naturaleza: técnicos, económicos, ambientales, socioeconómicos, etc.

Entre los criterios específicos más importantes se encuentran la distancia de transporte desde la explotación hasta la escombrera, que afecta al coste total de la operación; la capacidad de almacenamiento necesaria, que viene impuesta por el volumen de estériles a mover; las alteraciones potenciales que pueden producirse sobre el medio natural y las restricciones ecológicas existentes en el área de implantación.

En el pasado, la elección de una alternativa de emplazamiento solía basarse casi exclusivamente en los costes de operación, pero actualmente las consideraciones ambientales han incrementado su importancia pasando en algunos casos a estar por encima de las económicas. En el epígrafe 2.4 se expone un procedimiento de evaluación de alternativas y selección de la óptima.

2.2. Tamaño y forma

El tamaño de las escombreras está marcado por el volumen de estéril que es preciso mover para la extracción del mineral. Tal cantidad de material desechable depende, en las minas a cielo abierto, no sólo de la estructura geológica del yacimiento y de la topografía del área, sino del valor económico del mineral y de los costes de extracción del estéril. Los ratios o relaciones entre la roca estéril y el mineral, expresados en m^3/t ó t/t , son en la mayoría de las explotaciones de sustancias metálicas y energéticas muy superiores a la unidad.

Según sea la implantación de la escombrera con respecto a la explotación éstas se clasifican en interiores, si los estériles se depositan dentro de los propios huecos excavados tras la apertura de un hueco inicial, Fig. 3.1, y exteriores, cuando la morfología del yacimiento y su consiguiente explotación no permiten el relleno del hueco creado en las primeras fases de la mina.

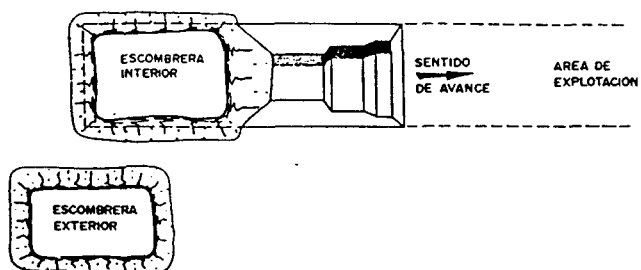


Figura. 3.1. Implantaciones de escombreras con relación al hueco de explotación.

Atendiendo a las formas naturales del terreno, los tipos de escombreras más frecuentes son los que se reflejan en la Fig. 3.2.

Es posible que en una misma área coexistan combinaciones diversas de esas estructuras, en función de la extensión que ocupe el emplazamiento. Asimismo, la forma de las escombreras depende no sólo de la morfología del terreno, sino incluso de los equipos mineros de transporte y vertido. Antiguamente, era habitual el transporte con fu-

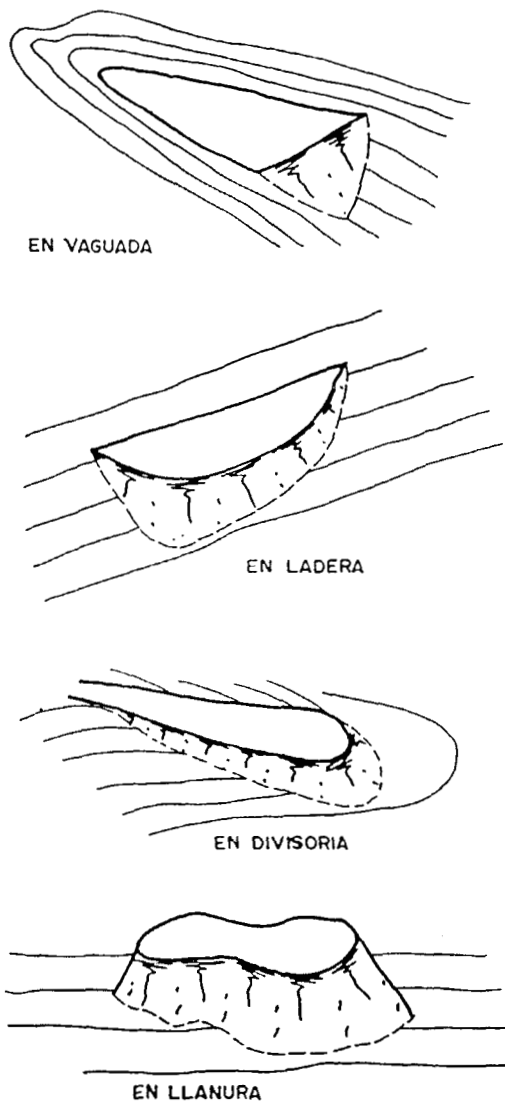


Figura 3.2. Tipos de escombreras exteriores.

niculares y vagonetas con los que se originaban estructuras con formas cónicas y troncocónicas, en la actualidad los sistemas más empleados utilizan volquetes o cintas transportadoras que facilitan el extendido y compactación sistemática y se adaptan de manera más fácil al diseño final de formas del proyecto.

2.3. Geología y capacidad portante

Sobre el lugar de asentamiento de una escombrera es preciso efectuar una investigación de campo que corrobore, por un lado, la no existencia de mineral en el subsuelo, que pudiera ser potencialmente explotable, y, por otro, permitir obtener muestras e información sobre las características geotécnicas de los materiales que constituirán la base del depósito.

En una primera etapa se realizará un reconocimiento de visu para identificar los afloramientos rocosos, la cubierta vegetal, los tipos de suelos, surgencias de agua, áreas de baja permeabilidad, vestigios de hundimientos mineros, discontinuidades estructurales, etc. Toda la información se reflejará en un plano a escala conveniente.

En la segunda etapa se efectuarán sondeos y calicatas, que servirán para conseguir información geológica del subsuelo y para obtener muestras para la realización de ensayos «in situ» o en laboratorio. Los sondeos se deben realizar para el reconocimiento en profundidades superiores a los 5 ó 7 m.

Entre los ensayos «in situ» de los suelos caben destacar los de corte, los de deformabilidad y los de permeabilidad, y entre los que se realizan en el laboratorio, los ensayos de propiedades índice, los de compactación, los de permeabilidad, los de consolidación y los de corte.

Dependiendo de las dimensiones de la escombrera y de las limitaciones impuestas por el entorno, el número de ensayos a realizar variará, siendo la investigación más completa conforme el riesgo de daños a bienes materiales o personas aumente.

Como mínimo se necesitan conocer tres parámetros básicos, como son: la cohesión, el ángulo de rozamiento interno y el peso específico aparente (seco y saturado), para estimar si la base de una escombrera puede soportar la sobrecarga que supone el peso de los estériles vertidos o si por el contrario es probable que se produzcan inestabilidades estructurales y movimientos de los materiales de la base que afecten a la estructura que gravita sobre los mismos.

2.4. Método de selección del emplazamiento

Como ya se ha indicado, la elección del área de implantación de una escombrera persigue diversos objetivos, entre los que caben destacar los siguientes:

- Minimizar los costes de transporte y vertido.
- Alcanzar la integración y restauración de la estructura en el entorno.
- Garantizar el drenaje.
- Minimizar el área afectada.
- Evitar la alteración sobre hábitats y especies protegidas, etc.

La técnica de evaluación más empleada en estos proyectos, es por su sencillez, la que se basa en el «Análisis de Decisiones con objetivos múltiples». Este método, de gran aplicación en ingeniería, requiere el empleo y definición de funciones de utilidad multiatributos para la valoración de los diferentes objetivos implicados en la toma de decisiones.

La información necesaria se resume en la Tabla 3.1.

TABLA 3.1

Alternativas Objetivos	a_1	a_2	a_j	a_m	Peso relativo
O_1	P_{11}	P_{21}	P_{j1}	P_{m1}	W_1
O_2	P_{12}	P_{22}	P_{j2}	P_{m2}	W_2
...
O_i	P_{1i}	P_{2i}	P_{ji}	P_{mi}	W_i
...
O_n	P_{1n}	P_{2n}	P_{jn}	P_{mn}	W_n
Utilidad relativa global	$U_1 = \sum_i P_{1i} \cdot W_i$	$U_2 = \sum_i P_{2i} \cdot W_i$	$J_i = \sum_i P_{ji} \cdot W_i$	$U_m = \sum_i P_{mi} \cdot W_i$	

donde:

- A_i = Alternativa de implantación de la escombrera «i».
- O_j = Objetivo «j».
- W_i = Peso relativo de importancia del Objetivo « O_j ».
- P_{ij} = Orden inverso de preferencia de cada alternativa «i» con relación al objetivo «j».
- U_j = Utilidad relativa global de la alternativa.

Ejemplo:

En las proximidades de una mina se dispone de tres alternativas de ubicación de la escombrera que se precisa construir a lo largo de la vida del proyecto. Los objetivos prioritarios que se desean alcanzar son los reflejados en la Tabla 3.II, así como los pesos relativos o factores de ponderación de cada uno de ellos.

TABLA 3.II

ALTERNATIVAS OBJETIVOS	1	2	3	PESO RELATIVO
Costes de transporte y construcción	2	1	3	0,35
Superficie afectada	3	2	2	0,1
Obras de drenaje	2	2	3	0,1
Ocultación a las vistas	2	1	3	0,2
Facilidad de revegetación	2	3	1	0,1
Contaminación de acuíferos	2	1	3	0,15
Utilidad relativa global	2,1	1,40	2,7	

Conforme a los resultados obtenidos la mejor alternativa de implantación es la 3, seguida de la 1 y la 2.

3. CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTERILES DE ESCOMBRERA

Los materiales estériles que forman las escombreras son de litologías distintas y granulometrías variables, por lo que de entrada plantean problemas físicos, e incluso químicos, para la implantación de la vegetación.

Por lo general, predominan los estériles en forma de fragmentos gruesos con una distribución espacial distinta dentro de los depósitos, como consecuencia de la segregación que sufren las partículas al ser depositadas dentro de las escombreras.

Además de la granulometría, otras propiedades físicas que deben considerarse son la densidad, la porosidad y la permeabilidad. Entre las propiedades químicas las más importantes, de cara a la revegetación, son el contenido en metales tóxicos, el contenido en nutrientes, la salinidad, etc. Todo ello se verá con más detalle en el Capítulo 14.

4. CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE LAS ESCOMBRERAS

4.1. Métodos y sistemas constructivos

Los tipos de escombreras que pueden distinguirse de acuerdo con la secuencia constructiva de las mismas, en terrenos con pendiente que es el caso más habitual, son cuatro: con vertido libre, por fases adosadas, con dique de pie y por fases superpuestas.

La formación con vertido libre sólo es aconsejable en escombreras de pequeñas dimensiones y cuando no exista riesgo de rodadura de piedras aguas abajo. Se caracteriza por presentar en cada momento un talud que coincide con el ángulo de reposo de los estériles y una segregación por tamaños muy acusada. De los cuatro tipos es el más desfavorable geotécnicamente, aunque ha sido el más utilizado hasta épocas recientes.

Las escombreras con fases adosadas proporcionan unos factores de seguridad mayores, pues se consiguen unos taludes medios finales más bajos. La altura total puede llegar a suponer una limitación por consideraciones prácticas de acceso a los niveles inferiores.

Cuando los estériles que se van a verter no son homogéneos y presentan diferentes litologías y características geotécnicas, puede ser conveniente el levantamiento de un dique de pie con los materiales más gruesos y resistentes, de manera que actúen de muro de contención del resto de los estériles depositados. Esta secuencia constructiva es la que se suele seguir en aquellas explotaciones donde se extraen grandes cantidades de materiales arcillosos y/o finos, cuya deposición exigiría de otro modo grandes extensiones de terreno y presentaría un elevado riesgo de corrimientos, o cuando las condiciones de la base de apoyo no son buenas.

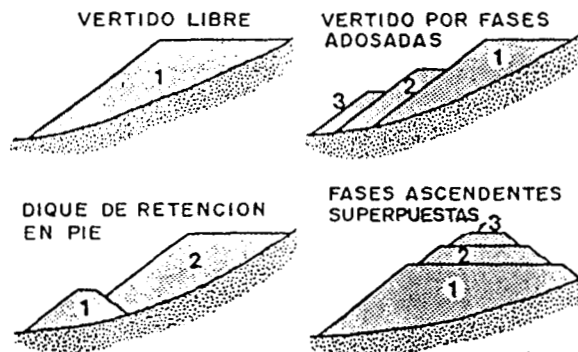


Figura 3.3. Tipos de escombreras según la secuencia de construcción.

El tipo de fases superpuestas y retranqueadas aporta una mayor estabilidad, por cuanto se disminuyen los taludes finales y se consigue una mayor compactación de los materiales.

Así pues, la secuencia constructiva de una escombrera incide directamente sobre la estabilidad de tales estructuras y sobre la economía de la operación, llegando a ser preciso en algunos casos una solución de compromiso entre ambos factores.

El recrecido de una escombrera debe realizarse de la manera más homogénea posible y de ello depende en gran medida la modalidad de vertido que se elija. Normalmente, los estériles se desplazan desde las minas hasta los vertederos por cintas transportadoras o por volquetes, siendo habitual disponer de tractores para el extendido y empuje de esos materiales y acondicionamiento del piso. Fig. 3.4. Estos equipos permiten en el caso de los volquetes operar en unas mayores condiciones de seguridad, ya que estas últimas unidades no tienen que posicionarse al borde de los taludes, y cuando se utilizan cintas disminuyen los alargamientos frecuentes o cambios de lugar de éstas. Al mismo tiempo, se aminora el fenómeno de segregación con respecto al que se produce con el vertido libre.

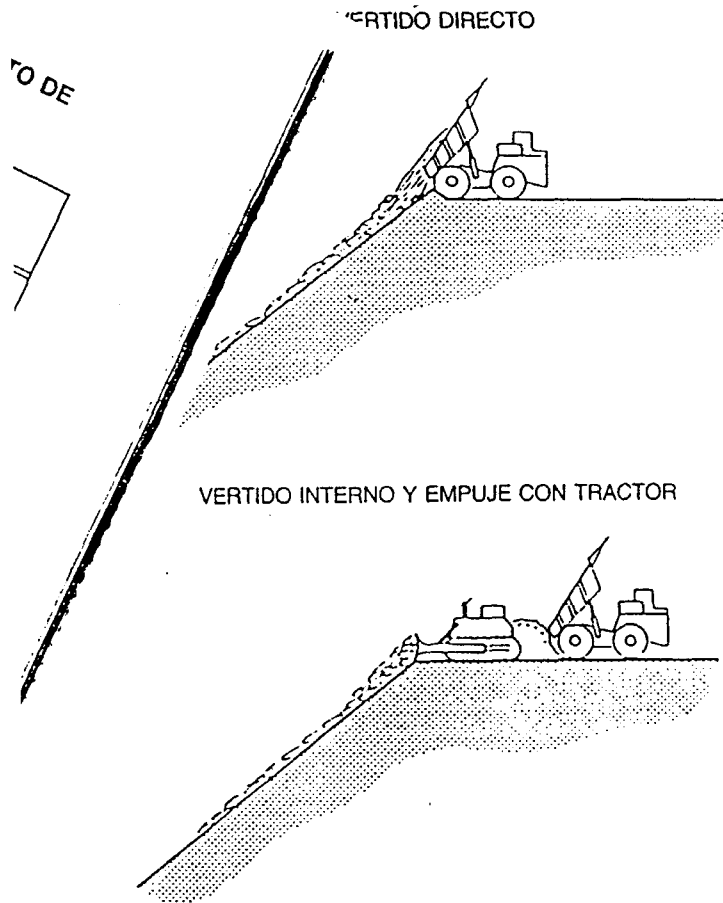


Figura 3.4. Vertido libre con camión y con ayuda de tractor empujador.

En estrecha relación con el procedimiento de vertido se encuentra el método de construcción que puede ser: en avance, por basculamiento final, o en retroceso por tongadas.

Desde el punto de vista de seguridad el segundo método es ventajoso, por cuanto el tráfico de los volquetes ayuda a conseguir una mayor compactación de los materiales mejorando la estabilidad de las estructuras. Se aplica, generalmente, en minas donde la topografía es suave y, sobre todo, en las etapas iniciales en las secciones perimetrales, antes de pasar al basculamiento final si es más económico.

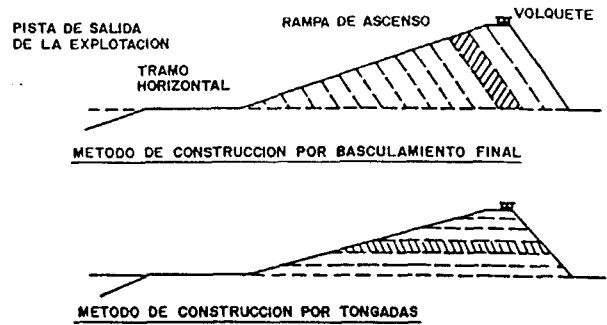


Figura 3.5. Métodos de construcción por basculamiento final y por tongadas.

4.2. Rehabilitación y auscultación de escombreras durante su construcción

La rehabilitación de las escombreras con problemas de inestabilidad es importante no sólo para alcanzar unas condiciones de seguridad adecuadas, sino incluso para reducir los ritmos de vertido que temporalmente deben incrementarse sobre otras áreas. La descarga de estériles se realizará en tales casos a ambos lados de la grieta de rotura, donde la cresta tendrá menor pendiente que en el centro. Cuando esto no sea posible, bien se procede a un retranqueo del punto de descarga de los volquetes o, lo que es más efectivo, a una reducción del ángulo del escarpe mediante la utilización de cargas de explosivo.

En la Fig. 3.6 se representa una sección transversal de un vertedero donde se disponen dos filas de barrenos con las que se consigue reducir la pendiente en la parte alta del mismo y eliminar el riesgo de rotura del borde bajo el peso de los volquetes cargados.

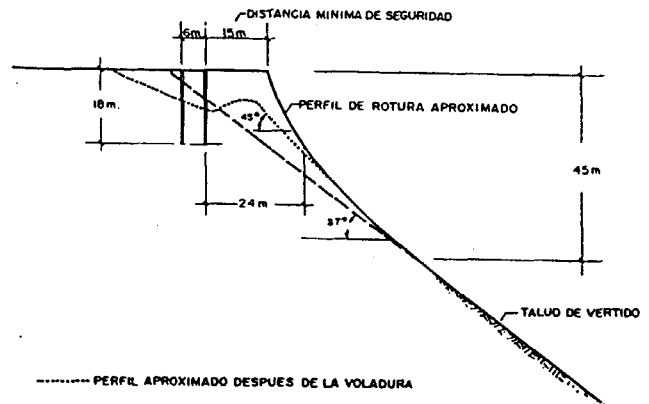


Figura 3.6. Sección vertical de un vertedero mostrando el diseño de la voladura para reducir el ángulo de talud.

La auscultación de una escombrera en operación es necesaria para trabajar en condiciones de seguridad. Tan importante como la auscultación es la inspección visual de las superficies de dichas estructuras con el fin de identificar grietas, escarpes y abombamientos que se forman durante el asentamiento de los estériles.

Las grietas y los escarpes son indicadores de un asentamiento normal de los vertederos y son útiles para estu-

diar la correcta ubicación de la instrumentación, el trazado de las pistas de los volquetes y el control de la infiltración del agua.

En cuanto a los abombamientos, que existen de dos tipos, son indicadores de problemas de inestabilidad. Por un lado están los de cresta, que se forman cerca de la cabeza de las escombreras con unas sobrependientes del frente superiores a los ángulos de reposo del material. Esta elevación de la pendiente es provocada por la mala segregación de los estériles y por la trabazón de los bloques que puede producirse en la parte alta. Aunque en la práctica puede continuarse vertiendo, si la sobrependiente continúa se puede producir un rápido asentamiento eventual que afecte al área de la cresta, y que obligue al cierre temporal de esa zona de descarga. Los abombamientos de pie, que son aquellos que se forman cerca de la base, son indicadores de deformaciones a gran escala. Todas las roturas de escombreras son precedidas de un abombamiento de pie. En cuanto éstos se identifiquen se procederá a un seguimiento cuidadoso del mismo tomando todas las medidas de precaución necesarias.

Los instrumentos de auscultación más utilizados son los extensómetros de cable, Fig. 3.7, que consisten en una simple pica, que se fija sobre el borde del vertedero, a la cual se une un cable inextensible que va apoyado sobre trípodes, cada 10 m como máximo, para evitar el rozamiento con el suelo, y de cuyo extremo opuesto cuelga una masa que se suspende desde una rueda giratoria en la estación de lectura. Esta estación se sitúa a una distancia segura del borde del vertedero y posee una escala con divisiones de 0,5 cm.

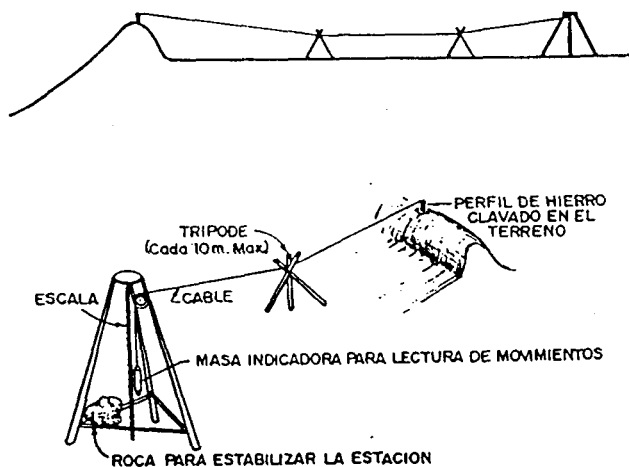


Figura. 3.7. Auscultación de una escombrera.

El espaciamiento entre estos extensómetros no suele exceder de 75 m y al menos se debe disponer de dos por cada vertedero activo. Si se observaran problemas de inestabilidad la distancia mínima para la auscultación se reduciría por debajo de 50 m.

A partir de las lecturas que se obtienen en cada relevo se actúa siguiendo las recomendaciones de la Tabla 3.III.

TABLA 3.III. LIMITES DE ASENTAMIENTO DE VERTEDEROS

VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO	ACCION REQUERIDA
0 - 3 cm/h	— Lectura de extensómetros cada 2 horas.
> 3 cm/h	— Lectura de extensómetros cada hora.
> 5 cm/h	— Cese del vertido.



Foto. 3.1. Construcción de escombrera en avance y vertido por gravedad.

4.3. Normas para garantizar la estabilidad de las escombreras

Existen ciertas normas o recomendaciones encaminadas a mejorar la resistencia de las masas de escombros frente a los deslizamientos, así como a rebajar los niveles de agua dentro de las estructuras.

Independientemente del tipo de escombrera, la primera norma a seguir consiste en la retirada de la vegetación y de los suelos del lugar de asentamiento. La descomposición de esa vegetación al cabo de cierto tiempo y la existencia de una capa de suelo constituyen una zona de rotura probable por la reducida resistencia al corte que presentan. En el caso de no retirar esos materiales superficiales, porque el espesor sea grande o porque sobre ellos se van depositando estériles contaminantes separados mediante una capa de arcilla, se recomienda compactar esos suelos.

Si existe agua estancada en la base de apoyo deberá ser drenada antes de verter los primeros estériles o si esto no es posible rellenar dichas zonas con material de escollera.

En zonas de surgencia de acuíferos se procederá a la captación y drenaje de las mismas con la doble finalidad de evitar el efecto de las presiones intersticiales del agua en las escombreras y conservar las fuentes y manantiales.

Si la surgencia es puntual, la captación se hace mediante una arqueta construida sobre el terreno explanado Fig. 3.8. Desde esta se suele sacar una tubería de PVC de 50 a 75 mm de diámetro y exteriormente un tubo metálico de acero corrugado, flexible y muy resistente, que permite adaptarse a los asentamientos del terreno. Con

este sistema se pueden ir depositando los estériles encima y al mismo tiempo ir acoplando los tubos necesarios durante el avance.

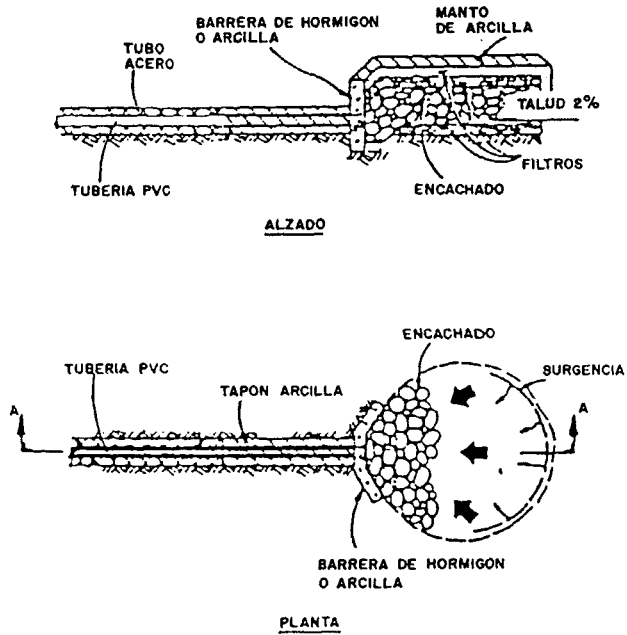


Figura. 3.8. Sistema de captación de un manantial. (Ayala, F.)

Si las surgencias son extensas debe disponerse de una red de zanjas o tubos drenantes conectadas a unos colectores. En la Fig. 3.9 se representa la construcción de una zanja de drenaje del tipo denominado «Francés» que consiste en la colocación en el interior de la misma de material granular protegido por un geotextil o lámina filtrante.

El esquema en planta puede ser como el de la Fig. 3.10, en el que existe una cuneta general en el pie de la escombrera sobre la que se descarga el agua de drenaje a través de unos colectores principales en los que confluyen otros secundarios.

Especial atención hay que prestar a los socavones de minas de montaña abandonados, ya que durante la época de lluvias y deshielos constituyen una fuente de entrada de agua en las masas de estériles que los cubren.

La cuneta general que rodea a las escombreras debe estar situada a unos metros de la base, para evitar el estancamiento del agua y socavación del pie del talud por la acción erosiva de ésta.

También hay que acometer dentro de la preparación del terreno las obras de desvío y canalización de las aguas de escorrentía.

A continuación, y tras conocer la capacidad portante de la superficie de apoyo, se construirán las pistas de acceso desde el área de explotación, y se comenzará a depositar el material de acuerdo con el método elegido:

- Por basculamiento final, o
- Por tongadas.

El primer método, tal como se ha indicado anteriormente, consiste en descargar los estériles desde gran altura Fig. 3.11 consiguiendo las condiciones de drenaje por la segregación natural que sufre el material durante el descenso por

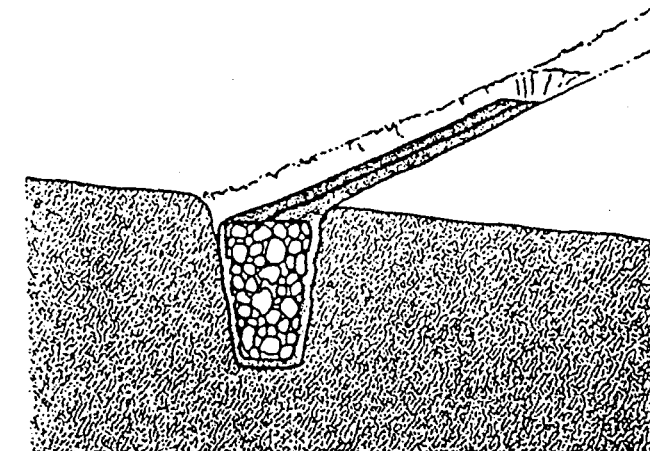
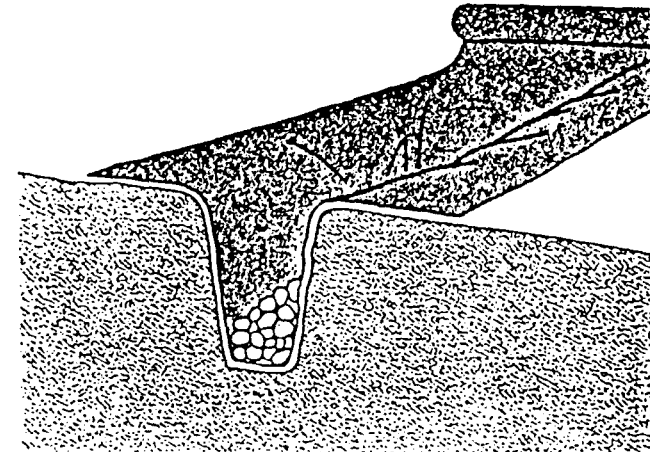
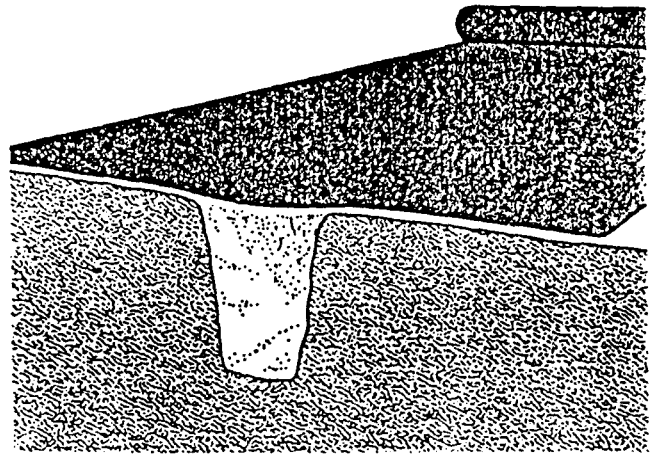


Figura. 3.9. Colocación de geotextil en una zanja de drenaje.

rodadura. Los bloques grandes se encontrarán en el pie del talud, disminuyendo la granulometría en sentido ascendente. Pero desafortunadamente, existen factores que en ciertos casos impiden alcanzar las condiciones de estabilidad deseadas.

1. Con rocas friables o poco resistentes a los choques y rozamientos (tales como pizarras y esquistos) no se produce una segregación clara y suficiente, que permita un correcto drenaje de la masa de material que sustentan.

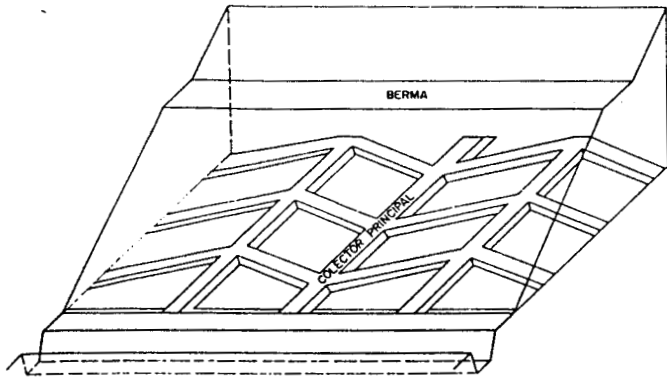


Figura. 3.10. Esquema de la red de zanjas de drenaje en la base de una escombrera.

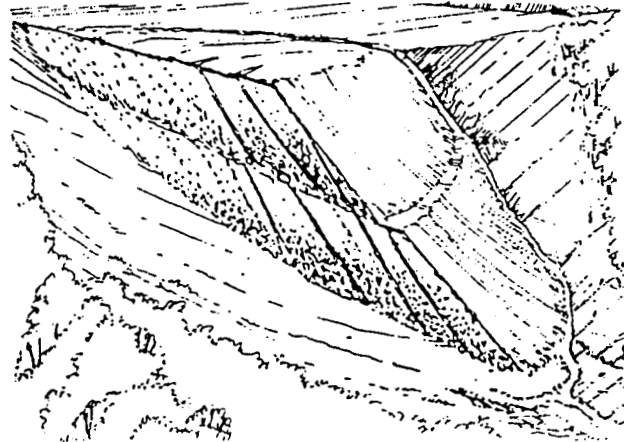
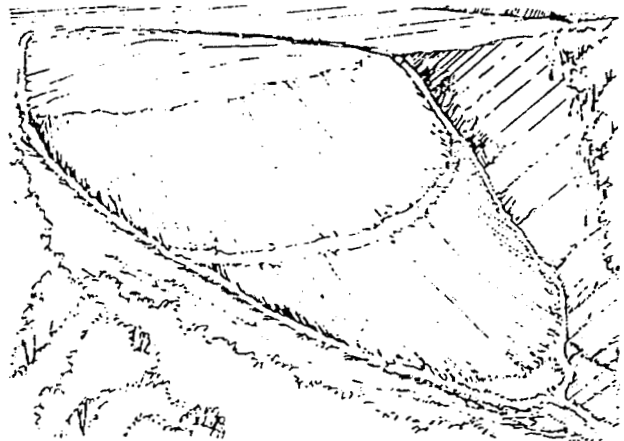
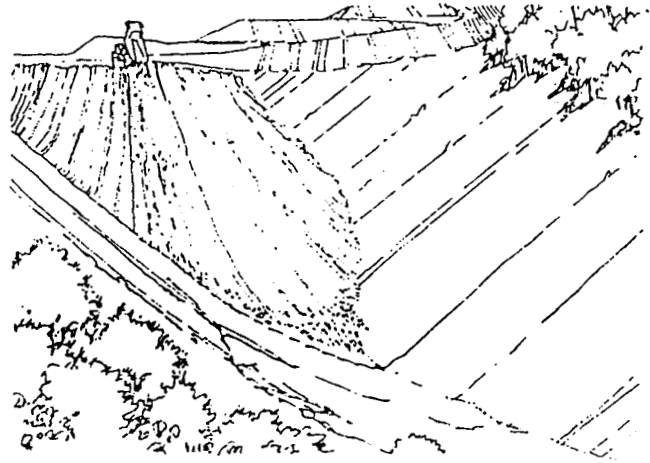


Figura. 3.11. Escombrera de vaguada con vertido por gravedad. (Robins, J. A.)

2. Si el material es depositado en la plataforma del vertedero e intermitentemente es empujado hasta el borde del talud se dificultará la diferenciación granulométrica y se crearán superficies planas compactadas y paralelas al talud general de avance, pudiendo actuar como potenciales planos de rotura por la escasa resistencia al corte en dichas zonas.
3. El vertido por gravedad proporciona ángulos de reposo con un coeficiente de seguridad próximo a 1. En rocas sedimentarias esos ángulos se aproximan a los 37° , según el tipo de granulometría de los materiales. Por ello, y con el fin de garantizar las condiciones de estabilidad durante lluvias prolongadas, se recomienda mantener un talud general de unos 20° .
4. Los vertederos construídos por este método son más susceptibles a la erosión por las aguas de escorrentía, a pesar de mantener taludes inferiores, pues las superficies son largas e ininterrumpidas, sin bermas o terrazas intermedias, y los taludes no pueden protegerse con vegetación hasta que se completa la construcción del vertedero.

El segundo método indicado consiste en depositar y compactar los estériles en capas o tongadas, con lo que se aumenta notablemente la resistencia al corte y la capacidad de vertido, pues se reduce el efecto del esponjamiento. Las condiciones de drenaje se consiguen creando un núcleo central de escollera tal como se ilustra en las Figs. 3.12, 3.13 y 3.14. Seguidamente, se exponen las normas y recomendaciones que se recogen en la bibliografía técnica y reglamentos mineros de otros países para la construcción de escombreras de vaguada con núcleo de drenaje y de escombreras de llanuras.

1. En terrenos con pendientes fuertes ($> 20^\circ$) se recomienda el levantamiento de un dique de contención de sección trapezoidal con las siguientes dimensiones:
 - Profundidad: Aproximadamente 1,5 m en material consolidado.
 - Taludes: 1,5 : 1.
 - Anchura de fondo: Superior a 3 m.

En vertederos con una capacidad inferior a $0,8 \text{ Mm}^3$, este dique puede ser sustituido por una simple plataforma, tal como se muestra en la Fig. 3.13, con las siguientes dimensiones:

- Taludes: Mayores de 1,5 : 1.
- Anchura de fondo: Superior a 3 m.

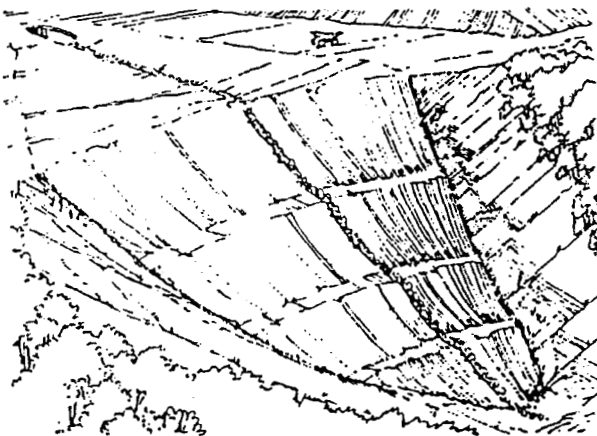
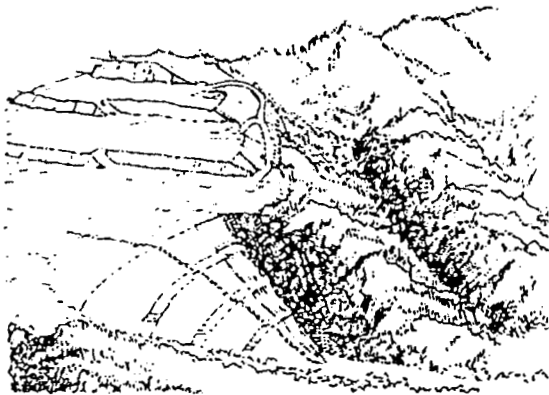
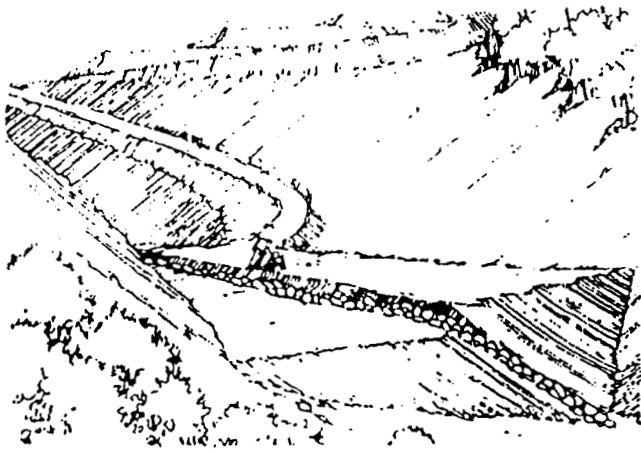


Figura 3.12. Escombrera de vaguada construida por tongadas y con núcleo central de drenaje. (Robins, J. D.)

2. Para aumentar la eficiencia del drenaje se recomienda, en ciertos casos, que el dique de base se construya con bloques resistentes de arenisca. Pero cuando los ensayos de los suelos de base demuestran que la capacidad portante es suficiente, puede suprimirse el dique de contención.
3. En escombreras de más de $0,8 \text{ Mm}^3$ de capacidad, el dique de contención puede complementarse con con-

trafuertes o estribos para reforzar la estabilidad de la masa de material vertido.

4. En todos los casos, además de los drenajes considerados como principales, se construirán otros secundarios o laterales, de acuerdo con las recomendaciones de la Tabla 3.IV:

TABLA 3.IV

TIPO DE ESTERIL	CAPACIDAD DE LA ESCOMBRERA	
	< $0,8 \text{ Mm}^3$	> $0,8 \text{ Mm}^3$
Pizarras o similares	5 m x 2,5 m	5 m x 5 m
Areniscas o similares	2,5 m x 1,2 m	5 m x 2,5 m

La granulometría del material empleado en los drenajes debe ser tal que contenga menos del 10 % de bloques inferiores a 30 cm y no existir tamaños superiores al 25 % de la sección del drenaje.

Tanto los drenes principales como los laterales se diseñarán de acuerdo con la valoración de los factores geológicos y topográficos característicos del lugar.

5. El procedimiento para la colocación del estéril es el siguiente:
 - a) Si el 65 % o más del material es arenisca puede ser vertido sin compactación, pero se nivelará según la cota del banco al finalizar el relevo de trabajo.
 - b) Si el material contiene menos del 65 % de arenisca puede ser vertido en tongadas de 1,2 m, compactándolo a continuación.
 - c) En terrenos abruptos y de fuerte pendiente y siendo más del 90 % arenisca, los sistemas de drenaje se construirán basándose en la segregación natural que se produce en el vertido.
6. Cuando las escombreras son construidas por gravedad se recomienda compaginar el vertido en avance con el lateral, ya que de esta forma se evita la formación de planos diferenciados que pueden servir como posibles discontinuidades de deslizamiento o rotura.
7. El material de relleno se dispondrá formando bancales con el fin de incrementar la estabilidad. Se recomiendan las siguientes dimensiones finales:
 - Altura de banco: 15 m máximo.
 - Anchura de berma: 6 m máximo.
 - Pendiente de desagüe hacia el interior de las bermas: 3-5%.
 - Pendientes laterales de coronación: 3-5 %.
 - Superficie de estabilización: Revegetación coexistente con la construcción.
8. Todas las superficies de drenaje dispondrán de las pendientes adecuadas hacia ambos lados de la va-

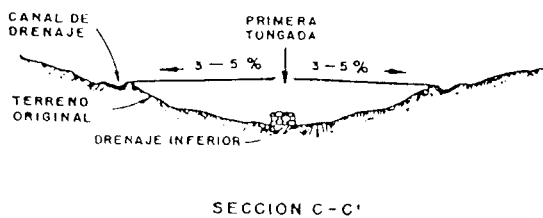
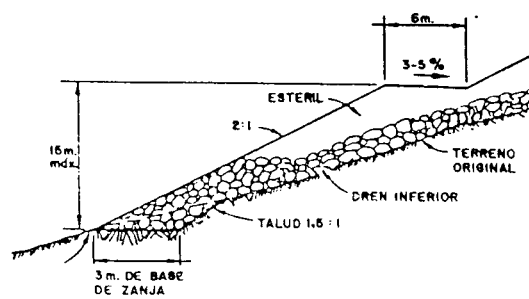
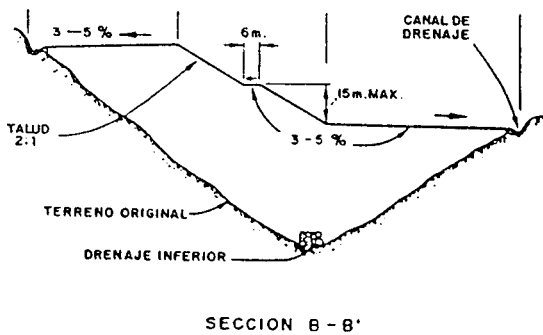
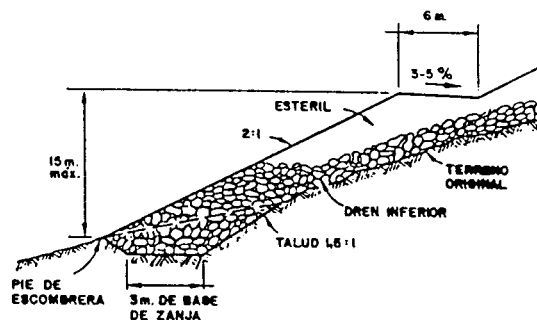
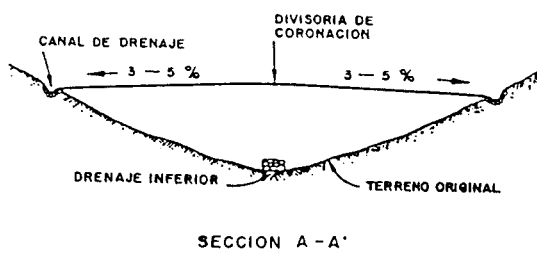
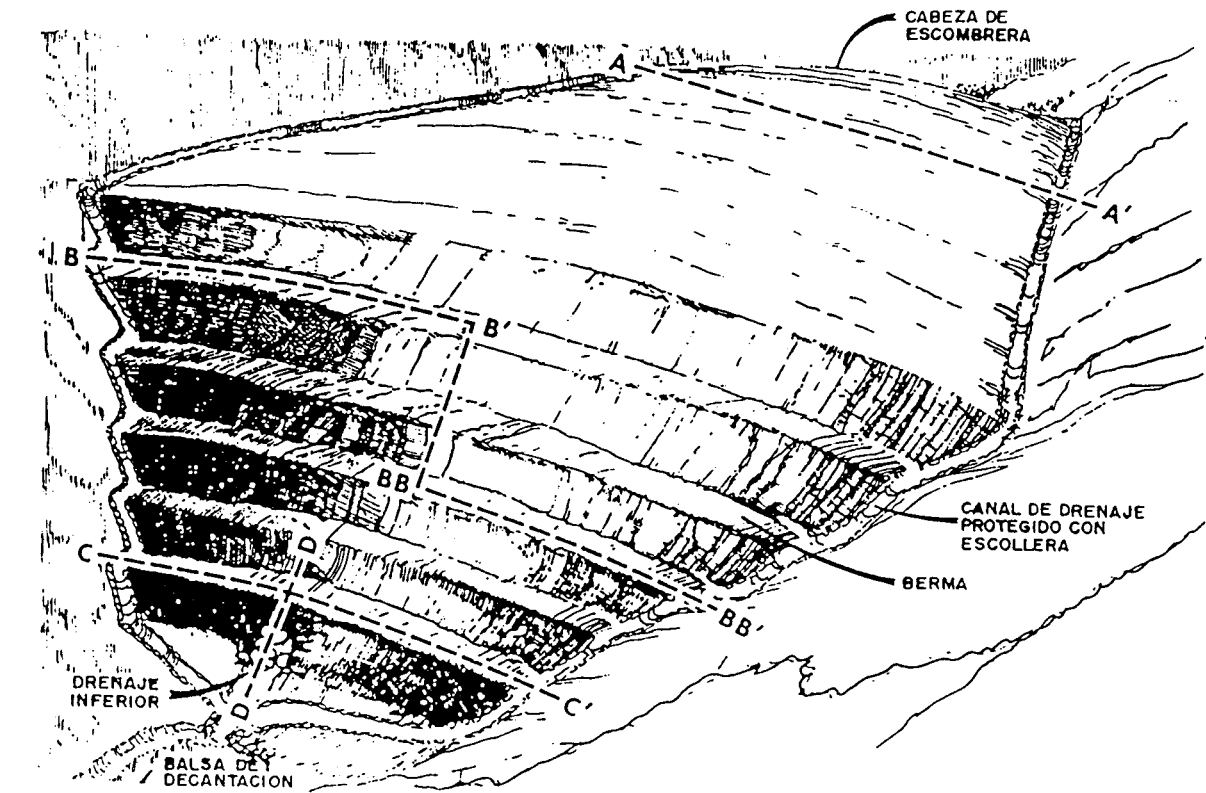


Figura 3.13. Detalles constructivos de una escombrera de vaguada.

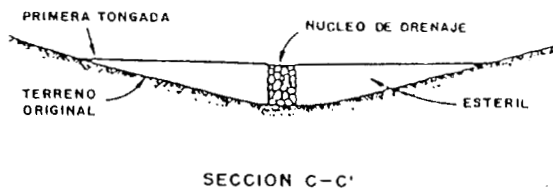
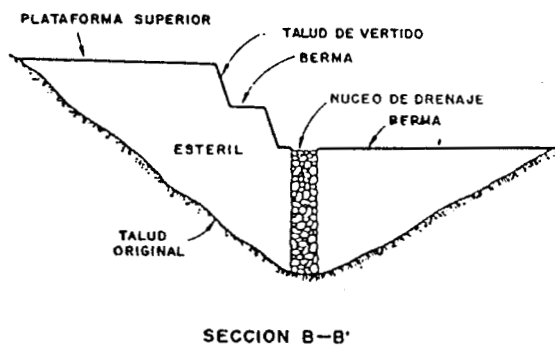
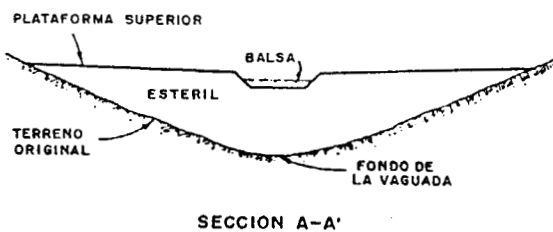
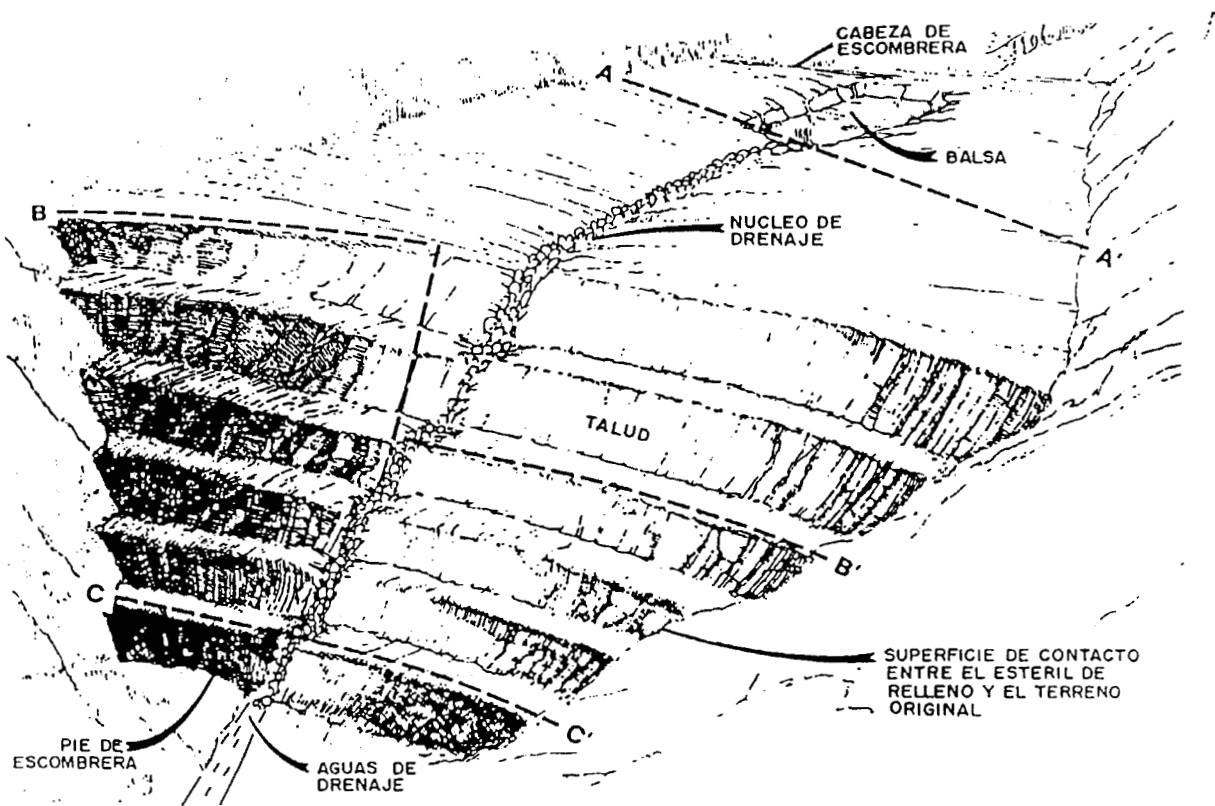


Figura 3.14. Detalles constructivos de una escombrera de vaguada con núcleo de drenaje.

guada, dirigiendo las aguas hasta las zanjas construídas en roca inalterada. Estas zanjas estarán protegidas por escollera u otros materiales en las zonas de fuertes pendientes, con objeto de reducir la velocidad de circulación.

En las escombreras de llanura construídas en retroceso y vertido en tongadas, las normas a observar son:

- Altura de banco: Menor de 5 m.
- Altura de berma: No inferior a 5 m.
- Talud general: Menor de 26° (2:1)
- Altura máxima de escombrera: 30 m si la humedad del material supera el 14 %.

Igualmente, en las escombreras de ladera se recomiendan los siguientes parámetros de diseño:

- Talud general: Menor de 22° (2,5:1)
- Altura máxima de escombrera: 15 m.

En la base del vertedero se levantará un dique de escollera debidamente compactado, complementándolo con una tubería de drenaje del lado de aguas arriba.

4.4. Cálculos de estabilidad de escombreras

Los materiales vertidos en una escombrera se encuentran como fragmentos con unos tamaños muy pequeños, si se comparan con las dimensiones del depósito. Aunque inmediatamente después del vertido no existe ninguna trabazón entre las partículas, el paso del tiempo facilita los fenómenos de consolidación que se traducen en un aumento de la cohesión y de la resistencia al corte.

Las formas de inestabilidad son, según la posición de la superficie de rotura, superficiales si no afectan a la base de la escombrera o profundas si sucede lo contrario. Los tipos de rotura que se identifican de acuerdo con la geometría de las mismas son las siguientes:

- **Rotura circular.** Se produce en depósitos en los que los materiales presentan unas propiedades geotécnicas homogéneas.
- **Rotura no circular.** Es una superficie de rotura mixta que combina una sección circular y un deslizamiento. Se presenta en materiales con características diferentes.

- **Rotura en cuña.** Es típica de aquellos casos donde la base de apoyo no es lo suficientemente resistente para soportar el peso de los estériles.

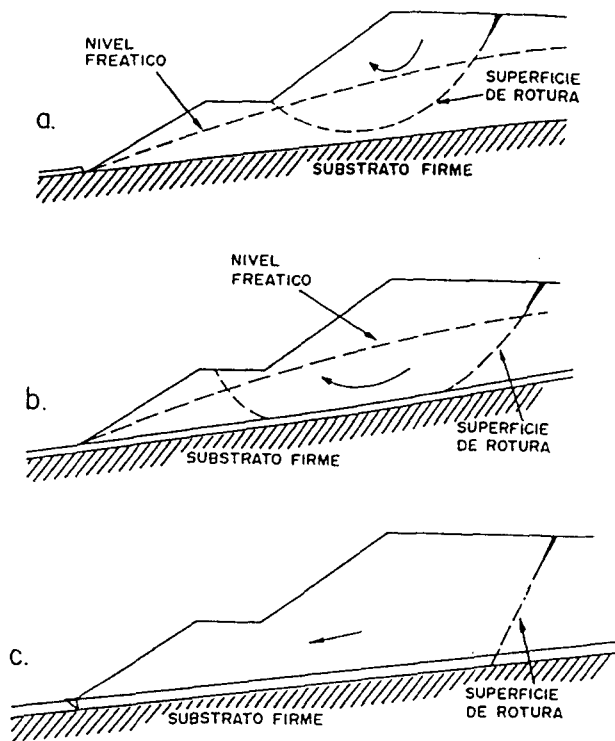


Figura 3.15. Principales tipos de rotura en escombreras: a) Circular, b) Mixta y c) En cuña.

Los métodos de análisis de estabilidad son muy diversos, y la mayoría se basan en comparar las fuerzas que favorecen el movimiento de la masa de materiales a través de una hipotética superficie de rotura y las fuerzas resistentes estabilizadoras. Los cálculos se simplifican llevándose a cabo en secciones verticales, sin tener en cuenta las fuerzas resistentes que actúan en los extremos de la masa en movimiento. No obstante, se han desarrollado métodos más complejos que se aplican sobre modelos tridimensionales, Cornell y Vanmarcke (1977). Fig. 3.16.

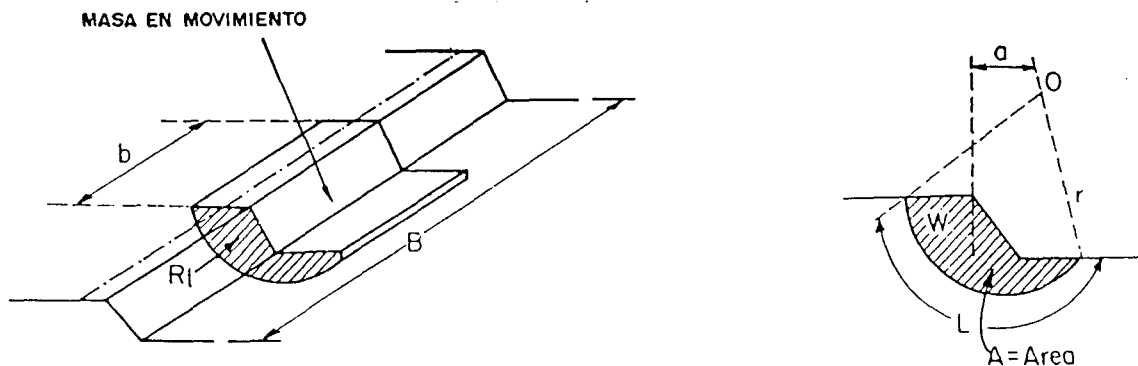


Figura 3.16. Modelo tridimensional y sección vertical de la masa deslizante.

El Factor de Seguridad «FS» para el modelo de la Fig. 3.16 viene dado por:

$$FS = \frac{\hat{S}f \cdot L \cdot r \cdot b + R_i}{W \cdot a \cdot b}$$

donde:

- FS = Factor de Seguridad.
- $\hat{S}f$ = Fuerza tangencial resistente sobre la superficie de rotura.
- R_i = Contribución de los extremos de la masa deslizante al movimiento resistente.
- L = Longitud del arco de la superficie de rotura.
- r = Radio de la superficie de rotura.
- b = Longitud de la masa deslizante.
- a = Distancia horizontal del centro «O» de rotura al centro de gravedad de la masa.
- w = Peso de la masa deslizante por unidad de longitud.

Estos estudios se suelen plantear como un problema de equilibrio límite, y en ellos resulta necesario seleccionar diversas superficies de rotura hasta llegar a la más crítica para el talud considerado, que será la que dé un menor coeficiente de seguridad.

Los datos básicos para un análisis de estabilidad son, además de la densidad del material depositado, la cohesión y el ángulo de rozamiento interno. Según el horizonte temporal que se plantee para la estabilidad de la estructura, se tendrá en cuenta la tensión total que actúa sobre la masa deslizante, caso de calcular las condiciones de estabilidad a muy corto plazo, o la tensión efectiva, esto es tensión total menos las presiones intersticiales, para la estabilidad a largo plazo.

Como ya se ha indicado, son numerosos los procedimientos analíticos de cálculo de estabilidad, basándose muchos de ellos en la técnica de división en rebanadas verticales sobre las que se determinan las fuerzas resultantes efectivas normales, las tangenciales y las presiones intersticiales. Lo mismo se hace sobre la superficie de rotura para llegar a calcular el Factor de Seguridad.

Dado que esos procedimientos se salen del ámbito de esta obra, se expondrá sólo un método gráfico para rotura circular, basado en el círculo de rozamiento. Se recomienda la consulta del «Manual para el Diseño y Construcción de Escambreras y Presas de Residuos Mineros» (1986) editado por el ITGE. Hoek y Bray (1981) presentan unos ábacos con los que es posible efectuar una primera estimación del Factor de Seguridad, algo inexacta y conservadora, válida para estudios a nivel de anteproyecto bajo las hipótesis de materiales homogéneos y geometrías sencillas. Las etapas a cubrir son las siguientes:

1. Se elige el tipo de escenario que es probable que se presente sobre la estructura a analizar. Fig. 3.17. Existen cinco casos y cada uno de ellos posee un ábaco.
2. Se calcula el valor adimensional:

$$\frac{c}{\gamma \cdot H \cdot \text{tag}\phi}$$

siendo « γ » la densidad del material, «H» la altura del talud, «c» la cohesión aparente y « ϕ » el ángulo de rozamiento interno.

3. En los ábacos de las Figs. 3.18 a 3.22 se sigue el radio del valor encontrado anteriormente hasta que corte a la curva que corresponde el ángulo del talud.
4. Se busca sobre los ejes vertical y horizontal los valores de «tag ϕ /FS» y «c/ γ HFS», a partir de los cuales se calcula el valor de «FS» más conveniente.

Ejemplo:

Se considera una escambrera de estériles de carbón con un nivel freático que surge a 1/4 de la altura del talud. Los parámetros resistentes son: $c = 40 \text{ KN/m}^2$, $\gamma = 18 \text{ KN/m}^3$ y $\phi = 22^\circ$. Se pide hallar el Factor de Seguridad para $H = 50 \text{ m}$ y un ángulo de talud de 25° .

$$\frac{c}{\gamma \cdot H \cdot \text{tag}\phi} = 0,11$$

con el ábaco número 3 se obtienen los siguientes valores:

$$\frac{\text{tag}\phi}{FS} = 0,4 \quad \frac{c}{\gamma HFS} = 0,044$$

El Factor de Seguridad del talud es 1,01.

En las Figs. 3.23 y 3.24 se representan los gráficos para la determinación del centro del círculo crítico de rotura y grieta de tracción, correspondientes a las situaciones de los ábacos anteriores 1 y 3.

SITUACION HIDROLOGICA	ABACO
SECO	1
SALIDA DEL AGUA A 1/8 DE LA ALTURA DEL TALUD	2
SALIDA DEL AGUA A 1/4 DE LA ALTURA DEL TALUD	3
SALIDA DEL AGUA A 1/2 DE LA ALTURA DEL TALUD	4
TOTALMENTE SATURADO	5

Figura 3.17. Casos de situación del nivel freático resueltos en ábacos de Hoek y Bray.

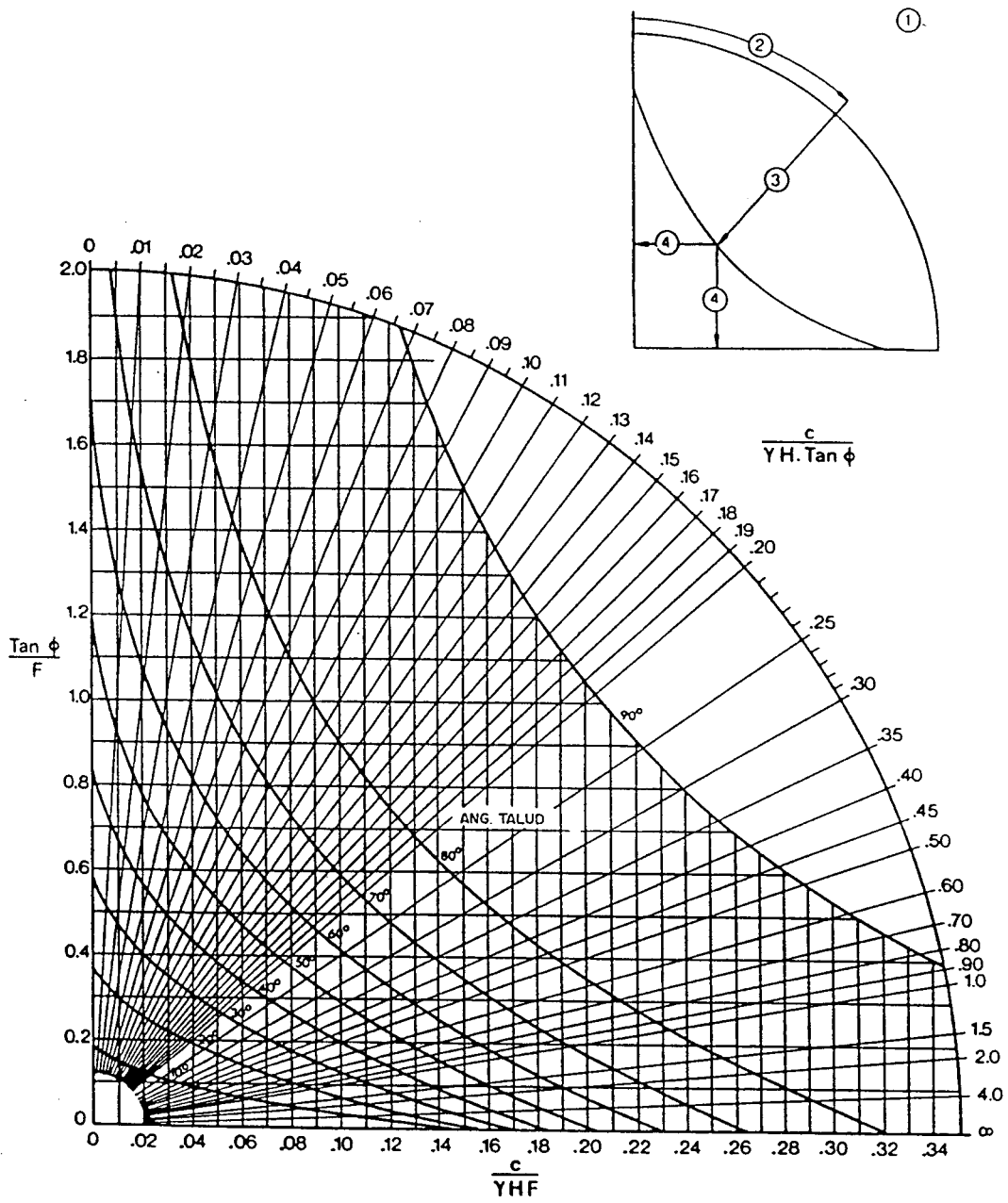


Figura 3.18. Abaco número 1 de Hoek y Bray.

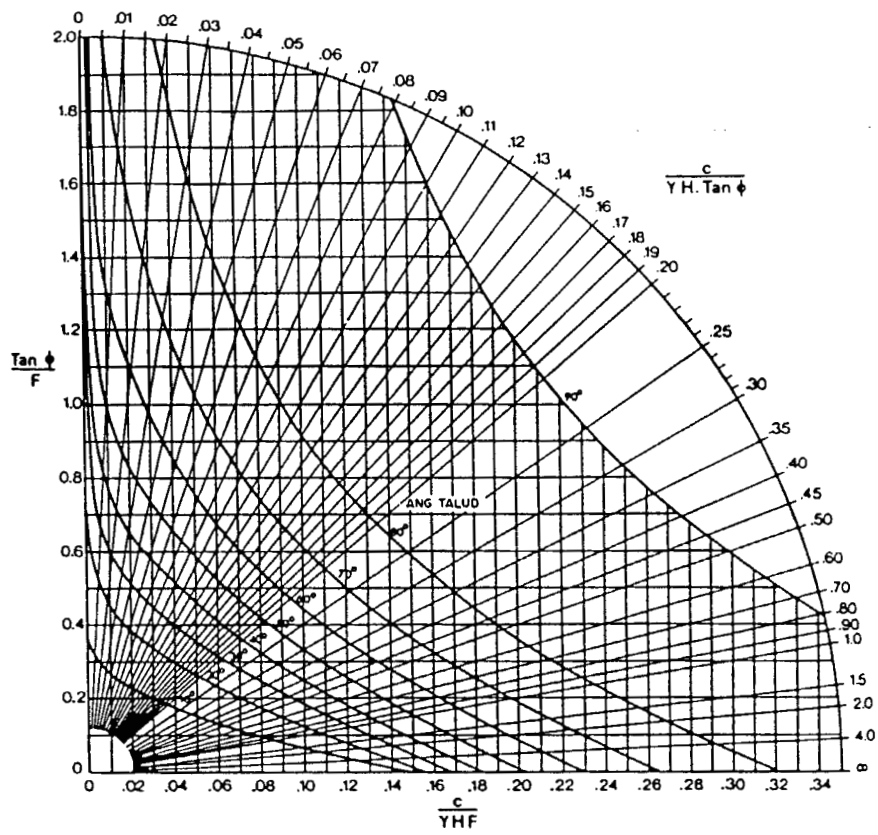


Figura 3.19. Abaco número 2 de Hoek y Bray.

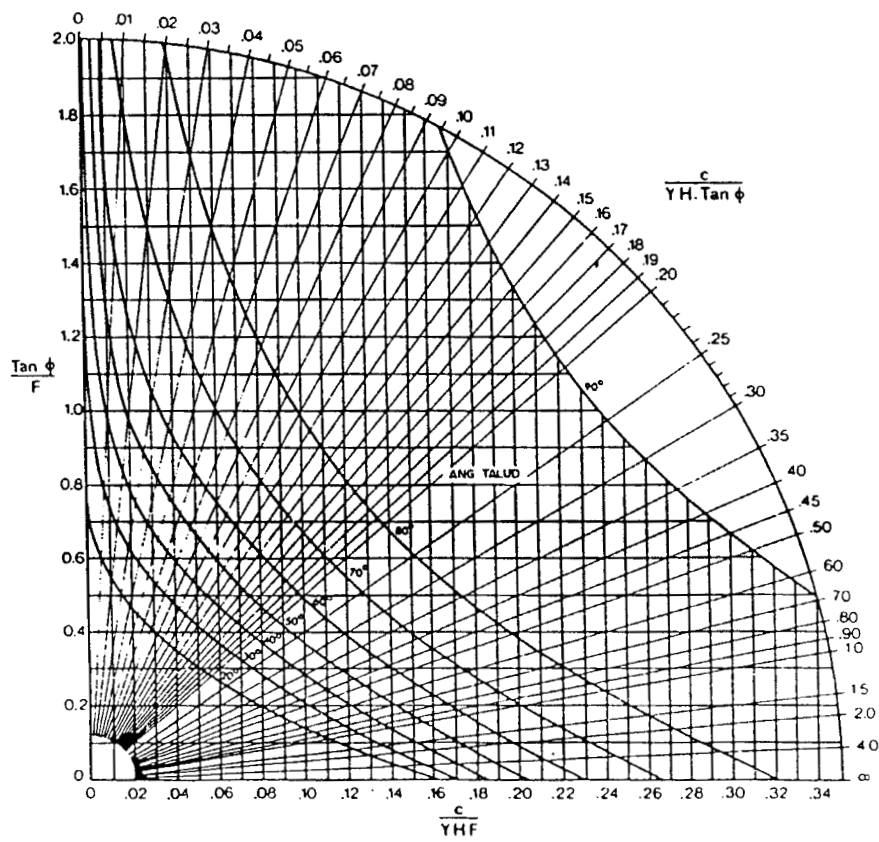


Figura 3.20. Abaco número 3 de Hoek y Bray.

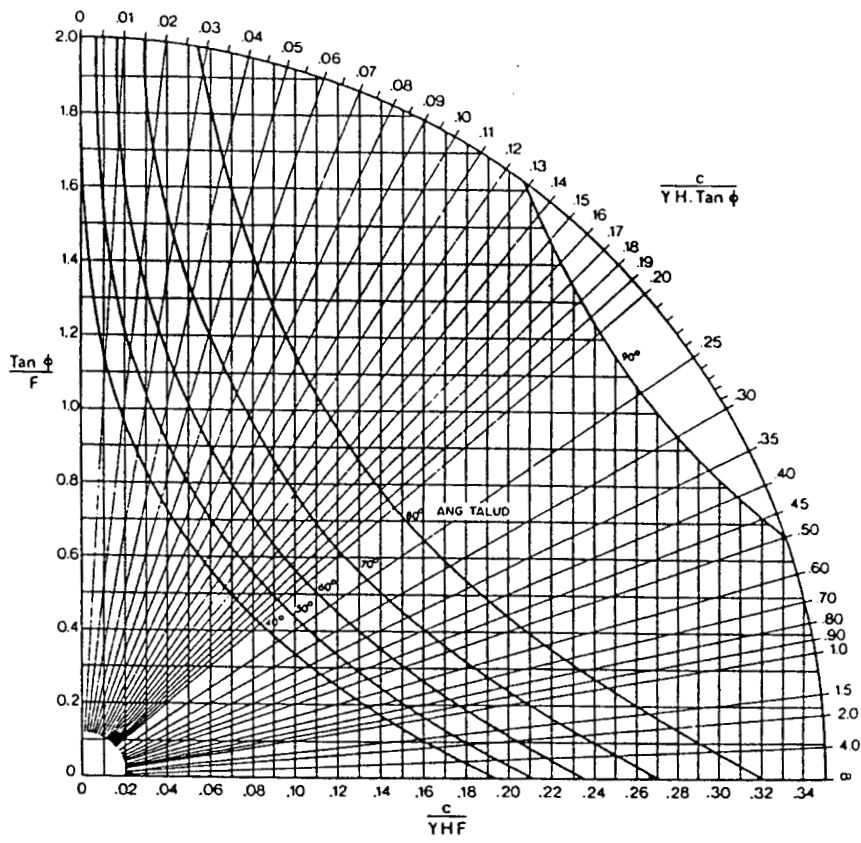


Figura 3.21. Abaco número 4 de Hoek y Bray.

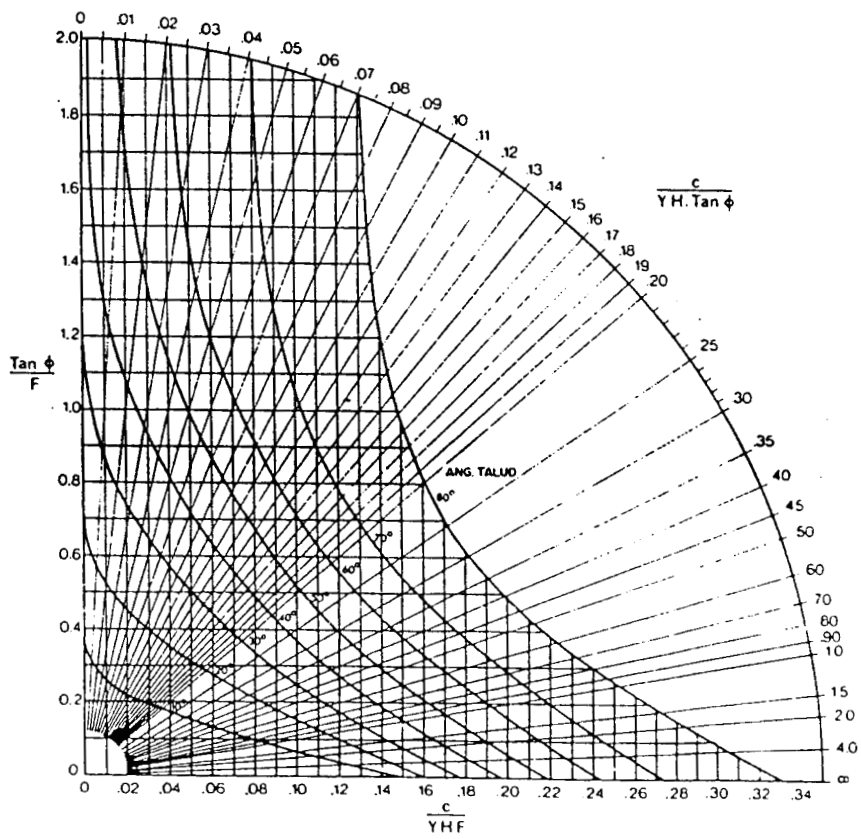


Figura 3.22. Abaco número 5 de Hoek y Bray.

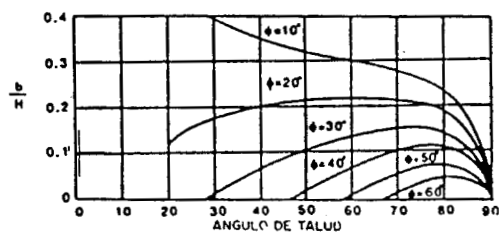
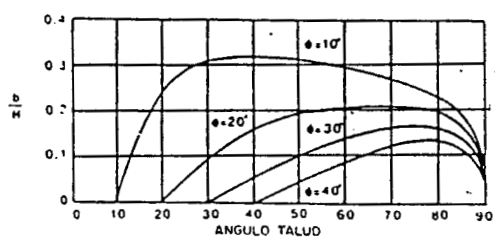
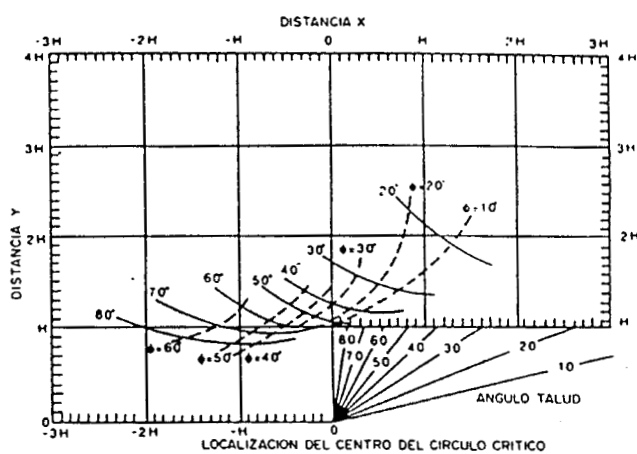
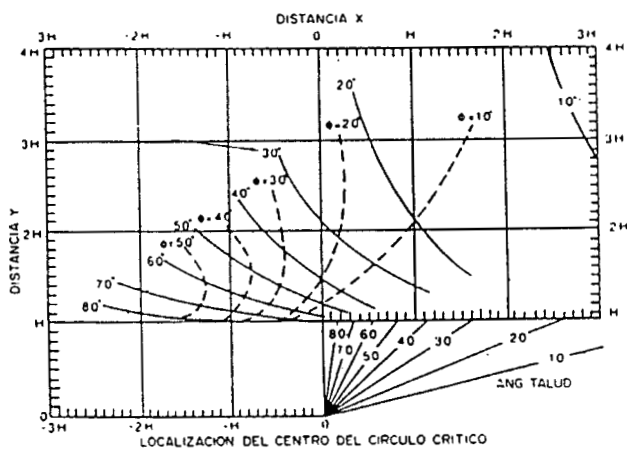
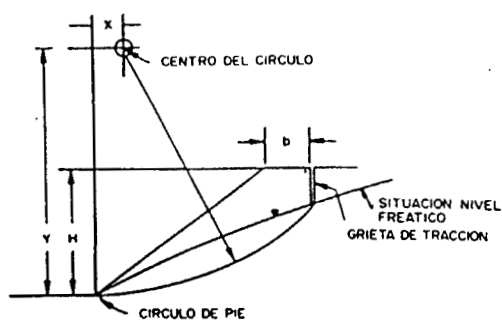
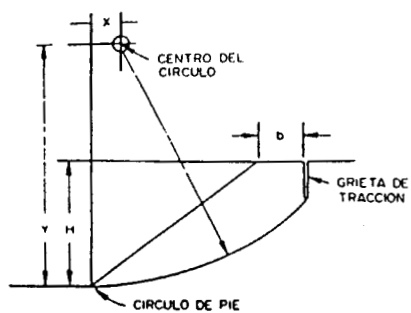


Figura 3.23. Localización del círculo crítico de rotura y grieta de tracción (situación del Abaco 1).

Figura 3.24. Localización del círculo crítico de rotura y grieta de tracción (situación del Abaco 3).

De acuerdo con lo anterior, se puede decir que los cálculos de estabilidad finalizan siempre con la determinación del Factor de Seguridad. Si el valor obtenido está por debajo del exigido se procede a rediseñar geométricamente la escombrera o a mejorar las condiciones de drenaje.

Los valores mínimos exigidos son superiores en todos los casos a la unidad, ya que, por un lado, se requiere un

margen para considerar la intensidad de riesgo en función de las condiciones del entorno y, por otro, es preciso considerar los posibles errores y desviaciones de los parámetros característicos de los materiales que se han obtenido con las muestras ensayadas.

En la Tabla 3.V, se indican los Factores de Seguridad mínimos para los diferentes escenarios posibles.

TABLA 3.V. COEFICIENTES DE SEGURIDAD MINIMOS REQUERIDOS EN EL PROYECTO DE ESCOMBRERAS

CASO I			
Implantaciones sin riesgo para personas, instalaciones o servicios. $H \leq 15$ m o $V \leq 25.000$ m ³ Pueden constituirse con el ángulo de vertido de o $H > 15$ m en escombreras en manto los escombros.			
	F₂	F₁	
$15 < H \leq 30$ m, talud conformado para	1,20	1,10	
$H > 30$ m, talud conformado para	1,30	1,20	
CASO II			
Implantaciones con riesgo moderado.			
	F₃	F₂	F₁
$H \leq 15$ m o $V \leq 25.000$ m ³ o $H > 15$ m, en escombreras en manto	1,20	1,15	1,00
$15 < H \leq 30$ m	1,35	1,25	1,10
$H > 30$ m	1,45	1,30	1,15
CASO III			
Implantaciones con riesgo elevado. Se proscriben las escombreras en manto sin elementos de contención o desviación al pie.			
	F₃	F₂	F₁
$H \leq 20$ m	1,40	1,20	1,10
$H \geq 20$ m	1,60	1,40	1,20
NOTAS			
— Esta tabla corresponde a escombreras de la minería de carbón, realizadas de acuerdo con estas recomendaciones, relativamente homogéneas y en las que los finos cohesivos o de lavadero no influyen de manera apreciable en la estabilidad. — Los coeficientes de seguridad corresponden a las situaciones siguientes: F_1 : Escombreras normales, sin efectos de aguas freáticas y en cuya estabilidad no interviene el cimiento. F_2 : Escombreras sometidas a filtración, agua en grietas o fisuras, y riesgo de deslizamiento por la cimentación. F_3 : Situaciones excepcionales de inundación, riesgo sísmico, etc. — Los valores de F indicados son para escombreras exentas o en laderas con inclinaciones hasta el 8 %. En el caso de vaguadas encajadas (ancho máximo \approx altura) puede admitirse una reducción del 10 %, llegando al 3 % para vaguadas con ancho máximo \approx 2,5 veces la altura. En laderas de inclinación superior al 8 % los coeficientes F se incrementan en los valores siguientes: CASO I: $F = 0,10$. CASO II: $F = \sqrt{0,03(\alpha - 0,08)}$ CASO III: $F = \sqrt{0,07(\alpha - 0,08)}$ siendo α la inclinación de la ladera en tanto por 1, con $\alpha \leq \emptyset$. — Se supone que los parámetros geotécnicos se han determinado mediante ensayos. En el caso de estimación, éstas deben justificarse, mayorando los coeficientes de la tabla en un 10-15 %, según la fiabilidad de las estimaciones.			

Fuente: Manual para el Diseño y Construcción de Escombreras y Presas de Residuos Mineros, ITGE. 1986.

5. RESTAURACION Y ABANDONO DE ESCOMBRERAS

5.1. Estabilización de escombreras y acondicionamiento para el abandono

Si una vez construida una escombrera se observan movimientos del terreno o riesgo de que se produzcan, será necesario antes de implantar la cubierta vegetal o darle un uso a esos terrenos, adoptar una serie de medidas correctoras.

Existen diversos métodos para estabilizar las masas de estériles granulares, cuyo comportamiento puede asimilarse al de un suelo no cohesivo.

Este tema se desarrolla, también, en el Capítulo 15 que hace referencia al tratamiento de taludes en la preparación del terreno, por lo que se aconseja su lectura.

La solución más sencilla consiste en modificar la geometría de tales estructuras mediante el remodelado del talud, de manera que se logre reducir el momento de las fuerzas desestabilizadoras y mejorar el coeficiente de seguridad.

Una segunda medida consiste en el drenaje de las estructuras para evitar, por un lado, la erosión de los materiales en la superficie del talud, y, por otro, las presiones intersticiales y efectos desestabilizadores en el interior de los depósitos. Durante la fase de construcción con obras o elementos que favorezcan el drenaje intenso de los estériles, pantallas drenantes y galerías, así como la disposición y vertido estratégico de los materiales dentro de las escombreras.

Si tales actuaciones no se han llevado a cabo pueden realizarse una serie de obras complementarias como son las zanjas y los espaldones o contrafuertes Fig. 3.25.

Los sistemas citados tienen un carácter superficial, pues las zanjas no suelen alcanzar profundidades superiores a los 4 ó 5 m. Es conveniente complementar estos sistemas con la construcción de unas bajantes superficiales que conduzcan el agua drenada hasta el desagüe principal.

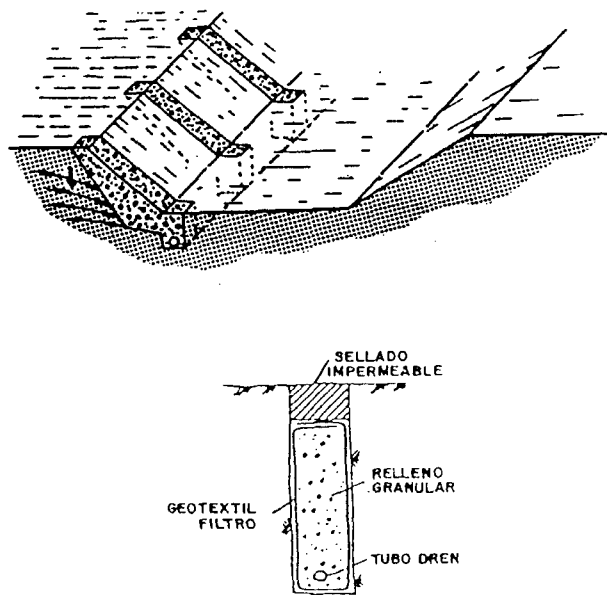


Figura 3.25. Sistemas de drenaje.



Foto 3.2. Colapso de una escombrera afectando al cauce de un río.

En los deslizamientos activos se recomienda el sellado de las grietas superficiales ya que pueden actuar como vía de entrada del agua. Esa operación se debe efectuar con materiales impermeables como la arcilla, el cemento, etc.

Otro grupo de métodos es el denominado de contención, que consiste en la aplicación de una fuerza resistente complementaria mediante la construcción de una obra de fábrica. Estos muros y muretes actúan por su peso, pudiendo anclarse y encastrarse en el terreno. Los materiales que se utilizan normalmente son muy diversos, desde el hormigón en masa, la mampostería, la tierra armada, los gaviones, etc.

Finalmente, existen los métodos de mejora de las características de los materiales, con los que se persigue aumentar la resistencia al corte de los mismos. Se pueden llevar a cabo mediante la inyección de sustancias que aumenten la cohesión de los fragmentos rocosos en zonas que no impidan el drenaje y por procedimientos mecánicos de introducción de refuerzos, barras de acero, carriles, micropilotes, etc., y anclaje incluso de estos a la roca firme. Todos estos tratamientos tienen una efectividad escasa, localizada y son costosos.

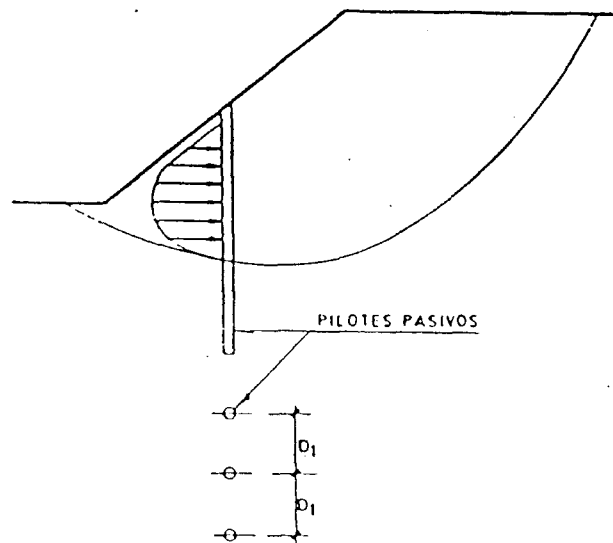


Figura 3.26. Estabilización mediante micropilotes.

Tras la estabilización de los taludes, la revegetación posterior actúa no sólo como un método protector e integrador de estos en el medio ambiente, sino incluso como un sistema corrector de los materiales más superficiales, pues produce una desecación por efecto de la evapotranspiración, reduce la filtración del agua y refuerza el terreno con las raíces.

Previo al extendido de la tierra vegetal, es necesario proceder al escarificado de las superficies por donde ha circulado la maquinaria minera, ya que el peso de ésta habrá dado lugar a una compactación de los materiales que impedirá en muchos casos la penetración y desarrollo de las raíces de las plantas. En las zonas en pendiente, si no se tratan esas superficies, actuarán como planos de discontinuidad pudiendo producirse deslizamientos a lo largo de ellas.



Foto 3.3. Escombrera en ignición.

5.2. Extinción de incendios en escombreras de minas de carbón

En las explotaciones de carbón, los estériles procedentes de los lavaderos y de las propias minas son potencialmente peligrosos, ya que existe un riesgo de incendio con una elevada producción de gases nocivos y modificación de las condiciones de estabilidad de las escombreras. La combustión espontánea se produce por la presencia de piritas y carbón en los estériles, así como de otros materiales que poseen celulosa, como la madera. El momento de ignición depende en parte de las condiciones climatológicas y de vertido de los estériles.

Los incendios de las escombreras causan huecos dentro de las mismas, dando lugar a modificaciones de la distribución de tensiones y a derrumbamientos parciales. Si estos últimos no llegan a la superficie existirá una probabilidad de hundimiento por el paso de personas y maquinaria. Desde el punto de vista de estabilidad, no todos los incendios tienen efectos negativos, ya que la combustión que da lugar a las escorias aumenta de forma apreciable la cohesión y resistencia al corte de los materiales almacenados.

A pesar de la escasa conductividad térmica de los escombros, como la combustión de estos se inicia en zonas próximas a la superficie los intentos de revegetación pueden fracasar al impedir el desarrollo de las plántulas.

Por otro lado, se producen gases con un alto contenido en CO y SH₂ que los hacen nocivos y peligrosos. Además de la contaminación química del aire existe una contaminación visual típica de los incendios de estas escombreras.

Las medidas para luchar contra los procesos de combustión espontánea son de dos tipos: preventivos y correctivos. Dentro del primer grupo caben destacar las siguientes:

- Retirada de la vegetación en la base de apoyo de la escombrera.
- Separación de la madera de los estériles de mina. Esto está indicado para explotaciones de interior donde se utiliza ese material en el sostenimiento.
- Compactación de los estériles en tongadas con un espesor inferior a 1 m.

- Intercalación de capas horizontales de estériles finos no carbonosos para dificultar la circulación del aire entre los intersticios.

Una vez incendiada una escombrera los sistemas que pueden aplicarse para su extinción son los siguientes:

— Remoción del escombro incendiado:

Consiste en la extracción del material de combustión, previo enfriamiento con agua, y transporte y vertido en un área próxima. Fig. 3.27. Este sistema se aplica cuando las áreas incendiadas son pequeñas y fácilmente accesibles, y la retirada del material no compromete la estabilidad de la escombrera. Los huecos creados si no son grandes deben ser rellenados con material inerte que a continuación se nivela y compacta.

— Sellado superficial:

La zona en ignición se recubre en superficie con una capa de materiales inertes para impedir la entrada de aire a través de los intersticios que quedan entre las partículas. Los materiales que más se utilizan son: la arcilla, la pizarra triturada y el polvo de caliza, teniendo este último la ventaja de producir, al calentarse, anhídrido carbónico que dificulta la combustión.

El problema principal de este sistema es la efectividad, ya que pueden producirse grietas en superficie provocadas por los hundimientos interiores y adelgazamientos de los espesores de recubrimiento por acción de la erosión exterior. Debe pues preverse un control y supervisión de la superficie de sellado.

— Aislamiento del material en combustión:

Para impedir la propagación del fuego desde un foco localizado, es posible aislar éste mediante unas zanjas, que tras su apertura se rellenan con productos inertes, preferiblemente finos, para dificultar la entrada de aire.

— Apagado por inyección:

Consiste en la inyección en la escombrera, dentro de la zona de combustión, de un lodo preparado con agua y con material incombustible finamente dividido, como puede ser la caliza o la arena pulverizada. Este pro-

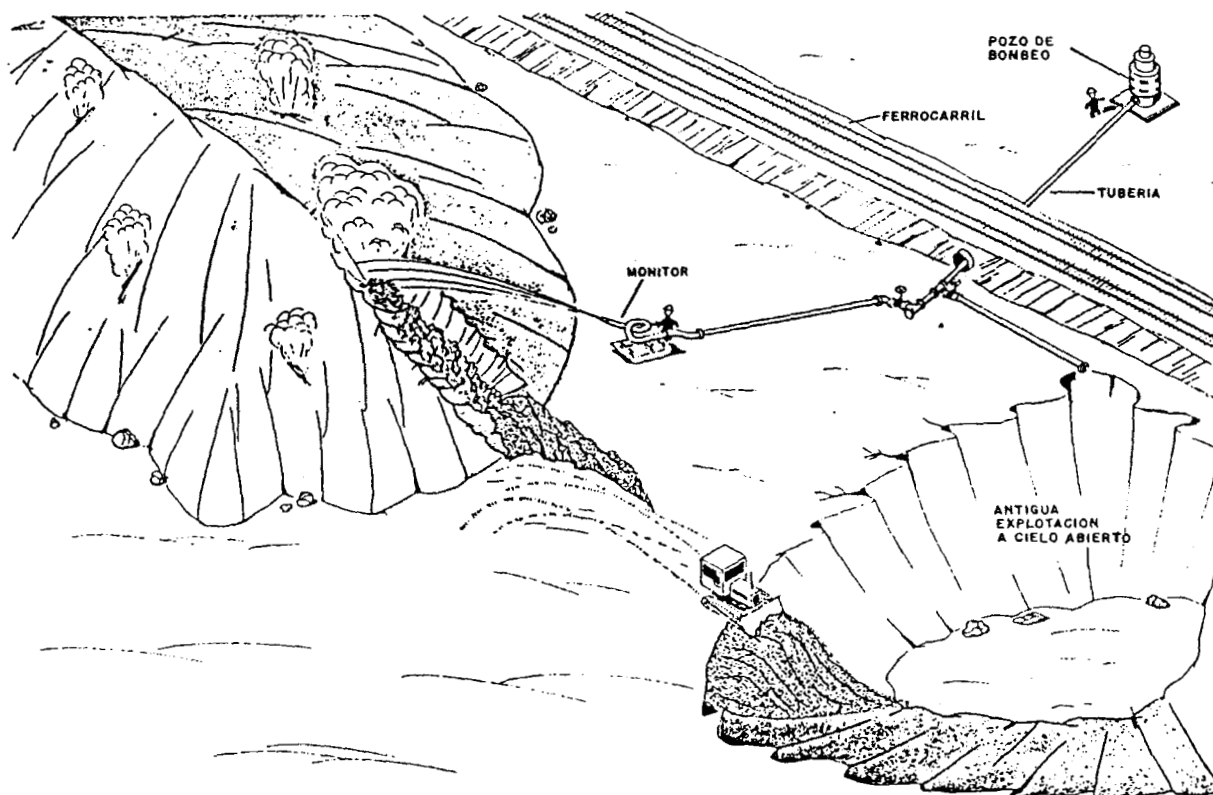


Figura 3.27. Extinción de incendio con monitor hidráulico y remoción del estéril.

ducto ocluye los poros existentes entre las partículas impidiendo el paso del oxígeno necesario para la combustión, y proporciona además un efecto de enfriamiento.

En el caso de utilizar solamente agua deben tomarse ciertas precauciones, ya que la producción de vapor de agua a alta temperatura puede favorecer la propagación de la combustión de los estériles por el calentamiento de estos y provocar explosiones abriendo nuevas vías al fuego. Por otro lado, si la cantidad de agua añadida es muy grande se corre el riesgo de producir una contaminación de los acuíferos y aguas superficiales al lixiviar algunos productos sólidos de los estériles.

6. REUTILIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LOS ESTÉRILES

Los estériles procedentes de las explotaciones mineras plantean diversos problemas, tanto en lo relativo a su almacenamiento y abandono como a las alteraciones que producen sobre el medio ambiente. Por ello, existe una tendencia lógica hacia el aprovechamiento de los materiales, al objeto de lograr un uso más racional de los recursos naturales y minimizar los problemas citados.

El primer uso que puede tener un estéril, aunque sea el menos noble, es el de material de relleno de los huecos creados en las minas. En las explotaciones a cielo

abierto, dependiendo de la geometría de éstas y del método de extracción aplicado, se pueden rellenar total o parcialmente, alcanzando topografías poco discordantes con las originales. En minas subterráneas, el relleno de los huecos se utilizará como sistema de sostenimiento facilitando la extracción del mineral y minimizando los efectos de los hundimientos en la superficie.

Otras vías de utilización se basan en las características petrográficas, mineralógicas, químicas y físico-mecánicas de los estériles. Algunas de las aplicaciones posibles hoy en día son las siguientes:

- Rellenos y terraplenes.
- Carreteras y diques de presas.
- Fabricación de ladrillos y briquetas.
- Materiales para restauración.
- Fertilizantes y enmiendas.
- Combustibles especiales.
- Aditivos de minerales energéticos, etc.

Estos últimos usos se refieren a los estériles de carbón cuando el porcentaje de este mineral es superior al 4 %. De todas las aplicaciones no mineras las más interesantes, por las grandes cantidades que se utilizan, son las que se encuentran en el campo de la obra pública. Por lo general, no es preciso tratamiento alguno, pero sí una caracterización rigurosa a fin de clasificar adecuadamente los distintos tipos de materiales.

Los ensayos que dentro de este tipo de obras se suelen realizar son los siguientes:

- Curva granulométrica.
- Peso específico.
- Plasticidad.
- Compactación.
- Capacidad portante.
- Resistencia al corte.
- Comprensibilidad.
- Permeabilidad.
- Concentración de azufre, y
- pH.

BIBLIOGRAFIA

- AYALA, F. J. y RODRIGUEZ, J. M.: «Recomendaciones para el Proyecto y Ejecución de Escombreras en la Minería del carbón». Industria Minera.
- AYALA, F. y RODRIGUEZ, J. M.: «Manual para el Diseño y Construcción de Escombreras y Presas de Residuos». IGME, 1986.
- CANMET.: «Pit Sole Manual - Wastes Embankments», 1979.
- CHIRONIS, N. P.: «Better Ways to Build Hollow Fills». Coal Age. 1978.
- CLARIDGE, F. B. et al.: «Mine Waste Dumps Constructed in Mountain Valleys». CIM Bulletin. 1986.
- GONZALEZ CANIBANO, J. y GARCÍA, J. M.: «Los Estériles de Menudo de Lavaderos de Carbón como Material para la Construcción de Terraplenes». Carreteras, julio-agosto 1986.
- HOEK, E., and BRAY, J. W.: «Rock Slope Engineering». The Institution of Mining and Metallurgy. 1981.
- MCNAY, L. M.: «Coal Refuse Fiers, An Environmental Hazard». Bureau of Mines. IC 8515.
- NICHOLS, R. S. and RUTLEDGE, A. L.: «Water Drainage Thought Waste Dumps at Forcing Coal Limited». CIM Bulletin. 1982.
- NICHOLS, R. S.: «Rock Segregation in Waste Dumps», 1986.
- RAINBOW, A. K. M.: «Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes» Proceedings of the Second International Conference, 1989.
- ROBINS, J. D.: «Constructing Spoil Storage Fills in the Sleep Terrain Appalachian Coalfields». Stability in Coal Mining. Miller Freedman Publ. 1978.
- RODRIGUEZ ORTIZ, J. M.: «Auscultación y Corrección de Movimientos del Terreno». Riesgos Geológicos. IGME. 1987.
- SERRA DE RENOBALLES, T.: «La Concepción de Vertederos, Condición Previa para Posibilitar la Restauración en Minería a Cielo Abierto». I. Seminario sobre la Restauración de Canteras y Minas a Cielo Abierto. Fundación Gómez-Pardo. Madrid. 1988.
- SERVICE TECHNIQUE DE L'URBANISME.: «Sols Stériles: Réaménagement et Végétalisation», 1986.
- UNESA-ASINEL.: «Cubrimiento Vegetal de Escombreras de Cenizas Volantes», 1988.
- WILLIAMSON, N. A. et. al.: «Mine Wastes Reclamation» Mining Journal Books, 1982.

PRESAS DE RESIDUOS

1. INTRODUCCION

La función principal de estas estructuras consiste en almacenar permanentemente los estériles sólidos y retener temporalmente los efluentes líquidos procedentes de las plantas de tratamiento. Cuando esos efluentes contienen contaminantes tóxicos, las presas deben ser diseñadas para albergar el agua durante un largo período de tiempo, hasta que se degraden las sustancias químicas perniciosas o hasta que se evapore el agua.

Las presas de residuos difieren de las presas de tierra y escollera convencionales en cuatro aspectos básicos:

- Las presas de residuos almacenen tanto sólidos como líquidos.
- En muchos casos, los propios residuos se utilizan como material de construcción del dique de la presa.
- Las presas se construyen, normalmente, por etapas siguiendo el desarrollo de las operaciones.
- Suelen requerirse modificaciones en el diseño y operación de llenado de la presa al introducirse cambios en los procesos de tratamiento.

En las dos últimas décadas se ha progresado bastante en el diseño ingenieril de las presas de residuos en lo relativo a hidrología y geotecnia, ya que anteriormente, en algunos casos, se procedía a realizar las operaciones de forma intuitiva. Actualmente, el porcentaje de los costes de almacenamiento de los residuos de las plantas con respecto a los costes totales de operación en éstas están

próximos al 20 %, por lo que en bastantes proyectos el impacto sobre la viabilidad económica es muy importante.

Por otro lado, dos factores que han contribuido notablemente a la mejora en el diseño y operación de las presas son los derivados de las exigencias de seguridad y protección ambiental. Con relación al primero, en el pasado se han producido desgraciados accidentes con elevado número de pérdidas humanas y materiales debido a las roturas de las presas con grandes avalanchas de lodos y fangos. Con respecto al segundo, se ha visto la necesidad de preservar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas durante el tiempo de operación de la presa y después de su abandono, así como la de la restauración de los terrenos.

Los factores que influyen en la elección de la ubicación y el diseño de las presas de residuos son de muy diversa índole y quedan recogidos en la Tabla 4.I. A continuación, se comentan los más importantes.

2. FACTORES LOCALES DE UBICACION

En el pasado, las presas se construían en áreas que se seleccionaban siguiendo únicamente dos criterios: condiciones topográficas favorables y proximidad a las plantas de tratamiento, pero hoy en día para satisfacer ciertos requerimientos ambientales y de seguridad intervienen otros factores tales como la geología, el clima, la hidrología superficial y la disponibilidad de terrenos. Tabla 4.I.

TABLA 4.I. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA UBICACION Y DISEÑO DE LAS PRESAS DE RESIDUOS

FACTORES LOCALES	CARACTERISTICAS DE LOS LODOS	CARACTERISTICAS DE LOS AFLUENTES	LIMITACIONES AMBIENTALES
<ul style="list-style-type: none"> — Geología. — Sismicidad. — Topografía. — Red de drenaje. — Condiciones del agua subterránea. — Precipitaciones. — Evaporación. — Disponibilidad de terrenos. — Precio de los terrenos. 	<ul style="list-style-type: none"> — Producción de residuos. — Granulometría. — Contenido en arcilla. — Composición química. — Método de vertido. — Densidad de los lodos. — Lixiviabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> — Características químicas: <ul style="list-style-type: none"> • pH. • Cationes metálicos. • Potencial de oxidación/reducción. • Toxicidad. — Producción de efluentes. — Capacidad de circulación. — Necesidades de evaporación. 	<ul style="list-style-type: none"> — Calidad del aire. — Calidad de las aguas superficiales. — Calidad de las aguas subterráneas. — Requerimientos de restauración. — Drenaje del agua superficial.

Una herramienta muy útil es la constituida por los ábacos de Capacidad-Altura Fig. 4.1. en los cuales puede determinarse para una determinada superficie ocupada la altura que corresponde a cada volumen de residuos almacenados y el ritmo de elevación de la estructura.

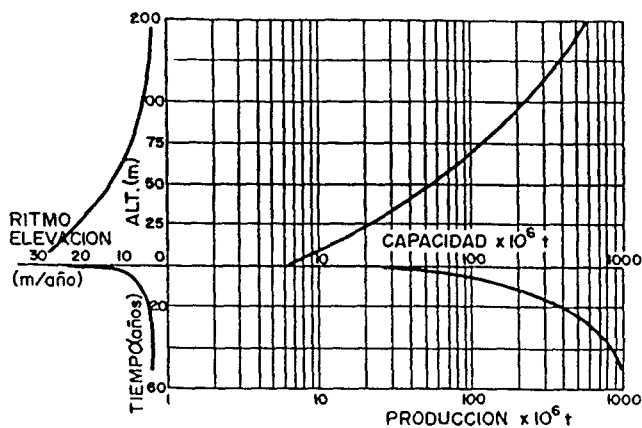


Figura 4.1. Ejemplo de ábaco de Capacidad-Altura de una presa de residuos.

2.1. Topografía

Es un factor básico ya que gobierna la altura y dimensiones de las presas de residuos. El terreno puede ser muy llano, con lo cual se precisará un dique perimetral, o muy escarpado formando vaguadas en forma de U o V, donde se necesitarán diques de cierre transversales. La pendiente de los terrenos influirá en el ritmo de crecimiento de las presas y la altura máxima alcanzada. La topografía también marcará las dimensiones del área de drenaje superficial que será afectada por el depósito de residuos. Con vistas a evitar los efectos erosivos por posibles avenidas, los lugares más apropiados para la ubicación deben estar próximos a las cabeceras de las cuencas de recepción. En caso contrario, se dispondrá de la oportuna red de canales de protección rodeando a las presas de residuos.

2.2. Tamaño

En terrenos relativamente llanos que requieren diques en tres o cuatro lados, el tamaño de las presas está gobernado por el precio de los terrenos, la necesidad y el coste de la impermeabilización y de la restauración final.

Por ejemplo, si las condiciones del lugar no requieren un revestimiento impermeable, los terrenos son relativamente baratos, y la restauración no precisa de una cubierta de material importante, las presas pueden construirse económicamente ocupando grandes superficies (e.g. Desde 100 ha hasta 400 ha). Sin embargo, cuando se necesita una capa de arcilla o cualquier otro material plástico y una cubierta de tierra vegetal importante para la restauración (tal es el caso de las presas en minas de uranio donde se precisa un mínimo de 3 m), o si el precio de los terrenos es alto, entonces será más efectivo económicamente ocupar áreas más pequeñas (20 a 80 ha) y disponer esas estructuras con mayor altura. En este caso, el ta-

maño mínimo de las presas está limitado por las necesidades de evaporación.

Para las presas en valle, la superficie del área ocupada y la altura de esas construcciones dependerá fundamentalmente de la capacidad total de almacenamiento y evaporación que se precisen. En algunos casos será más económico construir una serie de presas, aguas arriba o aguas abajo, mejor que una sola de mayor tamaño. Fig. 4.2.

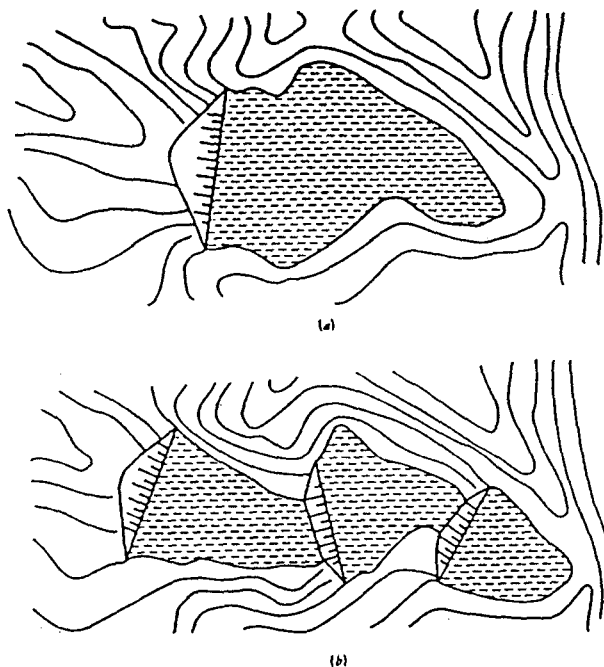


Figura 4.2. Disposición de los estériles en una sola presa (a) o en una serie de presas aguas abajo (b).

2.3. Geología y sismicidad

Al construirse una presa debe considerarse la sismicidad del área y la proximidad a fallas potencialmente activas. Si existe un riesgo sísmico deberá evaluarse el comportamiento dinámico de las presas y el riesgo de rotura por licuefacción. El fenómeno de licuefacción generado por un movimiento vibratorio provoca una elevación de las presiones de poro, ya que el peso de los materiales soportados se transfiere al agua intersticial que existe entre las partículas, y los sólidos se comportan como un fluido denso con una resistencia al corte muy pequeña o nula, haciendo que presas que son estables en condiciones estáticas no lo sean en condiciones dinámicas. Estos problemas potenciales deben ser objeto de consideración y estudio.

Otros factores geológicos y geotécnicos que deben considerarse son los relativos a la disponibilidad de materiales de construcción, la capacidad portante y de drenaje de la base de apoyo y cualquier riesgo geológico que pueda acaecer en las proximidades de las presas.

2.4. Permeabilidad

La permeabilidad o conductividad hidráulica de la cimentación del dique y substrato de apoyo de un depósito

de estériles puede tener un peso importante sobre los costos de construcción y conveniencia de un área si el drenaje de los efluentes es inadecuado desde un punto de vista ambiental. Es obvio, que las áreas localizadas en formaciones poco permeables son mejores que aquellas donde las filtraciones pueden ser altas.

2.5. Otros factores locales

Las precipitaciones anuales y la evaporación influyen sobre la cantidad de agua almacenada en las presas. Estos factores se deben considerar también junto con los anteriores.

La disponibilidad de los terrenos y el precio de éstos es preciso tenerlos en cuenta en la selección y dimensionamiento del área a ocupar. En ocasiones, se pierde mucho tiempo en las negociaciones y resolución de esos problemas cuando los mejores terrenos caen fuera de las propiedades que posee la compañía minera.

3. CARACTERISTICAS DE LOS LODOS

Uno de los aspectos que diferencia una presa de tierra convencional de una presa de residuos, es que estos últimos materiales pueden usarse para construir el propio dique o parte de él. Desde un punto de vista económico esto es ventajoso, siempre que los lodos tengan unas propiedades físicas y químicas adecuadas.

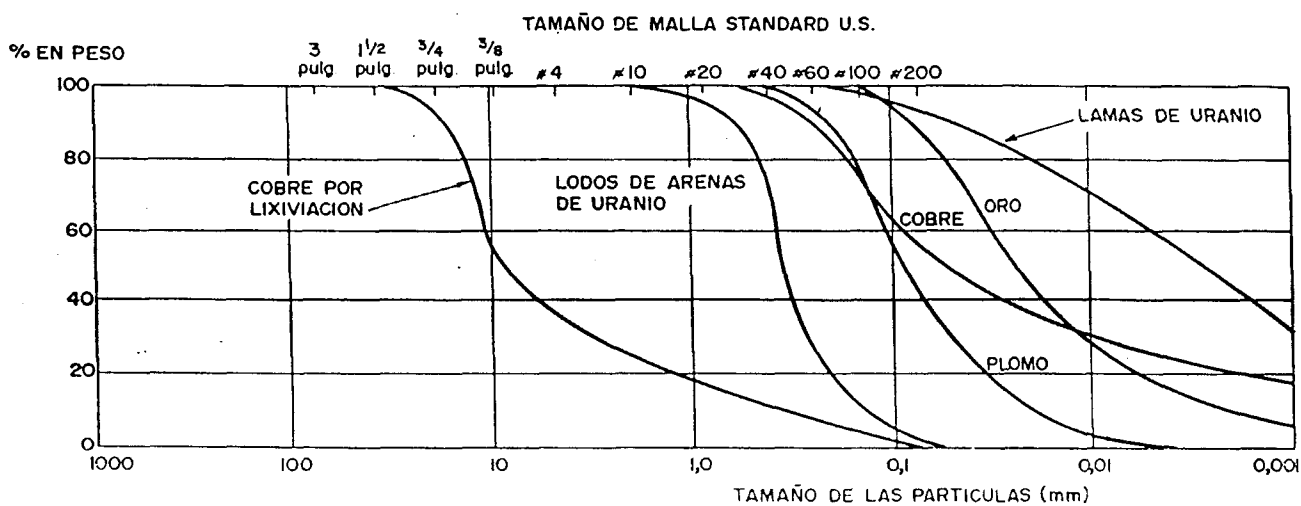
La característica más importante de los lodos es el tamaño de las partículas sólidas, ya que determina sus posibilidades de aprovechamiento. La granulometría depende del proceso mineralúrgico empleado para concentrar o extraer los minerales. Por ejemplo, para minerales de oro en plantas de tratamiento convencionales, donde el grado de molienda necesario para su liberación suele ser alto, más del 90 % de las partículas tienen un tamaño inferior a 0,1 mm. En el otro extremo, se encuentran algunas ope-

raciones de mineral de cobre, e incluso oro, donde el metal se recupera por lixiviación en eras, dejando los residuos con una granulometría gruesa semejante a una grava. En la mayoría de los casos los estériles producidos presentan tamaños de partículas finas en el rango de las arcillas y limos. Fig. 4.3.

Normalmente, los lodos se transportan de forma hidráulica con concentraciones de sólidos entre el 15 y el 60 % en peso. La concentración de esas pulpas y el método de vertido afectan a la separación y sedimentación de los residuos en las presas. En la descarga convencional las partículas más gruesas o arenas se depositan rápidamente formando una playa junto al dique, si ahí se encuentran los puntos de descarga, y el resto de las partículas finas fluyen como lamas hacia el interior de la presa. En general, los residuos del tipo arena constituyen un material de construcción resistente con unas buenas características de drenaje. Las lamas (partículas inferiores de 0,1 mm) presentan permeabilidades muy bajas y pequeñas resistencias al corte que las hacen inservibles para la construcción de las presas.

Aunque las arenas de los residuos no constituyen el material ideal, es el más barato económicamente y el que se encuentra disponible a una menor distancia de transporte. Su uso en la construcción de las presas reduce el volumen de material que debe almacenarse en las mismas. Algunos de los inconvenientes que plantea su aprovechamiento son los relacionados con la licuefacción y erosión. Sin embargo, éstos pueden eliminarse mediante un diseño y procedimiento constructivo adecuado, como se comentará más adelante.

Excepto con los materiales muy finos, es posible separar la fracción más gruesa de los lodos usando la segregación hidráulica natural o ciclones. Los ciclones son centrifugadoras hidráulicas que se colocan en los extremos de las líneas de transporte de los residuos y proporcionan grandes cantidades de arena que se emplea en la propia construcción de los diques. En algunos casos, es deseable minimizar la segregación de las arenas con vistas a



ESCOLLERA	GRAVAS		ARENAS			LIMOS Y ARCILLAS
	GRUESAS	FINAS	GRUE.	MEDIAS	FINAS	

Figura 4.3. Curvas granulométricas tipo para diferentes minerales tratados.

mejorar las características drenantes de los lodos más finos y su propiedades resistentes. Esto puede ir acompañado de una reducción del porcentaje de agua en la descarga de los lodos, de forma que se evite en cierta medida la segregación de las arenas.

Las características químicas y de degradabilidad de los residuos también juegan un papel importante en el diseño de las presas. Por ejemplo, algunas fracciones gruesas, inicialmente, pueden presentar una alta resistencia y buenas características de drenaje, pero, si se degradan rápidamente convirtiéndose en una material arcilloso el comportamiento es totalmente contrario. En otros casos, las partículas, a pesar de ser finas, pueden llegar a cementarse y a mejorar sus propiedades geotécnicas a través de reacciones geoquímicas. Estas reacciones se producen entre los constituyentes de los lodos, o entre los lodos y el material del dique de la presa o de los suelos naturales y el aire, pudiendo afectar al diseño tanto en los aspectos físicos como ambientales. Estos fenómenos pueden ocurrir de forma inmediata o lentamente con el transcurrir del tiempo. En cualquier caso, estos cambios deben tenerse en cuenta, sobre todo para aquellos residuos que potencialmente son más tóxicos.

4. CARACTERISTICAS DE LOS EFLUENTES

La cantidad de efluentes y sus vertidos son factores importantes en el diseño y operación de una presa de residuos. En algunas situaciones, se pueden recircular todos los efluentes para volverlos a utilizar en los procesos de tratamiento. En esas plantas, la concentración de sólidos en las pulpas puede ajustarse para optimizar los métodos de descarga y transporte. Sin embargo, en muchas operaciones no es posible reutilizar todos los efluentes debido a la existencia de contaminantes químicos, siendo entonces necesario proceder a la evaporación del agua o al tratamiento de la misma. Cuando la evaporación es el único medio de eliminación de los efluentes, este factor será el que marque el tamaño de la presa, más que el volumen de residuos a almacenar. En algunos casos, una solución viable es la de disponer de una balsa de evaporación separada.

La pendiente de los taludes de los depósitos pueden ser controlada variando la granulometría, espesando las pulpas, y por el método de descarga (con uno o varios caños múltiples). Taludes con inclinaciones mayores pueden conseguirse densificando los residuos vertidos y si se desea lo contrario añadiendo agua a la tubería de descarga. Así pues, la variación del porcentaje en sólidos constituye un método eficaz y flexible en el control de la forma y disposición de los estériles en las presas de residuos. Si por cualquier circunstancia cambiaran las características de los minerales o los procesos de tratamiento, se evaluará el impacto producido por el cambio en los tamaños de los sólidos en los lodos.

Por otro lado, las características químicas de los efluentes es un factor que puede afectar tanto a la ubicación como al diseño de las presas, siendo particularmente importante el sistema de drenaje. En muchos tratamientos mineralúrgicos los efluentes tienen pH bajos y una concentración muy alta de iones metálicos móviles. También es frecuente la presencia de altas concentraciones de

aniones disueltos, tales como nitratos, sulfatos y cloruros. Son raros los casos con pH básicos.

Cuando los efluentes contengan algunos metales tóxicos, compuestos radiológicos o elementos potencialmente peligrosos las superficies de apoyo deberán revestirse para minimizar las filtraciones. En las propias presas suele producirse una disminución de la concentración de sustancias indeseables, debido a las precipitaciones y reacciones de oxidación. Además, la reacción con los suelos y rocas naturales ayuda de forma significativa a controlar el nivel de contaminación. Tal es el caso de los efluentes en plantas de uranio, que son muy ricos en metales tóxicos, con pH bajos y que contienen radionucleidos, que al hacerlos pasar por suelos relativamente ricos en calcio son capaces de amortiguar, por un lado el pH y por otro lado, de absorber a los metales pesados y a los radionucleidos. Sin embargo, algunos de los aniones, tales como sulfatos, nitratos y cloruros no son controlados y, pueden llegar a crear problemas de calidad de las aguas. A veces, es necesario llegar a considerar los cambios que pueden producirse a largo plazo en la química de los efluentes, por la lixiviación u oxidación de los lodos almacenados en las presas abandonadas o clausuradas.

Cuando es imperativo disponer de un nivel de base impermeable, las características químicas de los efluentes puede jugar un papel importante en la elección del material a utilizar. Se ha comprobado que los compuestos orgánicos pueden atacar a los revestimientos de arcilla a base de montmorillonita.

5. CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE LAS PRESAS DE ESTERILES

Sin entrar en las características constructivas de los diferentes tipos de presas, ya que se sale del ámbito de esta obra se cometen seguidamente algunos aspectos de interés.

Siempre que sea posible se deben utilizar en la construcción de estas estructuras los propios residuos, ya que es el material más barato. Tal como se mencionó anteriormente, el diseño de una presa de lodos difiere de una presa convencional en dos aspectos; primero, la construcción se realiza por etapas, reduciéndose así la inversión inicial, y segundo, si los residuos son empleados en la construcción, la planta de tratamiento tiene que operar durante un período de tiempo dado para producir el material necesario. Por esta razón, el dique inicial se construye con estéril de la propia mina o con materiales de una cantera, efectuándose después los recrecimientos con los residuos de la planta o con esos mismos materiales.

Básicamente, existen tres tipos de presas de residuos que son denominadas, desde el punto de vista de su construcción, como hacia aguas arriba, hacia aguas abajo y centrales.

En la Tabla 4.II. se comparan los diferentes tipos de presa de residuos.

5.1. Construcción hacia aguas arriba

Es el método más ampliamente utilizado en el pasado y en la actualidad. Tal como se muestra en la Fig. 4.4 una vez construido el dique inicial se van levantando diques

TABLA 4.II. COMPARACION DE LOS METODOS CONSTRUCTIVOS DE PRESAS DE RESIDUOS

Método de construcción	Características de los lodos	Procedimiento de descarga	Capacidad para almacenamiento de agua	Resistencia sísmica	Ritmo de elevación aconsejado	Material de los diques	Coste relativo
Presa convencional de escollera.	Adecuada para cualquier tipo de lodos.	Cualquiera.	Buena.	Buena.	Dique entero construido inicialmente.	Escollera y suelos naturales.	Alto.
Aguas arriba.	Al menos del 40 al 60 % de sólidos. Baja densidad de la pulpa para favorecer la segregación de las partículas.	Descarga periférica y controlada.	Mala.	Mala.	Menor de 4,5 a 9 m/año. Mayor de 15 m/año es peligroso.	Arenas de los lodos. Estériles de mina y suelos naturales.	Bajo.
Aguas abajo.	Adecuado para cualquier tipo de lodo.	Varía de acuerdo al diseño.	Buena.	Buena.	Cualquiera.	Arenas de los lodos o estériles de mina, si se producen en cantidades suficientes, o suelos naturales.	Alto.
Centrada.	Arenas o limos de baja plasticidad.	Descarga periférica desde la playa nominal necesaria.	No recomendado para almacenamiento permanente. Aceptable para inundaciones temporales con diseño constructivo adecuado.	Aceptable.	Puede limitarse la altura de recrecimientos individuales.	Arenas de los lodos o estériles de mina, si se producen en cantidades suficientes o suelos naturales.	Medio.

sucesivos ligeramente retranqueados respecto a los anteriores y hacia el interior de la presa. Esos diques se forman, por lo general, con los sedimentos gruesos de los lodos que se separan de estos por decantación natural o por ciclonado. Este último sistema permite un mayor control de la granulometría de las arenas.

Los residuos arenosos que configuran la playa constituyen en cada recrecimiento de la presa la base de apoyo o cimentación de los diques sucesivos, por lo que es importante que exista un porcentaje elevado de partículas gruesas; aunque existen algunas excepciones.

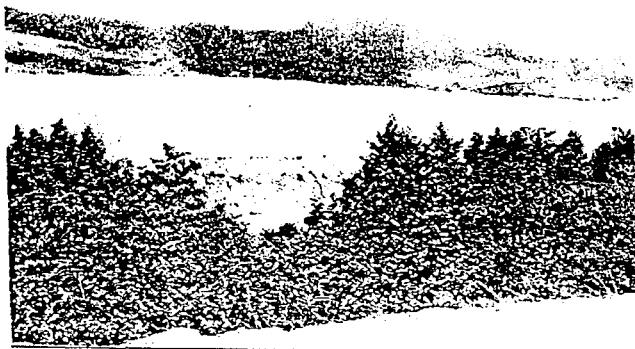


Foto. 4.1. Presa de residuos construida por el método de aguas arriba.

Este sistema constructivo, siempre que los residuos puedan clasificarse en diferentes granulometrías, es el más económico ya que es el que requiere un menor vo-

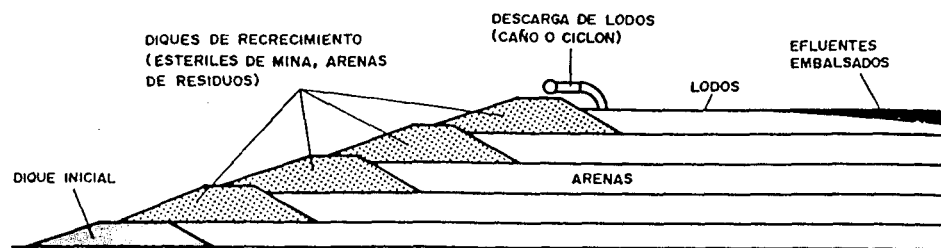
lumen de material que debe ser transportado para contruir los diques y el que ocupa menor superficie para una capacidad de almacenamiento dada. No obstante, al estar construido el dique por materiales de baja compacidad y resistencia con un nivel freático elevado se deben adoptar taludes bastante tendidos y recurrir a medidas tales como: ensanchamiento del dique mediante el extendido de las arenas de la playa entre dos caballones, la intercalación de capas dren y tubos drenantes, la compactación de las arenas, etc.

Quando los residuos sean muy finos el éxito de este método de construcción dependerá del ritmo de elevación del dique y del talud general de éste, pues si el recrecimiento es muy rápido las presiones de poro serán muy elevadas y pueden dar lugar a problemas de estabilidad. También en áreas donde exista cierta actividad sísmica este método deberá compararse con otros, pues es el más susceptible frente a fenómenos de licuefacción.

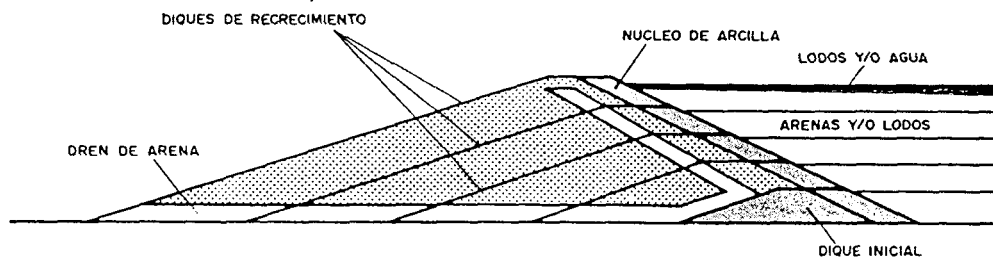
5.2. Construcción hacia aguas abajo

Como el nombre indica, este método de construcción consiste en la elevación de la presa mediante diques sucesivos de estériles que avanzan en la dirección de aguas abajo. Es el sistema más seguro de almacenamiento de residuos y el que más se asemeja a las presas de tierra convencionales, aunque en este caso se construyen por etapas. Es por esto, que en algunos países es el tipo de presa preferido por la Administración y Organismos Oficiales.

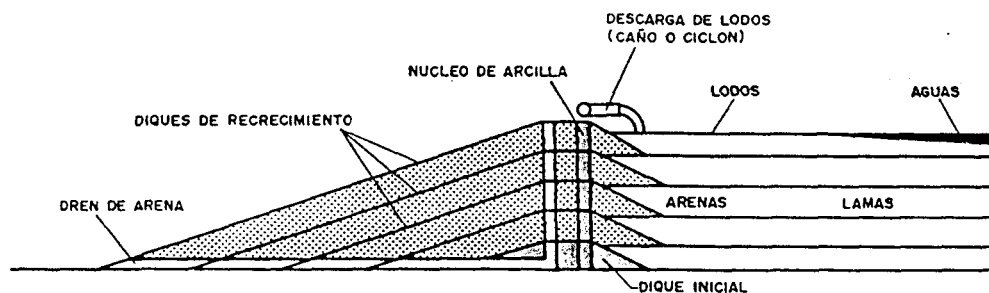
El dique inicial se construye normalmente con materiales naturales, disponiendo en algunos casos de núcleos impermeables y elementos de drenaje para el control del nivel freático y filtraciones. Los recrecimientos subsiguientes se efectúan con las arenas de los residuos cicladas,



a. METODO DE CONSTRUCCION HACIA ATRAS O AGUAS ARRIBA



b. METODO DE CONSTRUCCION HACIA ADELANTE O AGUAS ABAJO



c. METODO DE CONSTRUCCION CENTRADO

Figura. 4.4. Métodos constructivos de presas de residuos.

con suelos de recubrimiento o con estériles de mina. Este método, desde el punto de vista de estabilidad, no depende de las características hidráulicas de los residuos o efluentes, siendo por ello el que permite el almacenamiento de cualquier tipo de residuo. Por esto, para lodos con partículas muy finas y en áreas donde las precipitaciones superan a la evapotranspiración este tipo de construcción es el más utilizado. También se recomienda este diseño en zonas con actividad sísmica, ya que los materiales de la estructura del dique pueden compactarse y el nivel freático puede controlarse mejor.

El principal inconveniente de las presas construidas hacia aguas abajo es que se necesitan grandes volúmenes de material de relleno y el incremento de estos en cada recrecimiento sucesivo. Por esto, se debe planificar cuidadosamente los volúmenes de materiales que estarán

disponibles durante las últimas etapas, particularmente si se van a utilizar las arenas de los residuos ciclados o los estériles de la mina.

5.3. Construcción centrada

Este método es esencialmente una combinación de los dos anteriores, realizándose los recrecimientos sucesivos mediante mantos de dique cuyos centros se mantienen sobre la misma línea vertical. Normalmente, los lodos se descargan desde la coronación de la presa para mantener una playa y evitar el encharcamiento junto al talud del dique. Los materiales empleados suelen ser los mismos que se han citado para el método anterior, pudiendo disponerse también de núcleos impermeables y drenes en la

estructura del dique. La estabilidad sísmica es mejor que en el diseño hacia aguas arriba, pero peor que hacia aguas abajo y las necesidades de estériles para la construcción es intermedia entre ambos métodos. Fig. 4.5.

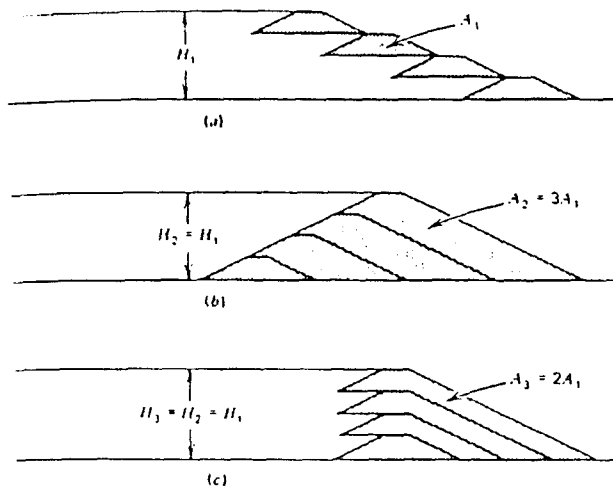


Figura 4.5. Areas de los diques de recremento en los diferentes métodos constructivos.

5.4. Otros métodos de construcción

En la última década se han desarrollado otros métodos de almacenamiento de residuos entre los que caben destacar: el método de descarga espesada y el método de deposición en huecos mineros y cavidades.

A. Método de descarga espesada

Consiste en espesar los lodos hasta que alcancen una elevada viscosidad, con una concentración de sólidos entre el 55 y el 65 %, y descargarlos en un solo punto o línea de puntos, de manera que los residuos formen un depósito en forma de cono con unos taludes cuyas pendientes oscilan entre el 2 y el 8 % (dependiendo de la viscosidad y granulometría de las partículas). Los residuos son depositados como una mezcla homogénea, mejor que segregada, de arenas y lamas. Si el cono es construido en el centro del área de vertido, será preciso construir alguna pequeña presa para recoger los efluentes. Si el cono se ubica al final de un valle estrecho, podrá conseguirse una capacidad adicional de almacenamiento al actuar los residuos como dique de contención.

Los principales inconvenientes que plantea este método son: por un lado, aunque se eliminan los costes de construcción de los diques existe un sobrecoste debido al espesado y bombeo de los lodos; también, como no pueden almacenarse los efluentes, se requiere la construcción de algunas presas de decantación y evaporación. Durante la operación este método es altamente susceptible de procesos de inestabilidad y corrimientos bajo condiciones sísmicas, ya que se produce la licuefacción de los residuos. Como problemas adicionales cabe citar la gran superficie de terreno de que es preciso disponer y el volu-

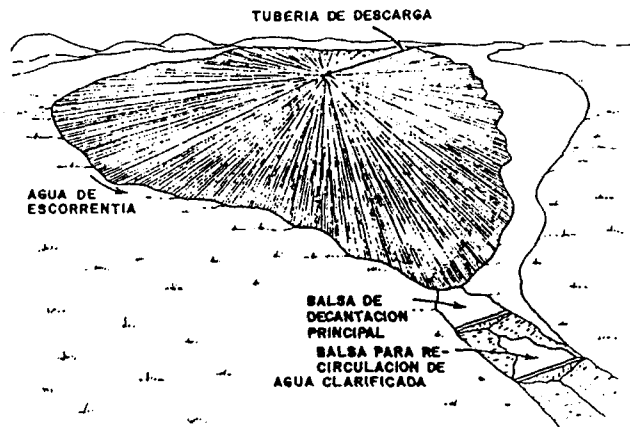


Figura 4.6. Método de descarga espesada. (Vich, S. G., 1983)

men de lodos que pueden arrastrar las aguas de escorrentía.

Por el contrario, este método reduce la contaminación del aire por el polvo producido por el viento al incidir sobre las superficies expuestas, ya que los taludes permanecen permanentemente húmedos, y proporciona formas de las estructuras que son más fáciles de integrar en el paisaje.

B. Método de deposición en huecos mineros y cavidades

Como consecuencia de la explotación de determinados minerales se ha pasado a considerar los huecos de minados antiguos y contemporáneos como zonas preferentes para ubicar bajo la superficie los residuos de las plantas. Esos huecos bien pueden ser los de labores subterráneas efectuadas en las proximidades de los yacimientos en explotación, como los de las minas a cielo abierto ya abandonadas. En todos los casos, es preciso efectuar un exhaustivo estudio hidrogeológico para evaluar el impacto ambiental producido por las filtraciones de los efluentes en los acuíferos de la zona.

En ocasiones, se practican excavaciones ex profeso para depositar en ellas los lodos. La técnica más económica es la de desmonte-terraplén, similar a la que se utiliza en los vertederos controlados de basuras urbanas. El material de la primera excavación es apilado y a continuación se vierten en el hueco los residuos. Los estériles de la segunda excavación se extienden sobre los residuos depositados en la primera para su posterior revegetación, y así sucesivamente; de este modo se evita la doble manipulación del material excavado.

5.5. Otras consideraciones de diseño

Los niveles del agua subterránea o superficies freáticas de los efluentes dentro de las presas y en los diques tienen una influencia muy importante en la estabilidad de esas estructuras y en su comportamiento bajo condiciones estáticas y dinámicas. La predicción de las posiciones de las superficies freáticas en las presas es un trabajo complejo. Inicialmente, los niveles se encuentran muy

bajos como consecuencia del drenaje natural a través de los suelos de cimentación. Sin embargo, con el tiempo la deposición de los lodos reduce la permeabilidad vertical y se fuerza a que los efluentes se desplacen horizontalmente elevándose así el nivel de filtración en el dique. En muchos casos, esto crea empujes que llegan a afectar a la estabilidad de las presas.

La precipitación de sustancias debidas a las reacciones químicas que tienen lugar en las presas pueden llegar a reducir el drenaje, no solamente a través del suelo natural, sino incluso en los drenes construidos en los diques al colmatarse los huecos intersticiales.

Otros aspectos que deben tenerse en cuenta en la construcción de presas de residuos son los problemas operativos. Las características de las estructuras pueden cambiar a lo largo del tiempo al variar la densidad de las pulpas, la granulometría de las partículas en los lodos, la composición de los minerales, las condiciones climatológicas o los ritmos de producción.

6. RESTAURACION Y ABANDONO DE PRESAS DE RESIDUOS

Al igual que en otros trabajos de restauración de terrenos afectados por las actividades extractivas, los objetivos que se persiguen en el caso de las presas de residuos son los siguientes:

- Estabilidad de las estructuras, a largo plazo.

- Protección frente a los procesos erosivos a largo plazo.
- Prevención de la contaminación ambiental.
- Acondicionamiento para la recuperación y abandono de presas.
- Puesta en uso productivo de los terrenos recuperados.

6.1. Estabilidad de las estructuras a largo plazo

La diferencia principal en las condiciones de estabilidad de una presa durante el período de operación y después de su abandono se encuentra en la situación del nivel freático. Generalmente, cuando cesa el vertido de residuos y no existe un aporte de agua exterior los niveles freáticos caen drásticamente, lo cual se traduce en una mejora sustancial de la estabilidad de los taludes. En principio, cualquier presa que fuera estable durante el período de construcción lo seguirá siendo tras el cese de las operaciones.

No obstante, podrá recurrirse a todo un conjunto de medidas correctoras, Fig. 4.7, si en algún momento se viera que las condiciones de estabilidad no son las adecuadas.

El primer procedimiento (a) consiste en la descarga parcial del material de coronación con vistas a reducir las tensiones en la base del dique, esto sólo es posible si el citado dique tiene unas dimensiones importantes. Otra técnica consiste en el aprovechamiento de ese material colocándolo como refuerzo al pie de la presa sobre una capa filtro (b), al mismo tiempo que se reduce la pendiente del

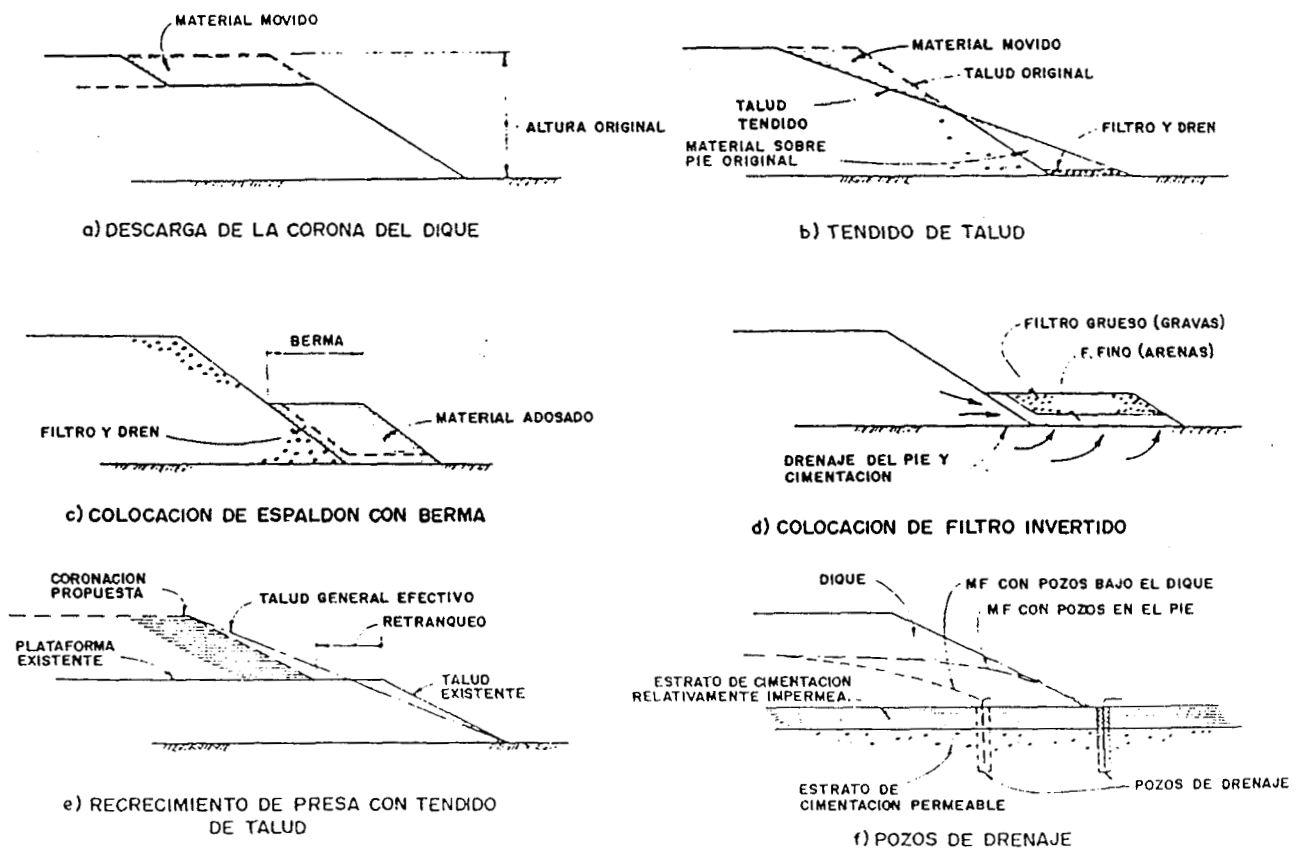


Fig. 4.7. Medidas correctoras para mejorar la estabilidad de los diques en las presas de residuos. (CANMET, 1977)

talud. También es posible proceder al refuerzo del dique adosando escombros sobre una capa dren creando bermas intermedias (c) y a la colocación de filtros invertidos para facilitar el drenaje en la base y cimentación del dique (d). Por último, otros dos procedimientos consisten en el recrecimiento dejando bermas durante la operación (e) que facilitan el tendido del talud general y la depresión de los niveles freáticos mediante sondeos, drenes horizontales a distintas alturas, etc.

Como dentro del proceso de abandono de una presa de residuos está el modelado de la misma, es aconsejable que se aprovechen en ellos los materiales que se empleen para su estabilización. Lo ideal, desde el punto de vista de la restauración, es disponer de suficiente estéril de relleno para conseguir unos perfiles suaves, Fig. 4.8.a, esto no siempre es fácil o económico, por lo que suele adoptarse el método alternativo, Fig. 4.8.b, que consiste en adosar a los taludes espaldones de escombros granulares y escollera.

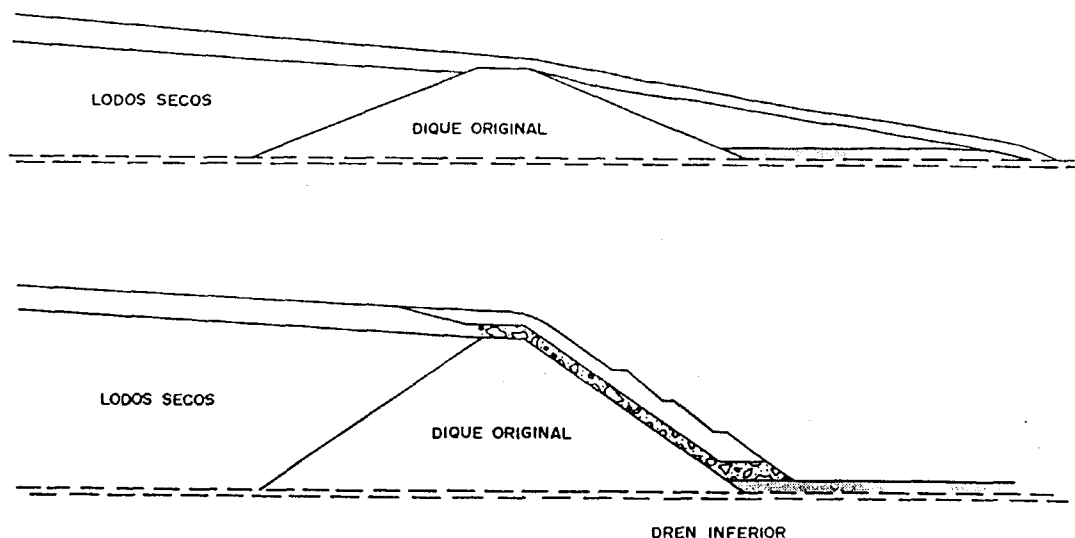


Figura 4.8. Secciones de presas preparadas para la revegetación.

En cuanto a la estabilidad sísmica, cabe decir que en el primer caso las condiciones son más favorables, ya que al no estar saturados los residuos el riesgo de licuefacción de los mismos es mucho menor. Esto se ha puesto de manifiesto en Chile en los depósitos de residuos de minas de cobre abandonadas que han resistido numerosos terremotos.

Las principales causas de inestabilidad de las presas abandonadas son de tipo hidrológico. La acumulación repentina del agua de lluvia puede provocar la rotura del dique por desbordamiento o por erosión en el pie del mismo. Aunque una presa sea segura, desde el punto de vista hidrológico, durante la vida operativa de la misma, no significa que lo sea indefinidamente después de su abandono. Si se considera el empleo de una presa con una vida de 30 años que se ha diseñado para un período de retorno de inundación de 1.000 años, la probabilidad de rotura es del 3 %. Para los 500 años siguientes esa probabilidad se eleva al 40 %. Por este motivo, sería deseable que las presas se diseñaran con el criterio de Inundación Máxima Probable (IMP) más que con un período de

retorno dado. Esto puede resultar inviable desde un punto de vista económico, pero pone de manifiesto la necesidad de mantener y en algún caso de complementar las obras de drenaje.

Debe evitarse la acumulación del agua de lluvia sobre la superficie de la presa. Para ello, se cubrirán los depósitos, sobre todo donde exista alguna depresión, para alcanzar pendientes de drenaje entre el 0,5 y el 1 %.

6.2. Protección frente a los procesos erosivos a largo plazo

Los depósitos de residuos mineros son susceptibles de erosionarse formando surcos y cárcavas bajo la circulación de lluvia por las superficies. También la erosión eólica es en estos casos muy importante, ya que puede dar lugar con el tiempo a un desplazamiento del material como si de una duna de arena se tratara.



Foto 4.2. Antigua presa de residuos sin revegetar expuesta a la erosión por los agentes atmosféricos.

La erosión por acción del viento incide más sobre las superficies planas de las presas, mientras que la de tipo hídrico lo hace sobre los taludes. Para luchar contra esta

última el primer criterio que debe seguirse se basa en diseñar los taludes con unos ángulos bajos comprendidos entre 3:1 y 5:1 y, a continuación, adoptar alguno de los métodos de protección y estabilización que se comentan seguidamente.

Cuando se pretende restaurar una presa recién construida, la primera etapa consiste en drenar y desecar la misma hasta conseguir una superficie de los materiales firme y estable. Esto puede requerir períodos de tiempo muy dilatados dependiendo de las condiciones climatológicas, tamaño de balsa y naturaleza de los lodos. El secado puede ser simplemente por evaporación del agua o por el drenaje y bombeo del agua hasta una planta de depuración y posterior vertido.

El tiempo necesario para la desecación y consolidación de los lodos puede estimarse mediante el método propuesto por Krizek et al (1977).

Una vez superada esa etapa se procederá a la estabilización mediante uno o varios de los procedimientos siguientes: protección con escollera, estabilización química, o revegetación.

La cubrición con escollera es el método clásico que se emplea para estabilizar los taludes. El término escollera incluye no sólo los fragmentos rocosos más gruesos, sino incluso la grava y otros materiales como la escoria de fundición que a veces se han utilizado. En las Fig. 4.9 y 4.10 se representa el diseño de protección de una presa de residuos de uranio, donde incluso se tiene en cuenta el nivel de inundación máximo probable.

La estabilización química se usa fundamentalmente para evitar la formación de polvo por la acción del viento. En general, no puede considerarse como una protección permanente. Las sustancias que más se han empleado son: polímeros elastoméricos, lignosulfato cálcico (residuo de la pasta de papel), emulsiones asfálticas, silicatos sódicos y resinas sintéticas. Los costes de aplicación por hectárea varían entre las 60.000 y las 150.000 pesetas.

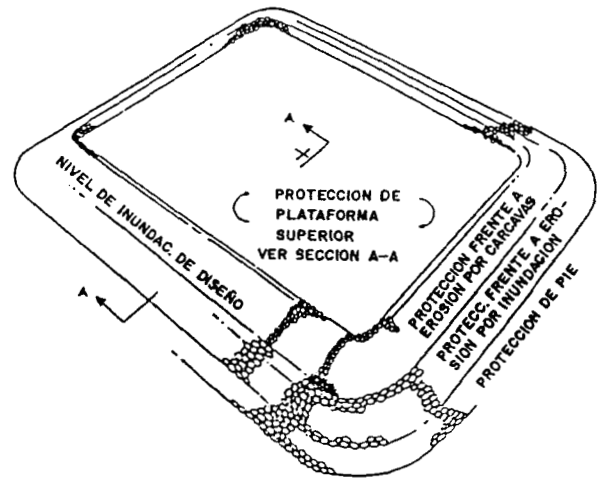


Figura 4.9. Configuración recomendada para la aplicación de escollera sobre una presa de residuos. (Walters, W. H., 1982)

El último procedimiento de estabilización, que es compatible con el anterior, consiste en la revegetación que, además de reducir la acción erosiva del agua y el viento, sirve para reintegrar paisajísticamente al entorno las presas de residuos y en ocasiones darles un uso posterior.

6.3. Prevención de la contaminación ambiental

Cuando disminuye el caudal de los efluentes de drenaje o cuando eventualmente cesan después de la descarga de lodos, deben tomarse medidas especiales de prevención en algunos casos. En particular, cuando los residuos contienen pirita al bajar el nivel freático se produce la oxidación de ésta, descendiendo el pH e incrementando la liberación de minerales contaminantes que son mu-

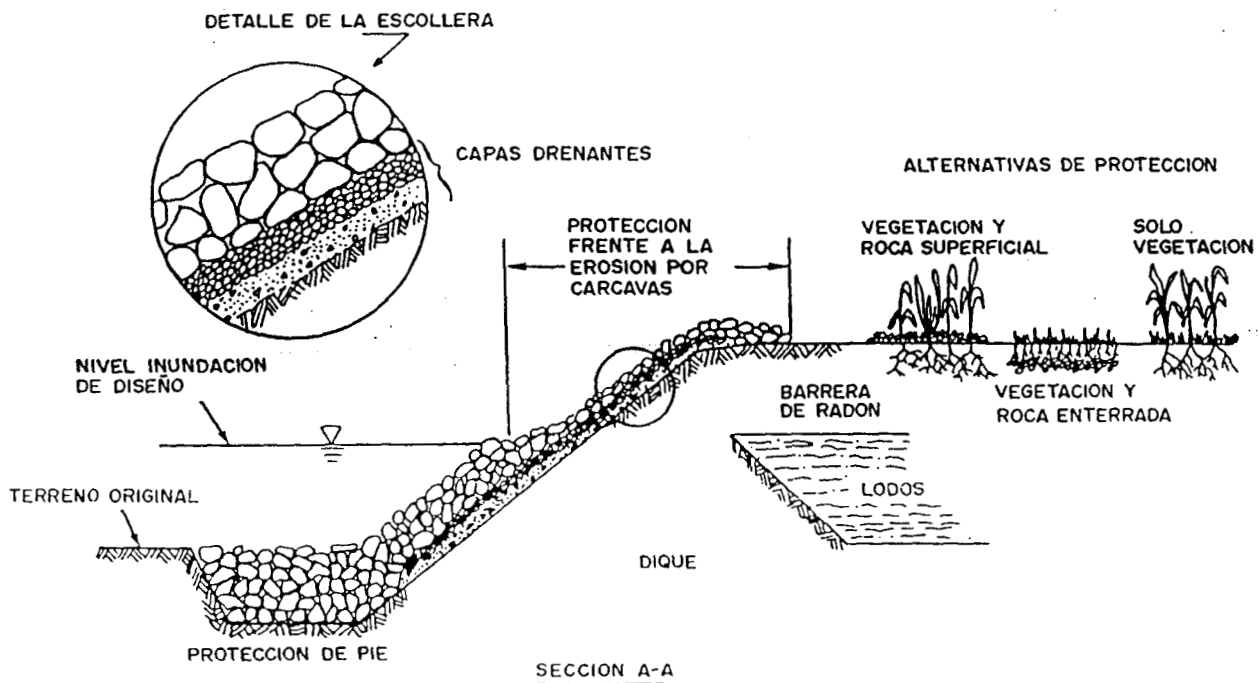


Figura 4.10. Sección transversal tipo de una presa de residuos. (Walters, W. H., 1982).

cho más nocivos, por lo general, que las sustancias presentes durante el período activo de la empresa. Como existe un riesgo de lixiviación de esos productos y, consecuentemente, de contaminación de las aguas subterráneas, a menudo se requiere la cobertura de las presas con una capa de arcilla antes del abandono, en combinación con la nivelación y afinado de las superficies para prevenir la formación de charcos. En el caso particular de lodos muy ricos en piritas puede ser interesante contemplar la posibilidad de mantener saturada la presa con el fin de evitar la oxidación a largo plazo.

Las presas de residuos de minerales de uranio constituyen un caso especial, ya que el elemento radiactivo Ra-226 produce potencialmente emanaciones gaseosas nocivas de Ra-222. La difusión del gas radón, no se produce cuando los lodos están saturados, pero sí después del abandono de las presas. Recientemente, se ha investigado el efecto de cubrir las presas con una capa de suelo (Re et al, 1980; Rogers y Nielson, 1981) comprobándose que el espesor necesario depende de la velocidad de emanación de radón, de la concentración de Ra-226 en los lodos, del tipo de suelo y de la humedad de éste a largo plazo.

Aunque en ocasiones las cubiertas necesarias de suelo no son importantes, en Estados Unidos la Comisión de Regulación Nuclear (1977) exige una capa mínima de 3 m de espesor para prevenir la emanación de radón a largo plazo después del abandono y restauración de una presa.

El movimiento ascensional de sales y metales tóxicos desde el subsuelo formado por los lodos consolidados de una presa hacia la superficie de la capa de suelo productiva extendida sobre éste es un fenómeno importante dentro de la revegetación y que se atribuye a la elevación capilar, aunque también colaboran otros procesos menos importantes como el de difusión (Merril et al, 1983).

Cuando las raíces de las plantas entran en contacto con esos compuestos contaminantes puede producirse la muerte de éstas o la inhibición de su desarrollo, de ahí que la elevación capilar deba tenerse en cuenta en los procesos de revegetación de las presas de residuos.

La altura de migración de las sustancias tóxicas depende de diversos factores tales como la textura del suelo, velocidad de percolación del agua, gradientes de concentración, lixiviación, tipos de minerales arcillosos, profundidad de suelo, tiempo de movilidad de iones, clima, etc. Aunque no es fácil predecir la magnitud de tales desplazamientos hacia la superficie se ha comprobado que son mucho más acusados en climas áridos que en climas húmedos, tal como se demuestra de forma indirecta por el pH de los suelos a diferentes profundidades.

En climas áridos la elevación de las sustancias solubles de los lodos varía desde los 10 cm hasta los 39 cm, dependiendo de las condiciones específicas de cada lugar (Barth, 1986). En climas húmedos las sales pueden llegar a migrar hasta 4 cm.

Como la elevación capilar es función del tamaño de los poros y de la tensión superficial, un método práctico para luchar contra ésta consiste en cubrir las presas con una capa de grava de forma que los poros resulten demasiado grandes para que se produzca el transporte de esas sales solubles y se forme así una barrera capilar.

Los espesores de las barreras varían de unos casos a otros entre 15 y 40 cm, según el tipo de residuo contami-

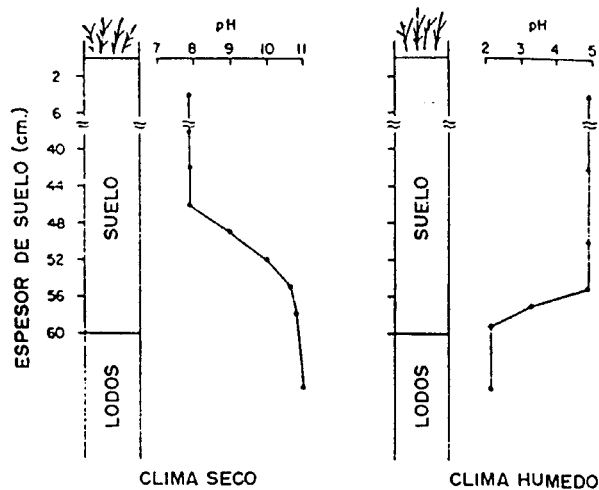


Figura 4.11. Variación del pH en los suelos de cobertura de presas de residuos según el clima (Barth, R. C., 1986).

nante de que se trate. La estabilidad o longevidad de las barreras depende de la posibilidad de movimiento de las partículas finas de material entre los huecos de las más grandes. La estabilidad será máxima cuando el material granular de cobertura siga el siguiente criterio:

$$C/F < 4$$

donde «C» es el tamaño de las partículas gruesas que se retienen después de dejar pasar por la malla el 15 % en peso del material y «F» es el tamaño de las partículas finas que quedan después de pasar el 85 % a través de la malla (Adergren, 1977). Si este criterio conocido por «Ratio de Oquedades» se cumple, la infiltración del material fino a través del lecho de grava o material grueso que forma la barrera capilar no se extenderá más allá de los 2 cm.



Foto 4.3. Creación de una barrera capilar con estériles gruesos sobre una presa de lodos secos.

Otro aspecto de la contaminación que se puede dar en una presa de residuos es el conocido como «transporte biológico», que tiene lugar por un lado cuando las plantas que constituyen la cubierta vegetal de esas estructuras son capaces de desarrollar suficientemente sus raíces

para alcanzar el nivel de los lodos. En estos casos se produce una transferencia a la superficie de ciertos constituyentes de los residuos tales como: selenio, molibdeno, radionucleidos y otros elementos nocivos que pueden pasar a la cadena de alimentación (Cline, 1979; Redente et al, 1985).

Este mecanismo de contaminación depende de las especies vegetales que se utilicen en la restauración, ya que por ejemplo las leguminosas a menudo concentran elementos traza debido a la profundidad que alcanzan sus raíces y a los procesos fisiológicos asociados con la fijación de nitrógeno.

Por otro lado, en algunas situaciones el transporte biológico lo llevan a cabo pequeños mamíferos mediante la ingestión de plantas, suelos o agua, y la inhalación de polvo o vapores emanados de los residuos. En Idaho, en una presa de estériles de uranio cubierta con una capa de suelo de 0,6 a 1,2 m de espesor, algunos roedores extrajeron hasta la superficie cantidades equivalentes a 173 Kg de suelo por hectárea y año. En cualquier caso estos mecanismos de contaminación son insignificantes comparados con los anteriores.

6.4. Acondicionamiento para la recuperación y abandono de presas

Una etapa importante en la recuperación de las presas, cuando no está previsto que se abandonen con una lámina de agua que las inunde permanentemente, es la de drenaje y consolidación. Los lodos se depositan con un alto contenido en agua y requieren, por lo general, un período de tiempo considerable hasta que se crea una costra superficial capaz de soportar las presiones de los equipos que se utilizan en la restauración. Algunos residuos, como los de arcillas fosfáticas son muy difíciles de drenar y precisan de 5 a 10 años para que se seque el material de la superficie, además no debe olvidarse que muchos de estos materiales en condiciones húmedas tienen un comportamiento tixotrópico que hacen desaconsejable su remoción y la circulación de maquinaria.

Cuando el drenaje natural de los lodos no es suficiente se pueden aplicar diversas medidas especiales para incrementar la capacidad portante de estos, entre ellas destacan: el vertido de estéril rocoso desde los bordes de la presa hacia el interior, la modificación del proceso de tratamiento y transporte de lodos, la adición de estériles puzolánicos a los residuos, la utilización de láminas geotextiles cubriendo total o parcialmente la presa en las zonas de acceso y el empleo de equipos de baja presión específica (< 35 MPa).

A efectos de tratamiento de consolidación, no debe olvidarse que las presas de residuos constituyen estructuras heterogéneas, pues los materiales se segregan y depositan con granulometrías muy distintas.

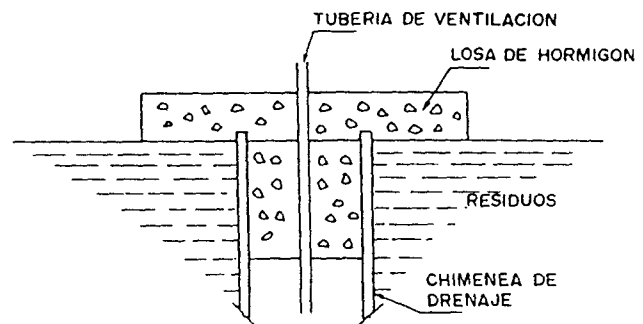
Por otro lado, las chimeneas de drenaje y tuberías de desagüe deben dejarse en unas condiciones tales que no constituyan un origen potencial de problemas derivados de su rotura o de riesgo para las personas y el medio ambiente.

Las obras que se pueden llevar a cabo para la clausura de una presa son las siguientes:

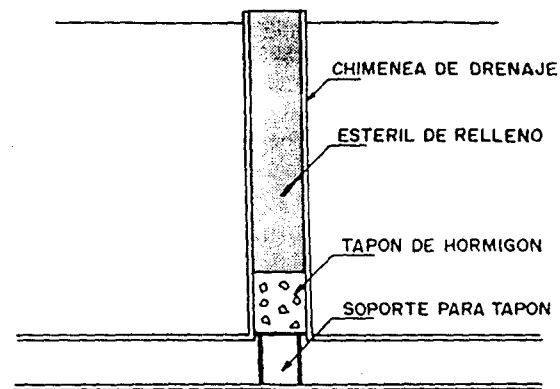
- Si el lugar es accesible para las personas y los ani-

males, y los lodos aún no están consolidados se cercará el área.

- La chimenea de drenaje podrá elevarse con el fin de evitar la entrada de agua durante las tormentas. Se aconseja que el nivel de rebose de la chimenea se calcule para una duración del aguacero de 24 horas y un periodo de recurrencia de 100 años.
- La chimenea de drenaje puede clausurarse de forma definitiva mediante el relleno con estéril y cierre en la superficie con una losa de hormigón Fig. 12.a. El cierre en el punto de conexión con la tubería de desagüe se conseguirá mediante una estructura soporte del relleno tal como se representa en la Fig. 4.12.b.



a) CIERRE SUPERIOR DE LA CHIMENEA DE DRENAJE



b) CIERRE INFERIOR DE LA CHIMENEA DE DRENAJE

Figura 4.12. Sistemas de cierre de las chimeneas de drenaje

- Si los lodos están sometidos a un proceso de arrastre y lavado y existe riesgo de contaminación por su salida a través de la tubería de desagüe se procederá al cierre de esta mediante un tapón filtro de grava y escollera. Fig 4.13.

Si los efluentes se prevén con pH ácido se recomienda que el material del tapón sea calizo para neutralizar las aguas.

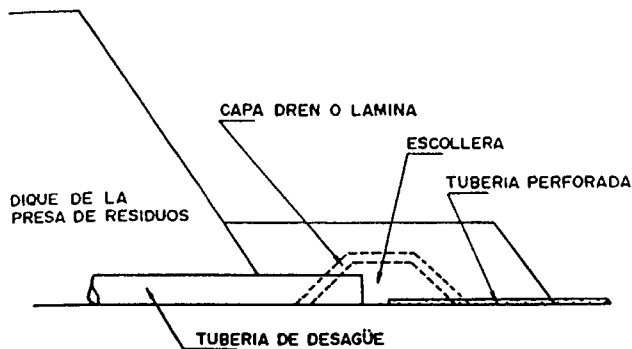


Figura 4.13. Cierre de tubería de desagüe con espaldón de escollera.



Foto 4.4. Presa de residuos restaurada.

6.5. Puesta en uso productivo de los terrenos recuperados

La definición del «uso productivo» influye de manera significativa en las formas de recuperar las presas de residuos.

Normalmente, el uso productivo se define a partir de los usos que poseen los terrenos que circundan a la mina, además de considerar la política seguida en la integración en el paisaje. La recuperación puede consistir entonces en la instalación de una simple cubierta vegetal protectora, utilizando especies autóctonas, hasta el aprovechamiento agrícola de los terrenos, si se dispone de un medio adecuado.

Si las actividades mineras continúan después del abandono de las presas, un uso productivo posible en muchos casos ha sido la recuperación de minerales a partir de los lodos depositados. Los cambios tecnológicos en los procesos mineralúrgicos y las cambiantes condiciones económicas hacen que los depósitos de residuos se revaloricen en el transcurso del tiempo llegando a ser rentable su reexplotación y aprovechamiento.

BIBLIOGRAFIA

- AYALA, F. J. y RODRIGUEZ, J. M.: «Manual para el Diseño y Construcción de Escombreras y Presas de Residuos Mineros». IGME, 1986.
- BARTH, R. C.: «Reclamation Technology for Tailing Impoundments» Colorado School of Mines, 1986.
- CALDWELL, J. A.: «The Use of Stage Curves in the Design and Operation of Tailings Impoundments». CIM. Bulletin . February 1983.
- CANMET.: «Pit Slope Manual - Waste Embankments», 1979.
- CHAMBER OF MINES OF SOUTH AFRICA: «Handbook of Guidelines for Environmental Protection - The Design, Operation and Closure of Residue Deposits», 1979.
- MURDOCK, L. T. and TOLAND, G. C.: «Design of Tailings Impoundments». Engineering Bulletin .63. Dames & Moore, 1983.
- VICK, S. G.: «Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams», Wiley Interscience, 1983.
- WALTERS, W. H.: «Rock Riprap Design Methods and their Applicability to Long-Term Protection of Uranium Mill Tailings Impoundments». Pacific Northwest Laboratory. 1982.

LA IDENTIFICACION DE ALTERACIONES Y LA EVALUACION DEL IMPACTO AMBIENTAL

1. INTRODUCCION

Las evaluaciones de impacto ambiental son trabajos dirigidos a predecir las consecuencias que la ejecución y posterior desarrollo de una actividad humana puede producir en el entorno donde se localiza la acción, con el fin de dictaminar los efectos desencadenados y establecer medidas preventivas y de control que hagan posible el desarrollo de la actividad sin perjudicar, o perjudicando lo menos posible, al medio ambiente.

Este capítulo tiene por objeto resumir de forma clara como evaluar los impactos ambientales producidos por las actividades mineras.

Para abordar este tipo de estudios es conveniente en primer lugar señalar la casuística de los estudios de impacto ambiental de cara a la localización de actividades, en donde se pueden diferenciar tres situaciones. Fig. 5.1.

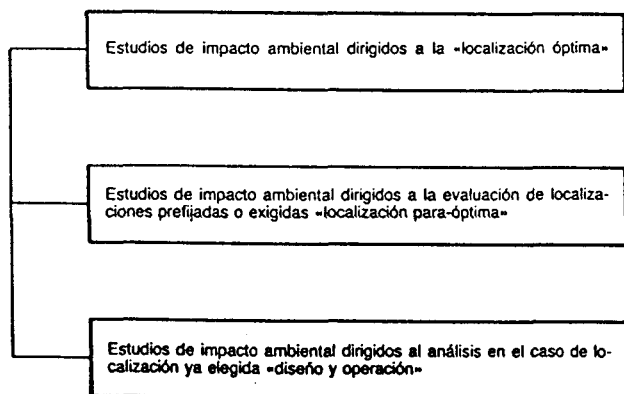


Figura 5.1. Casuística de los estudios de impacto ambiental en la localización de actividades mineras.

La «localización óptima» que se indica en la citada figura no se suele presentar en las actividades mineras, puesto que la realización de dicha actividad está condicionada por la localización y existencia de los recursos mineros. No obstante, podría aplicarse a algún estudio de emplazamiento de la planta de concentración o elaboración.

La segunda situación, «localización para-óptima» se refiere al caso en que se pueden dar situaciones alternati-

vas, por ejemplo: la apertura de una gravera dentro de un mismo valle en dos o más sitios distintos, la explotación de una cantera de caliza dentro de una misma área en dos ubicaciones próximas, etc.

La última situación reflejada se refiere a la localización ya elegida y prefijada para «abrir» la explotación. Es el más común de los tres casos, y a ella va dirigida el contenido de las Evaluaciones de Impacto Ambiental Minero (EIAM) que se presenta a continuación.

2. CONTENIDO DE LA EIAM EN LA INDUSTRIA EXTRACTIVA

El objeto de toda EIAM es incorporar a los proyectos mineros las restricciones que puedan derivarse del estudio de los elementos y factores que constituyen el medio ambiente, de forma que quede garantizado el funcionamiento integral del ecosistema de manera tal que las alteraciones que se produzcan inexorablemente en los subsistemas ambientales estén detectadas y las que revistan un carácter grave para el medio se atenúen o corrijan en lo posible. Las etapas a cubrir se reflejan en la Fig. 5.2.

A continuación, se explica brevemente el contenido de cada una de las etapas principales.

2.1. Análisis del proyecto

De acuerdo con el esquema metodológico de la Fig. 5.2, en primer lugar es necesario recabar información resumida a modo de fichas descriptivas que analicen la actividad objeto de la evaluación en todos sus aspectos:

- Definición, objetivo y problemática del proyecto.
- Descripción del proyecto donde se recoge el conocimiento de los principales elementos físicos y técnicos del mismo. Esta descripción conviene que sea lo más esquemática posible, y que se limite a los aspectos relevantes desde el punto de vista ambiental. Por ejemplo, datos de carácter general como: situación geográfica, extensión de la explotación, volumen de materiales a mover, etc., y otras de carácter técnico relacionadas con el plan de explotación: infraestructura, vida de la operación, sistema minero, maquinaria a emplear, mano de obra necesaria, etc.

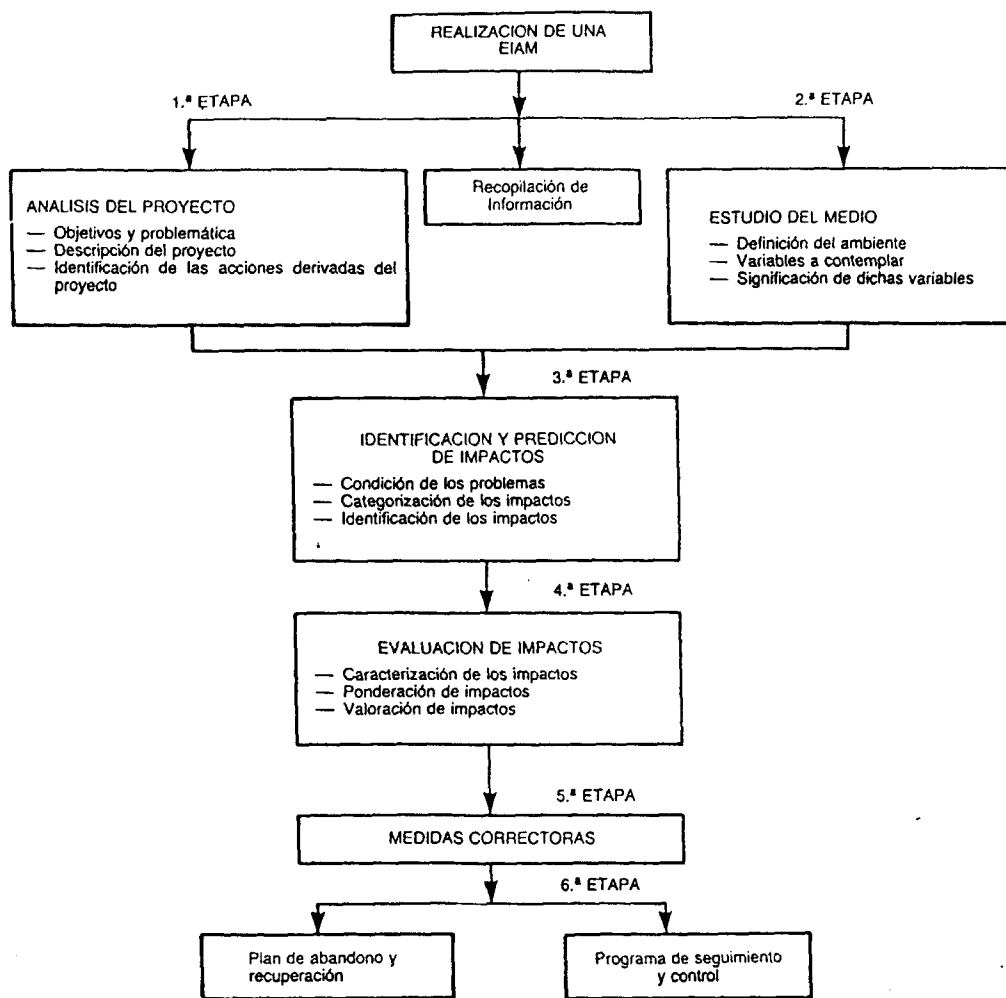


Figura 5.2. Etapas de una Evaluación de Impacto Ambiental Minero (EIAM).

- Identificación de acciones del proyecto minero susceptibles de producir impacto.

La realización de un proyecto de explotación minera da lugar a toda una serie de acciones productoras de impactos o alteraciones que habrá que estudiar de forma específica en cada tipo de sustancia extraída y para cada tipo de explotación.

Como ejemplo de actividades y acciones que se derivan de una explotación se presentan en la Tabla 5.1 algunas de las acciones más generales que tienen lugar en minería a cielo abierto.

2.2. Estudio del Medio

La definición de la situación preoperacional es extremadamente importante dentro de cualquier evaluación de impacto ambiental, pues el conocimiento del medio inicial ayuda en la prevención de las alteraciones que se pueden producir y posteriormente permite evaluar la magnitud de aquellas alteraciones que son difíciles de cuantificar.

Al abordar el estudio del medio se recomienda la individualización o sectorización de los distintos factores o

elementos que pueden verse afectados. Los motivos de esta disgregación son:

- Con el desarrollo de una explotación minera, no tienen porqué verse afectados todos los factores ambientales que integren el sistema. Este hecho dependerá de las particularidades del medio y de cuáles sean las características de la explotación.
- La zona de influencia del proyecto de explotación minera no tiene porqué ser la misma para todos los elementos o variables del medio afectados.
- Las características de las variables que son indicadores de su calidad o de su situación preoperacional son distintas.

La secuencia recomendable a seguir es la siguiente:

- Variables básicas afectadas (factores, elementos, componentes del medio).
- Superficie alterada para cada variable.
- Inventario y caracterización de las variables afectadas.
- Valoración de la variable.

TABLA 5.I

ACTIVIDADES DE OPERACIONES	PRINCIPALES OPERACIONES, INFRAESTRUCTURAS Y MODELADOS DE LAS ACTIVIDADES MINERAS A CIELO ABIERTO
1. EXPLORACION	1.1. Calicatas y excavaciones piloto. 1.2. Sondeos y perforaciones.
2. INFRAESTR	2.1. Construcción de edificios y plantas de tratamiento. 2.2. Nuevos viales y conducciones. 2.3. Desagües y drenajes.
3. EXPLOTACION	3.1. Perforación y voladuras. 3.2. Arranque y carga. 3.3. Transporte de materiales. 3.4. Operaciones auxiliares. 3.5. Mantenimiento de la maquinaria. 3.6. Tratamiento de minerales. 3.7. Tratamiento de efluentes.
4. MODIFICACIONES TOPOGRAFICAS	4.1. Creación de huecos. 4.2. Vertido de estériles, escombreras y balsas.

2.3. Identificación y predicción de Impactos

Los problemas relacionados al medio ambiente que pueden surgir en la implantación y desarrollo de una actividad minera son función de; características de tales acciones y de las características del lugar en que se proyecta:

- El origen de los problemas o efectos puede derivarse de la fase de planteamiento del proyecto donde se abordan los objetivos concretos de la explotación a través del interés que la sociedad tiene de las dedicaciones propuestas. O de la fase de diseño donde se recoge cómo se debe hacer la explotación (diseño de apertura de la mina, de localización, tamaño y forma de la escombrera, etc.), o bien de la propia fase de ejecución, cuando la explotación está funcionando.
- La condición de los problemas o efectos que se producen pueden ser, bien una pérdida total o parcial de un recurso, como un suelo productivo, la destrucción de una especie vegetal o animal endémica, el deterioro de un paisaje, etc., o la inducción a que se desencadene o aumente la probabilidad de ocurrencia de algún riesgo como erosión, alteración de redes de drenaje, contaminación del agua superficial, etc.

Para llegar a conocer el origen y condición de los efectos, es conveniente trabajar de forma sistemática eligiendo entre una o varias de las metodologías siguientes:

- Empleo de «listas de chequeo de posibles alteraciones» (Check list) que contengan efectos ambientales posibles que se producen al realizar el tipo de actividad extractiva propuesta en el proyecto.

En la bibliografía aparecen multitud de estas listas, unas de efectos generales y otras de efectos particulares producidas por acciones concretas.

- Utilización de «matrices», tablas de doble entrada, donde en un eje aparecen las actividades y operaciones características que se llevan a cabo en el proyecto, y en el otro eje, las listas de chequeo de indicadores de posibles impactos.

Como ejemplo se presenta la Tabla 5.II. Cuando una acción determinada produce una alteración específica en un factor del medio ambiente, se anota en el punto de intersección de la fila con la columna.

Esta metodología de identificación y predicción de impactos es actualmente de uso muy frecuente, pudiendo resultar algunas veces excesivamente generalista y no apreciarse con exactitud necesaria una problemática producida por la actividad.

Las matrices no tienen en cuenta las interacciones existentes entre las variables y características del sistema; esta deficiencia se puede paliar mediante matrices de interrelaciones o con redes o gráficos causa-efecto donde se ligan las causas de los impactos (acciones), las consecuencias que de ellos se derivan (efectos), mediante la identificación de relaciones entre las acciones que las causan y los factores del medio alterado, pudiendo incluir efectos secundarios y terciarios. Por ejemplo, de la acción de crear escombreras se derivan efectos indirectos y otros relacionados con ellos, entre los cuales se pueden nombrar como más importantes los reflejados en la Tabla 5.III.

Otros métodos complementarios para una buena identificación de los efectos son los paneles de expertos, los escenarios comparados y las encuestas.



Foto 5.1. *Calicatas de investigación en un yacimiento de carbón.*



Foto 5.2. *Explotación metálica a cielo abierto.*

TABLA 5.II. IDENTIFICACION DE POSIBLES ALTERACIONES AMBIENTALES PRODUCIDAS POR LA MINERIA ENERGETICA

SIMBOLOGIA

- ALTERACIONES GENERICAMENTE IMPORTANTES
- ALTERACIONES GENERICAMENTE POCO IMPORTANTES

ACCIONES PRODUCTORAS DE IMPACTOS O ALTERACIONES		ELEMENTOS, CARACTERISTICAS Y PROCESOS AMBIENTALES SUSCEPTIBLES DE SER AFECTADOS POR LA ACTIVIDAD MINERA														
		ATMOSFERA		AGUA		SUELOS		VEGETACION	FAUNA	PROCESOS ECOLOGICOS	PROCESOS GEOFISICOS					MORFOLOGIA Y PAISAJE
		● COMPOSICION DE LA ATMOSFERA	● NIVEL DE RUIDOS	● AGUA SUPERFICIAL	● AGUA SUBTERRANEA	● CARACTERISTICAS EDAFICAS	● USOS DEL SUELO	● ESPECIES Y COMUNID VEGETALES	● ESPECIES Y POBLAC. ANIMALES	● CADENAS Y REDES TROFICAS	● INUNDACION	● EROSION	● SEDIMENTACION	● INESTABILIDAD	● SISMICIDAD (VIBRACIONES)	● SUBSIDENCIA
1. EXPLORACION E INVESTIGACION			□	□	□	□	□	□				□	□			□
2. INFRAESTRUCTURA	2.1. CONSTRUCCION DE EDIFICIOS Y PLANTAS DE TRATAMIENTO		□				□	□	□			□	□			●
	2.2. NUEVOS VALES Y CONDUCCIONES		□	□			□	□	□	□	●	□	□			●
	2.3. DESAGUES Y DRENAJES		□	●	□		□		□	□	□	●				□
3. OPERACION	3.1. PERFORACION	□	□													
	3.2. VOLADURA	□	●						□				□	●		
	3.3. ARRANQUE Y CARGA	●	□									□				
	3.4. TRANSPORTE DE MATERIALES Y TRAFICO DE MAQUINARIA	●	●	□		□		●	□		□	□				□
	3.5. MANTENIMIENTO			□					□	□						
	3.6. TRATAMIENTO DE MINERALES	□	□	●	□	□		□	□	□		□				●
4. MODIFICACIONES FISIOGRAFICAS	4.1. CREACION DE HUECOS			●	●		●	●	□		□	□	●		●	●
	4.2. VERTIDO DE ESTERILES, ESCOMBRERAS Y BALSAS	□		●	●		●	●	□	□	●	●	●	□		●

TABLA 5.III. EFECTOS DIRECTOS E INDIRECTOS DERIVADOS DE LA CREACION DE UNA ESCOMBRERA

SUELO — Cambio de morfología: — Ocupación del suelo:	<ul style="list-style-type: none"> • Alteración del paisaje. • Pérdida del suelo por erosión. • Pérdida de comunidades vegetales. • Alteración de poblaciones animales.
AGUA — Alteración de la red de drenaje natural:	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación del agua superficial. • Inundación de áreas próximas.
AIRE — Cambios temporales en la calidad del aire:	<ul style="list-style-type: none"> • Alteración de la vida silvestre y afectación de la vegetación de áreas cercanas.

2.4. Evaluación de impactos

La evaluación es un proceso directamente encaminado a comparar los resultados producidos en distintos lugares (alternativas), o en distintos momentos (antes y después de la acción).

Los criterios y métodos de evaluación del impacto ambiental son aquellos que permiten valorar el impacto producido por actuaciones sobre el medio ambiente. En este sentido estos criterios y métodos tienen una función similar a la de la valoración del inventario (Etapa 2), puesto que permiten evaluar la importancia de los impactos producidos.

La selección de una determinada técnica o metodología

de evaluación deberá estar en función de las características del problema concreto (número de variables y de acciones, cantidad y calidad de los datos, etc.), de los objetivos y de si abarca todo el problema o se evalúan aspectos parciales de él.

a) Metodologías cualitativas

Este tipo de metodologías están basadas en el conocimiento por expertos de los impactos generados en proyectos similares. Para hacer una valoración cualitativa se hace necesario conocer las características de los impactos que en la fase anterior se han identificado. Tabla 5.IV.

TABLA 5.IV CARACTERISTICAS DE LOS IMPACTOS

CARACTERISTICA RELATIVA A:	VALOR NOTA	DEFINICIONES
1. Carácter genérico del impacto	Beneficioso Adverso	Consideración positiva respecto al estado previo a la actuación. Consideración negativa respecto al estado previo a la actuación.
2. Tipo de acción del impacto (relación causa-efecto)	Directa Indirecta	Indica el modo de producirse la acción sobre los elementos o características ambientales.
3. Sinergia o acumulación	Sí No	Existencia de efectos poco importantes individualmente considerados, que pueden dar lugar a otros de mayor entidad actuando en su conjunto; o posible inducción de impactos acumulados.
4. Proyección en el tiempo	Temporal Permanente	Si se presenta de forma intermitente mientras dura la actividad que lo provoca. Si aparece de forma continuada o tiene un efecto intermitente pero sin final.
5. Proyección en el espacio	Localizado Extensivo	Si el efecto es puntual. Si se hace notar en una superficie más o menos extensa.
6. Cuenca espacial del impacto	Próximo a la fuente Alejado de la fuente	Si el efecto de la acción se produce en las inmediaciones de la actuación. Si el efecto se manifiesta a distancia apreciable de la actuación.
7. Reversibilidad (por la sola acción de los mecanismos)	Reversible Irreversible	Si las condiciones originales reaparecen al cabo de un cierto tiempo. Si la sola acción de los procesos naturales es incapaz de recuperar aquellas condiciones originales.
8. Recuperación	Recuperable Irrecuperable	Cuando se pueden realizar prácticas o medidas correctoras viables que aminoren o anulen el efecto del impacto, se consiga o no alcanzar o mejorar las condiciones originales. Cuando no son posibles tales medidas correctoras.

Como ejemplo de esta evaluación cualitativa se presenta la Tabla 5.V, en donde aparecen caracterizados los impactos producidos por la acción de las modificaciones fisiográficas que afectan a los factores señalados en la Tabla 5.II.

La caracterización de los impactos proporciona criterios suficientes para poder determinar sobre la mayor o menor gravedad del impacto parcial. Este procedimiento se repite tantas veces como acciones u operaciones derivadas del proyecto produzcan impactos.

Después de analizar las características recogidas en cada tabla, se hace un dictamen sobre los siguientes puntos:

- La necesidad o posibilidad de poner o no en práctica *medidas correctoras* para aminorar o evitar la alteración causada por la acción, en función de la importancia de esa acción.
- La *probabilidad de ocurrencia* o riesgo de aparición del efecto, sobre todo de aquellas circunstancias no periódicas pero sí de gravedad, alta (A), media (M), o baja (B).
- La afectación o no a *recursos protegidos*, entendiendo por tales tanto monumentos del patrimonio histórico-artístico, arqueológico y cultural, espacios naturales protegidos, endemismos y especies animales y vegetales protegidos, como elementos relacionados con

la salud e higiene humanas, infraestructura de utilidad pública, etc.

A la vista de las características del impacto y del resultado del citado dictamen se resume la valoración global del efecto de la acción, su magnitud, según la siguiente escala de niveles de impactos:

Compatible: impacto de poca entidad. En el caso de impactos compatibles adversos habrá recuperación inmediata de las condiciones originales tras el cese de la acción. No se precisan prácticas correctoras.

Moderado: la recuperación de las condiciones originales requiere cierto tiempo y es aconsejable la aplicación de medidas correctoras.

Severo: la magnitud del impacto exige, para la recuperación de las condiciones iniciales del medio, la introducción de prácticas correctoras. La recuperación, aun con estas prácticas, exige un período de tiempo dilatado.

Crítico: la magnitud del impacto es superior al umbral aceptable. Se produce una pérdida permanente en la calidad de las condiciones ambientales, sin posible recuperación de dichas condiciones. Es poco factible la introducción de prácticas correctoras.

Se indica también si existe ausencia de impactos significativos por causa de la acción analizada, en cuyo caso no es necesaria la descripción del impacto objeto de los párrafos anteriores.

TABLA 5.V. CARACTERIZACION DE IMPACTOS AMBIENTALES EN MINERIA ENERGETICA
Acción productora de impactos analizada: Modificaciones fisiográficas

ELEMENTOS, CARACTERISTICAS Y PROCESOS AMBIENTALES SUSCEPTIBLES DE SER AFECTADOS POR LA ACTIVIDAD MINERA A CIELO ABIERTO	CARACTERISTICAS DE LOS IMPACTOS								DICTAMEN						VALORACION													
	1		2		3		4		5		6		7		8		9			10			11		12		13	
	BENEFICIOSO	ADVERSO	DIRECTO	INDIRECTO	SINERGIAS O ACUMULACION		TEMPORAL	PERMANENTE	LOCALIZADO	EXTENSIVO	PROXIMO A LA FUENTE	ALEJADO DE LA FUENTE	REVERSIBLE	IRREVERSIBLE	RECUPERABLE	IRRECUPERABLE	MEDIDAS CORRECTIVAS		PROBABILIDAD DE OCURRENCIA			AFECTA A RECURSOS PROTEGIDOS ?		COMPATIBLE	MAGNITUD	AUSENCIA DE IMPACTOS SIGNIFICATIVOS		
ATMOSFERA	• COMPOSICION DE LA ATMOSFERA	△	△		△		△	△		△			△	△			●		△									
	• NIVEL DE RUIDOS																											
AGUA	• AGUA SUPERFICIAL		△	△		△		△		△				△	△		●		△									
	• AGUA SUBTERRANEA		△	△		△		△	△		△				△							△						
SUELOS	• CARACTERISTICAS EDAFICAS																											
	• USOS DEL SUELO		△	△		△		△		△	△			△	△		●		△									
VEGETACION	• ESPECIES Y COMUNID. VEGETALES		△	△		△		△		△	△			△	△		●		△									
FAUNA	• ESPECIES Y POBLAC. ANIMALES		△	△		△		△		△	△			△	△		●		△									
PROCESOS ECOLOGICOS	• CADENAS Y REDES TROFICAS		△	△		△		△		△	△			△	△		●		△									
PROCESOS GEOFISICOS	• INUNDACION		△	△		△		△	△		△			△	△		●		△									
	• EROSION		△	△		△		△		△	△			△	△		●		△									
	• SEDIMENTACION		△	△		△		△		△		△		△	△		●		△									
	• INESTABILIDAD		△	△		△		△	△		△			△	△		●		△									
	• SISMICIDAD (VIBRACIONES)																											
	• SUBSIDENCIA		△	△		△		△	△		△			△	△		●		△									
MORFOLOGIA Y PAISAJE	• MODIFICACIONES EN EL PAISAJE		△	△		△		△		△				△	△		●		△									

b) **Metodologías cuantitativas globales**

A este grupo pertenece un conjunto de métodos basados en sencillos balances de masas, modelos de dispersión medio-ambiental, índices empíricos o modelos estadísticos sencillos.

Estos métodos pretenden llegar a una apreciación global del medio a través de la consideración de una serie de componentes, factores o parámetros del medio cuya integración proporcione el valor buscado. Cada componente ha de ser cuantificado y posteriormente agregado con los demás. La cuantificación es la fórmula concreta de una escala de valor, y su papel es, por tanto, capital.

c) **Metodologías cuantitativas parciales. Modelización**

En sentido amplio, un modelo es una cierta representación de la realidad mediante la cual se busca describirla o analizarla (Ramos, 1979).

Hay diversos tipos de modelos; dentro de los modelos matemáticos o simbólicos estos se pueden clasificar según que respondan o no a funciones objetivas siendo modelos de optimización o modelos simbólicos. Estos son, sin duda, el mejor modo de abordar los estudios de impacto ambiental.

Hay que tener en cuenta que los modelos de simulación tienen una estructura básica que depende de las características y propiedades consideradas en los sistemas ambientales, y que la calidad del modelo depende considerablemente de la calidad de los supuestos de partida así como de su tratamiento.

A modo de ejemplo pueden citarse los modelos desarrollados para predecir la contaminación por las aguas ácidas producidas por los estériles depositados en escombreras o por las propias labores mineras, los modelos de predicción de hundimientos inducidos en la superficie como consecuencia de la excavación subterránea de los huecos, etc.

2.5. Medidas correctoras

La adopción de medidas preventivas o correctoras en las evaluaciones de impacto ambiental que sirven para eliminar o minimizar los efectos negativos producidos por un determinado proyecto minero es una etapa importante en las evaluaciones de impactos.

Hay que partir de la premisa que siempre es mejor no producir la alteración que establecer una medida correctora, pues aparte de suponer un coste adicional de tiempo y dinero, en la mayoría de los casos, solamente eliminan una parte de la alteración y, en otros, ni siquiera ésto.

Los tipos de medidas correctoras pueden encuadrarse en las siguientes clases:

- *Reducen el impacto.* Este tipo de medidas correctoras generalmente, se consiguen con un diseño adecuado del proyecto o limitando la intensidad de las acciones.
- *Compensan el impacto.* Por ejemplo: si se ha alterado la fauna, estableciendo medidas que protejan la que aún permanece.
- *Cambian la condición del impacto.* Favorecen los procesos de regeneración natural o permiten restaurar el entorno afectado.

Otro aspecto importante a considerar sobre las medidas correctoras es la escala temporal de su aplicación. Pues es conveniente llevarlas a la práctica lo antes posible, ya que de este modo se pueden evitar impactos secundarios (e.g.: una escombrera sin vegetación es susceptible de erosionarse, producir polvo, contaminar las aguas, etc.).

A modo de resumen, se presentan algunas de las alteraciones más importantes producidas por la minería y sus acciones correctoras o de recuperación. Tablas 5.VI a 5.XII.

TABLA 5.VI. ALTERACIONES EN LA ATMOSFERA Y MEDIDAS CORRECTORAS

IMPACTOS SOBRE LA ATMOSFERA	ACCIONES CORRECTORAS O DE RECUPERACION
<p>— Contaminación, fundamentalmente por partículas sólidas, polvo y gases, derivada de las operaciones de apertura de huecos, de la creación de las escombreras y del tráfico de volquetes y de maquinaria pesada (impactos severos), y en menor grado, de la construcción de pistas (impactos moderados). En todos los casos enunciados, estos efectos son temporales, asociados con el período funcional de las operaciones.</p>	<p>— Riego periódico de pistas de minas con agua o disoluciones salinas. — Estabilización química de pistas. — Pavimentación de accesos permanentes a la mina. — Retirada de las pistas del material formado por acumulación de polvo. — Revegetación de los terrenos restituidos (superficies finales de vertederos y taludes excavados). — Control del polvo durante la perforación por medio de captadores y reducción del número de tajos con voladuras. — Extinción de los puntos de combustión espontánea del carbón. — Reducción del tiempo entre las fases de explotación y restitución.</p>

TABLA 5.VI (continuación)

IMPACTOS SOBRE LA ATMOSFERA	ACCIONES CORRECTORAS O DE RECUPERACION
<p>— Contaminación sónica, ruidos; impactos temporales, pero severos, durante las operaciones de apertura del hueco, creación de las escombreras y tráfico de volquetes y de maquinaria pesada; impactos temporales, también y de menor intensidad, durante la construcción de pistas e infraestructuras.</p>	<ul style="list-style-type: none"> — Reducción de la velocidad de circulación y minimización de los cruces de pistas. — Empleo de pantallas vegetales o artificiales contra el viento, que dificultan su libre circulación en los niveles superficiales. — Sustitución de los volquetes por cintas transportadoras. — Riego de las pilas de materiales que se cargan sobre los volquetes. — Estudio de la ubicación de plantas de tratamiento de acuerdo a las direcciones predominantes de los vientos. — Situar las plantas lo más alejadas posible de las zonas habitadas. — Construir barreras sónicas perimetrales. — Emplear cintas transportadoras mejor que volquetes. — Instalar silenciadores en los equipos móviles. — Estudiar rutas alternativas de transporte en zonas próximas a las áreas habitadas. — Realizar un mantenimiento preventivo adecuado y recubrir de goma los elementos metálicos que sufren los impactos de las rocas. — Utilizar equipos accionados eléctricamente. — Limitar el trabajo de las unidades más molestas a horas diurnas. — Disminuir las cargas operantes de explosivo y emplear detonadores y accesorios de microrretardo. — Cubrir el cordón detonante expuesto al aire libre. — Reducir al máximo las operaciones de taqueo de bollos con explosivos, etc.

TABLA 5.VII. ALTERACIONES EN LAS AGUAS Y MEDIDAS CORRECTORAS

IMPACTO SOBRE EL AGUA SUPERFICIAL	ACCIONES CORRECTORAS O DE RECUPERACION
<p>— Alteración permanente de los drenajes superficiales, severa en el caso de la construcción de escombreras y moderada en el de la implantación de viales e infraestructuras.</p>	<ul style="list-style-type: none"> — Creación de sistemas de drenaje, generales para la recogida de las aguas externas a la zona, y particulares para cada escombrera o talud importante. — Reducción de las pendientes de los taludes de vertederos y excavaciones para disminuir la velocidad y, por tanto, la capacidad erosiva de las láminas de agua, y favorecer al mismo tiempo la implantación de la cubierta vegetal que va a sujetar las tierras. — Diseño de vertederos con superficies cóncavas y longitudes continuas de declive reducidas, unidas por pequeñas terrazas de separación, con una ligera pendiente hacia el interior de los taludes. — Construcción de obras auxiliares de canalización para la protección de canales, escombreras, taludes de explotaciones, etc.

TABLA 5.VII (continuación)

IMPACTO SOBRE EL AGUA SUPERFICIAL	ACCIONES CORRECTORAS O DE RECUPERACION
<ul style="list-style-type: none"> — Contaminación de las aguas superficiales (turbiedad por partículas sólidas, elementos tóxicos disueltos, acidificación derivada de la oxidación e hidratación de elementos piríticos, precipitación química de compuestos de hierro, etc.) derivada de las operaciones necesarias para la creación de escombreras (impacto temporal crítico), y del tráfico de volquetes y maquinaria pesada, del bombeo y la descarga de efluentes, y de la implantación de viales e infraestructuras (impactos temporales y moderados). 	<ul style="list-style-type: none"> — Recogida y canalización de las aguas contaminadas en las minas hacia balsas reposadores donde se produzca la decantación de los sólidos antes del bombeo al exterior. — Adecuación de la planta de tratamiento más conforme a las características de los contaminantes del agua (depuración, balsa de decantación, filtros en drenajes, etc.). Este sistema de tratamiento deberá alimentarse con todos los efluentes de la zona explotada y se situará antes de la descarga a la corriente fluvial receptora. — Establecimiento de un sistema de análisis periódicos que detecte las variaciones y anomalías inadmisibles en las características del agua, a la salida de la planta, y antes de su entrada en el receptor. — Revegetación de áreas restituidas y reducción de la superficie afectada por las labores mineras, ambas acciones para reducir la erosión. — Aislamiento de materiales fácilmente disgregables y contaminantes, cubriendo con otros materiales procedentes de la propia explotación.
<p>IMPACTOS SOBRE LOS ACUIFEROS</p> <ul style="list-style-type: none"> — Alteración temporal del régimen de caudales subterráneos motivada por la de creación de huecos y excavación de galerías y bombeos del agua de los niveles freáticos seccionados. Impacto temporal, recuperable al cesar las operaciones de menor entidad. — Contaminación de acuíferos (aceites, hidrocarburos, etc.) temporal y de efectos preocupantes, derivada del mantenimiento de maquinaria. 	<ul style="list-style-type: none"> — Los aceites son un contaminante importante y difícil de tratar. Deberán recogerse los aceites usados tras el mantenimiento de la maquinaria, si éste se realiza en la zona de explotación.

TABLA 5.VIII. ALTERACIONES DE LOS SUELOS Y MEDIDAS CORRECTORAS

IMPACTOS SOBRE EL SUELO	ACCIONES CORRECTORAS O DE RECUPERACION
<ul style="list-style-type: none"> — Ocupación irreversible de suelo fértil por la creación de huecos y escombreras (impactos críticos y severos), y por la construcción de pistas, edificios y plantas de tratamiento (impactos moderados). — Inducción de efectos edáficos negativos en los alrededores de la explotación por las operaciones derivadas de la creación de huecos, escombreras y pistas (impactos locales moderados y compatibles, debido a la acumulación de residuos, elementos finos, polvo, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> — Retirada y acopio de la tierra vegetal de las zonas ocupadas por la explotación. — Diseño de un modelado en la recuperación que permita la utilización productiva y ecológica del terreno una vez explotado. — Adopción de medidas que eviten la producción de polvo, desprendimientos y deslizamientos.

TABLA 5.IX. ALTERACIONES SOBRE LA FLORA Y LA FAUNA Y MEDIDAS CORRECTORAS

IMPACTOS SOBRE LA FLORA Y LA FAUNA	ACCIONES CORRECTORAS O DE RECUPERACION
<ul style="list-style-type: none"> — Eliminación o alteración de hábitats vegetales terrestres para la fauna, así como desplazamientos o concentración de especies o individuos, motivados por la construcción de huecos y por la creación de pistas (impactos de magnitud moderada). Sin embargo, la creación de escombreras produce un impacto crítico (cambio de hábitat total) sobre estos aspectos. — Cambios en las pautas de comportamiento de la fauna por perturbaciones causadas por el tráfico de volquetes y maquinaria pesada, y por la creación de pistas e infraestructura. Impactos temporales y de carácter compatible. — Eliminación o reducción de la cubierta vegetal, así como provocación de dificultades para la regeneración de la vegetación (pérdida de elementos fértiles, aumentos drásticos de la pendiente y erosión, etc.) estos impactos generalmente son severos en el caso de las escombreras y moderados en el de los huecos y pistas. 	<ul style="list-style-type: none"> — Revegetación con especies autóctonas de los ecosistemas afectados. — Adecuar medidas para la optimización del tráfico y para la disminución de ruidos. — Preparación del suelo, mejora del microclima (riego, abonado) y revegetación con especies autóctonas de los ecosistemas afectados.

TABLA 5.X. ALTERACIONES EN LOS PROCESOS GEOFISICOS Y MEDIDAS CORRECTORAS

RIESGOS GEOFISICOS	ACCIONES CORRECTORAS O DE RECUPERACION
<ul style="list-style-type: none"> — Aumento del riesgo de los desprendimientos, deslizamientos o hundimientos de tierras, motivado por la creación de escombreras (impacto severo) y por la construcción de huecos y galerías subterráneas (impacto moderado). — Aumento de la carga de sedimentación aguas abajo, producido por la adición de material sólido, derivado de la creación de escombreras, de pistas e infraestructura. Impactos genéricos, y de carácter severo en el caso de las escombreras. — Aumento de la erosión, derivada de las operaciones que son precisas para la creación de escombreras y pistas, de la propia existencia de escombreras y taludes, y del tráfico de volquetes y maquinaria pesada. Impacto de magnitud moderada a severa, aunque temporal en el caso del tráfico. — Aumento del riesgo de subsidencia, producido por la creación de las escombreras. Impacto permanente de carácter moderado. 	<ul style="list-style-type: none"> — Colocar sobre el terreno natural, antes del comienzo del vertido de la escombrera, una capa de espesor suficiente de material grueso drenante seleccionado, con objeto de lograr en el interior de la escombrera un nivel freático bajo. — Utilizar en lo posible, para el núcleo interior de la escombrera, el material de mayor granulometría para favorecer la estabilidad y el drenaje. — Evitar romper el equilibrio de los estériles. — Evitar ubicar la escombrera en terreno pendiente. — Modelar la escombrera de modo que su factor de seguridad sea superior a 1,2. — Diseñar un sistema de drenaje superficial que desagüe las aguas directamente interceptadas por la escombrera o las conecte con la red externa de drenaje. — Evitar ubicaciones de escombrera en zona con peligro de hundimiento (minería subterránea abandonada, litologías con socavaciones, etc.). — Adoptar medidas que eviten la producción de polvo. — Establecer sistemas de drenaje generales y particulares. — Revegetación rápida tras los movimientos finales de tierra en cada zona. — Disminución de pendientes y de longitudes de declive en taludes de pistas y escombreras, situándose en los límites inferiores que permitan la correcta explotación. — Establecimiento de sistemas de drenaje, generales y particulares. — Revegetación rápida tras los movimientos finales de tierra. — Evitar la ubicación de las escombreras en zonas con peligro de hundimiento (minería subterránea abandonada, áreas karstificadas, etc.).

TABLA 5.XI. ALTERACIONES DE LA MORFOLOGIA Y DEL PAISAJE Y MEDIDAS CORRECTORAS

IMPACTOS SOBRE LA MORFOLOGIA Y EL PAISAJE	ACCIONES CORRECTORAS O DE RECUPERACION
<p>— Peturbación del carácter global del paisaje, generalmente grave en el caso de las escombreras, severa en el de los huecos de explotación y de menor entidad por su mayor facilidad de control y temporalidad las derivadas de la construcción de edificios y plantas, y de la implantación de accesos e infraestructura.</p>	<p>— Reducir en lo posible el tamaño de excavaciones y vertederos.</p> <p>— Remodelar la topografía alterada de modo que se ajuste lo más posible a la natural. Utilizar los productos de las excavaciones para rellenar en otros lugares.</p> <p>— Redondear taludes, en planta y en alzado, evitando aristas y superficies planas.</p> <p>— Plantación de árboles y arbustos que actúen como pantallas visuales.</p> <p>— Medidas protectoras de la vegetación existente: cercar los árboles grandes que ya existan, cuidar que no se corten raíces principales, regar y fertilizar.</p> <p>— Compensar el deterioro del medio con la creación de zonas, pasillos o cinturones verdes en el interior o inmediaciones de las instalaciones industriales.</p> <p>— Plantaciones tipo jardín, con especies adecuadas, no necesariamente autóctonas, dirigidas a mejorar la apariencia general de las instalaciones.</p> <p>— Empleo de materiales del lugar.</p> <p>— Empleo de colores que contribuyan a disminuir el contraste con el medio (en general, mates y oscuros).</p> <p>— Adaptación de las instalaciones e infraestructura a la topografía local (no superar líneas naturales de horizonte, elección de situaciones cerradas visualmente, etc.).</p> <p>— Revegetación general con las especies autóctonas de la zona y el esquema de plantación adecuado para la adaptación de la zona afectada por la explotación al paisaje circundante.</p>

TABLA 5.XII. ALTERACIONES DEL AMBITO SOCIO-CULTURAL

IMPACTOS	ACCIONES CORRECTORAS
<p>— Alteración de lugares significativos que son considerados como un patrimonio cultural y social por su valor singular (histórico, artístico, científico, educativo, natural, etc.).</p> <p>— Aumento de la densidad de tráfico sobre las vías públicas con el consiguiente peligro de accidentes, deterioro de firmes, así como el embarrado de las carreteras.</p>	<p>— Adecuación de la zona alterada tras la recuperación, de forma que pueda mantener su uso tradicional.</p> <p>— Adecuación alternativa para el uso perdido.</p> <p>— Traslado y reinstalación en el caso de ser obras del hombre.</p> <p>— Trato con especial cuidado si se trata de endemismo de flora o fauna.</p> <p>— Construcción de pistas de uso interno.</p> <p>— Mejora de carreteras ya existentes.</p> <p>— Instalación de estaciones automáticas de lavado de ruedas y bajos de todos los vehículos que accedan a la red viaria.</p> <p>— Disposición de carteles indicadores de peligro.</p>

2.6. Plan de abandono y recuperación. Programa de seguimiento y control

Esta última fase de la evaluación corresponde a dos apartados:

- El plan de abandono y recuperación de la explotación, donde se detallarán todas aquellas labores que hay que realizar para recuperar el área que ha sido alterada (Proyecto de restauración).
- El programa de seguimiento y control. Este punto pretende controlar el cumplimiento de todas las medidas correctoras que se hayan adoptado al realizar la evaluación del impacto, así como instrumentar un plan a medio plazo que establezca controles que detecten las desviaciones de los efectos previstos o en las medidas correctoras indicadas en la evaluación, pues muchos de los efectos son estimados de manera predictiva y la eficacia de las medidas correctoras propuestas no están probadas en todas las situaciones. Por todo ello, el plan de seguimiento y control debe funcionar como un sistema abierto con capacidad para modificar, cambiar o adaptar el proyecto o las situaciones que se planteen.

2.7. Impactos positivos en el ámbito socio-económico

Paralelamente a la evaluación de los impactos ambientales, de carácter negativo, es necesario analizar el efecto positivo del proyecto de explotación sobre las variables socioeconómicas más representativas.

El desarrollo de una actividad extractiva provoca en el entorno un impacto socio-económico que se manifiesta por las relaciones de dependencia económica en diferentes sectores productivos, ya sea a escala local o regional.

Para evaluar tal incidencia es posible aplicar diferentes técnicas, pero lo más sencillo es recurrir a diversos indicadores socio-económicos, como son:

- Nivel de empleo generado por la explotación, directo e indirecto.
- Valor añadido generado por la actividad en la zona afectada.
- Infraestructura y equipamiento introducido en el área como consecuencia del proyecto.
- Efectos sobre otras actividades socio-económicas, empresas de servicios, etc.

3. LEGISLACION AMBIENTAL EN MINERIA

Las actividades mineras están sujetas a unas normativas legales sobre la conservación del medio ambiente, algunas de las cuales se remontan a finales del siglo pasa-

do, como es el caso de la recientemente derogada Ley de Aguas de 13 de Junio de 1879.

En los últimos tiempos han proliferado las referencias al medio ambiente en todas las legislaciones sectoriales estatales, siendo el sector minero uno de los primeros en que la anterior referencia se ha hecho realidad.

La legislación que afecta directamente al sector minero puede agruparse de la siguiente forma:

A. Disposiciones generales de la minería

- Ley de Minas (Ley 22/1973 de 21 de Julio)
- Reglamento General para el Régimen de la Minería (Real Decreto 2857/1978 de 25 de Agosto).
- Ley de Fomento de la Minería (Ley 6/1977 de 4 de Enero).
- Reglamento General de Normas Básicas sobre Seguridad minera (Real Decreto 863/1985 de 2 de abril).

B. Disposiciones particulares de la minería

- Real Decreto 2994/1982, de 15 de Octubre. sobre Restauración del Espacio Natural Afectado por Actividades Mineras.
- Real Decreto 1116/1984, de 9 de mayo, sobre Restauración del Espacio Natural Afectado por las Explotaciones de Carbón a Cielo Abierto y el Aprovechamiento Racional de estos Recursos Energéticos.
- Orden de 13 de Junio de 1984, sobre Normas para la Elaboración de los Planes de Explotación y Restauración del Espacio Natural Afectado por las Explotaciones de Carbón a Cielo Abierto y el Aprovechamiento Racional de estos Recursos Energéticos.
- Orden de 20 de Noviembre de 1984 por la que se desarrolla el Real Decreto 15-10-82 sobre Restauración de Espacios Naturales Afectados por Actividades Extractivas.

Por otro lado, a nivel de disposición general estatal. las actividades mineras deben ser sometidas a una evaluación del impacto ambiental, de acuerdo con la adaptación a la legislación española de lo establecido en la Directiva 85/377/CEE de 27 de junio en materia de Evaluación de Impacto Ambiental de los Proyectos Públicos o Privados, en la forma prevista en:

- Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio de Evaluación de Impacto Ambiental, y.
- Real Decreto 1131/1988 de 30 de septiembre. por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA).

El documento de síntesis elaborado a partir de la citada EIA sigue el procedimiento que se indica en el esquema de la Fig. 5.3.

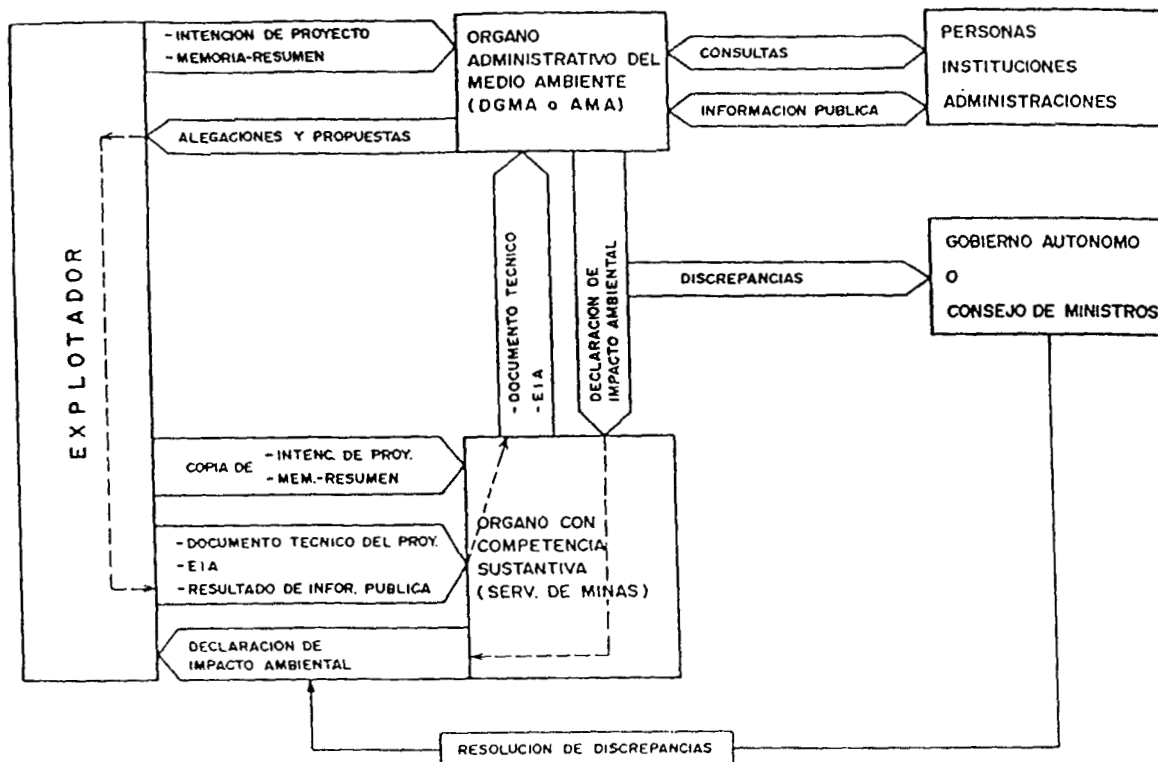


Figura 5.3. Procedimiento de presentación de las EIA y órganos competentes.

Por último indicar que en algunas Comunidades Autónomas, como la Generalidad de Cataluña o la Junta de Castilla y León, existen disposiciones particulares para la minería que habrán de tenerse en cuenta para el beneficio de aquellos yacimientos que se ubiquen dentro de las mismas.

BIBLIOGRAFIA

- AGUILO, M. et al.: «Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología». Serie Manuales 3. CEOTMA. MOPU, Madrid, 1982.
- ARAMBURU, P. et al.: «Evaluación integrada de espacios naturales. Aplicación a los espacios arbolados de Madrid». Monografías 6. Consejería de Agricultura y Ganadería. Comunidad de Madrid, 1982.

- ARAMBURU, M. P. Y ESCRIBANO, R.: «Impactos ecológicos. La práctica de las estimaciones de impactos». Fundación Conde del Valle de Salazar. ETSI Montes. Madrid, 1987.
- EPM: «Estudio Geoambiental para la Restauración del Medio Natural. Cuenca de El Guadiato y Cuenca de Padul». IGME. Madrid, 1987.
- EPM: «Programa Nacional de Estudios Geoambientales Aplicados a la Minería. Provincia de León». IGME. Madrid, 1988.
- EPM: «Legislación Ambiental Aplicable a la Minería Nacional, Autonómica y Comunitaria». ITGE, 1989.
- GONZALEZ ALONSO, S. et al.: «Directrices y técnicas para la estimación de impactos». Cátedra de Planificación y Proyectos. ETSI Montes. Madrid, 1983.
- LOPEZ JIMENO, C.: «La Minería y las Alteraciones en el Medio Ambiente». I Seminario sobre Restauración de Canteras y Minas a Cielo Abierto. Fundación Gómez Pardo, 1988.
- RAMOS FERNANDEZ, A. et al.: «Planificación física y ecología. Modelos y métodos. EMESA. Madrid. 1979.

CONTROL Y PREVENCIÓN DEL POLVO

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de la atmósfera se produce por la presencia de diversos compuestos que la impurifican. Es un fenómeno que se presenta a escala microscópica, pero con efectos que en muchas ocasiones son detectables a simple vista.

La polución del aire en minería es debida a distintas sustancias que, según su estado físico, pueden clasificarse en:

- Partículas sólidas y líquidas, y
- Gases y vapores.

Las partículas contaminantes en estado sólido, más conocidas por el nombre genérico de polvo, tienen diámetros comprendidos entre 1 y 1.000 μm . Se depositan por acción de la gravedad, por lo cual son conocidas como materia sedimentable, y tienen una composición química muy variada según su procedencia. Constituyen la principal fuente de polución del aire en minería, encontrándose su origen en la acción del viento sobre las superficies excavadas, en la manipulación de los materiales, en el tráfico de vehículos, etc.

Los gases y vapores son resultado de la detonación de los explosivos, de las emisiones de los motores térmicos de los equipos, de la combustión espontánea de residuos de carbón en escombreras, etc. La intensidad de este tipo de contaminación es menos importante que la anterior.

Los efectos del polvo son muy numerosos y variados, en primer lugar es motivo de molestias a las personas, y por tanto de quejas si existen núcleos urbanos próximos, ya que da lugar a un ensuciamiento general del entorno habitado y a una disminución de la calidad del aire respirable que puede llegar a ser causa de enfermedades. Por otro lado, e independientemente de la toxicidad del polvo, y del contenido en sustancias metálicas, da lugar a desgastes prematuros en los elementos móviles de equipos industriales y también produce efectos dañinos sobre la vegetación, por oclusión de los estomas de las plantas, que disminuye la aspiración del dióxido de carbono y agua necesitada por las mismas, y por la menor penetración de la luz.

Los límites máximos tolerables de presencia en la atmósfera de cada contaminante, aisladamente o asociado con otros en su caso, se recogen en la siguiente reglamentación:

- Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico.
- Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972, de 22 de Diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico.
- Real Decreto 1613/1985, de 1 de agosto, por el que se modifica parcialmente el Decreto 833/1975, de 6 de febrero, y se establecen nuevas formas de calidad del aire en lo referente a contaminación por dióxido de azufre y partículas.

2. FUENTES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Las fuentes emisoras de contaminantes son muy numerosas, pero de una forma genérica pueden clasificarse en:

1. Fuentes localizadas o puntuales:

- Fuentes lineales (e.g. pistas de transporte con circulación de volquetes).
- Fuentes móviles (e.g. tubo de escape de un tractor).
- Fuentes fijas (e.g. grupo electrógeno estacionario).

2. Fuentes fugitivas o no puntuales (e.g. superficies de escombreras sin revegetar).

El caso de las fuentes fugitivas es el más complejo de los mencionados, ya que intervienen otros factores no inherentes a la propia fuente como son los meteorológicos y topográficos, que pueden intervenir decisivamente en el fenómeno de la difusión.

3. CONCEPTOS DE EMISIÓN E INMISIÓN

El proceso de polución de la atmósfera se inicia al introducir en ellas los contaminantes y continúa con la presencia de los mismos en el medio gaseoso, siendo función de las propiedades de los compuestos y condiciones ambientales.

La medida del nivel de contaminación debe realizarse, pues, desde la iniciación del proceso, esto es, desde la

emisión de las sustancias. Por emisión se entiende la cantidad total de producto que se deposita en la atmósfera desde la fuente de la que procede.

El camino que siguen los contaminantes en la atmósfera es complejo, por cuanto en su difusión intervienen las características propias de dichas sustancias y las condiciones meteorológicas. Por esta razón, en la evaluación de los contaminantes se habla del concepto de inmisión, por el cual se entiende la concentración y permanencia de las sustancias que causan la polución de la atmósfera de forma continua o temporal, en las proximidades del suelo y en puntos suficientemente alejados de las fuentes.

En la mayoría de los países industrializados los niveles de inmisión y emisión se hallan regulados mediante el establecimiento de unos límites máximos.

En el caso concreto de la minería, la técnica que se utiliza para medir las emisiones de partículas sólidas es la de los factores de emisión. Estos factores son determinados como medias estadísticas de la velocidad a la que los contaminantes son liberados a la atmósfera como resultado de una actividad o ritmo de ejecución de la misma. Se expresan en unidades de masa emitidas por unidad producida, o de masa emitida por unidad de tiempo.

En la Tabla 6.I se recogen algunos factores de emisión de polvo fugitivo obtenidos en diversas operaciones mineras.

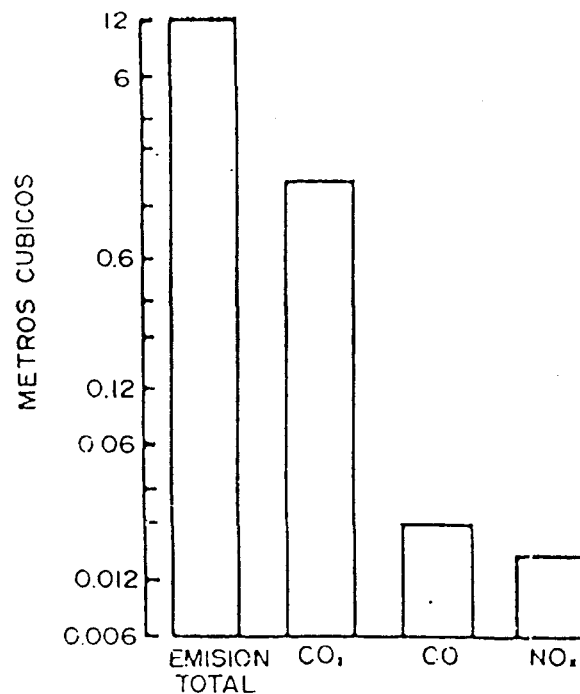


Figura 6.1. Contaminantes producidos por un kg de gas-oil.

TABLA 6.I. CANTIDADES ESTIMADAS DE POLVO FUGITIVO EN ALGUNAS OPERACIONES MINERAS

OPERACION	NUMERO DE ESTIMACIONES	FACTOR DE EMISION
Movimiento de estéril de recubrimiento	5	0,024-0,05 kg/t de est. 0,004-0,23 kg/t de min.
Carga de volquetes con excavadora	5	Mayor de 0,5 kg/t de min.
Pistas de transporte	4	0,25-0,69 kg/km recorrido
Descarga de volquete en vertedero	3	0,00017-0,02 kg/t de min.
Extendido de estéril	1	Mayor de 32,4 t/ha-año

Fuente: Jutze (1976).

3.1. Factores de emisión de motores diesel

Aunque la contaminación procedente de los equipos móviles accionados por motores de combustión interna es mucho menos importante que la polución del aire debida al polvo, conviene recordar que por cada kilogramo de gas-oil se requieren 15 kg de aire para la combustión completa y que la emisión resultante, en volumen, es aproximadamente de 13 m³. Bajo condiciones perfectas de combustión, la emisión está compuesta volumétricamente por un 73 % de nitrógeno, un 13 % de dióxido de carbono y un 44 % de vapor de agua. Fig. 6.1.

Pero debido al mal funcionamiento de los motores y a las impurezas que lleva el propio combustible, en las emisiones aparecen otros contaminantes tal como puede observarse en los factores de emisión de un volquete de 30 toneladas de capacidad con un consumo de combustible de 0,45 l/km.

TABLA 6.II. FACTORES DE EMISION PARA UN VOLQUETE DE 30 t

CONTAMINANTE	EMISION (g/km)
Partículas	0,75
Oxidos de azufre (SO _x como SO ₂)	1,50
Monóxido de carbono	12,75
Hidrocarburos	2,13
Oxidos de nitrógeno (NO _x como NO ₂)	21,25
Aldehidos (como HCHO)	0,19
Acidos orgánicos	0,19

Fuente: USEPA, 1973.

Para el control de las emisiones de los motores diesel se han desarrollado numerosos sistemas entre los que cabe citar los depuradores catalíticos o por barboteo en agua, filtros, etcétera.

3.2. Factores de emisión en operaciones mineras

En la Tabla 6.1 se han indicado algunos factores de emisión característicos de diversas operaciones que se realizan en minas a cielo abierto. Obviamente, tales cifras pueden variar en condiciones distintas a las que corresponden a dichas medidas. Por ello, se han intentado determinar de forma más científica estos factores de emisión a través de las relaciones de diversas variables que quedan expresadas como ecuaciones empíricas. De recientes estudios llevados a cabo en Estados Unidos se resumen a continuación algunas de estas ecuaciones.

PISTAS SIN PAVIMENTAR (Cowherd, 1982)

- $e_p = 5,9 (s/12)(S/30)(W/3)^{0.7}(w/4)^{0.5}(d/365)$.
 e_p = Emisiones en pistas sin pavimentar, expresadas en libras de partículas sólidas/milla (Partículas menores de 30 μ con una densidad de 2.5 g/cm³).
 s = Contenido de limo del material de la superficie de rodadura (%).
 S = Velocidad media del volquete (millas/h).
 W = Peso medio del volquete.
 w = Número de neumáticos.
 d = Número de días secos por año.

OPERACIONES DE CARGA DISCONTINUAS (Cowherd, Bohn y Cuscino, 1978)

- $e_{cd} = 0,0018 [(s/5)(V/5)(h/5)]/(M/2)^{2.0}(Y/6)^{0.33}$.
 e_{cd} = Emisiones de partículas expresadas en lb/tonelada de material cargado.
 V = Velocidad media del viento a unos 4 m del suelo (millas/h).
 h = Altura de descarga (pies).
 M = Contenido de humedad del material (%).
 Y = Capacidad de carga del equipo (yd³).
 s = Contenido de limo del material de superficie (%).

OPERACIONES DE CARGA CONTINUAS (Cowherd, Bohn y Cuscino, 1979)

- $e_{cc} = 0,0018 [(s/5)(V/5)(h/10)]/(M/2)^{2.0}$.
 e_{cc} = Emisiones de partículas expresadas en lb/tonelada de material cargado.
 s = Contenido de limo del material (%).
 V = Velocidad media del viento a unos 4 m del suelo (millas/h).
 h = Altura de descarga (pies).
 M = Contenido de humedad del material (%).

POR LA ACCION EROSIVA DEL VIENTO EN MATERIALES APILADOS (Cowherd, Bohn y Cuscino, 1978)

- $e_{ea} = 0,05 (s/1,5)(d/235)(F/15)(D/90)$.
 e_{ea} = lb/tonelada de material a la acción del viento.

- s = Contenido de limo del material (%).
 d = Número de días secos por año.
 F = Porcentaje de tiempo que el viento supera las 12 mph.
 D = Duración del apilado del material (días).

SUPERFICIES EXPUESTAS A LA EROSION DEL VIENTO

- $e_{es} = 3400 [(e/50)(s/15)(f/25)]/(P-E/50)^2$.
 e_{es} = lb de partículas/acre-año de terreno expuesto.
 e = Indices de erosión superficial (tons/acre/año).
 s = Contenido de limo del material superficial (%).
 f = Porcentaje de tiempo que el viento supera las 12 mph, a una altura de 1 pie del suelo.
 $P-E$ = Índice de Evaporación y Precipitación de Thornthwaite, suma de los ratios de los 12 meses.

El hecho de que el polvo sea desplazado y dirigido por el viento hace que su difusión dependa de un gran número de parámetros, difíciles de valorar muchos de ellos:

- Estado del suelo y tipo de vehículo en la superficie y/o equipo generador del polvo.
- Estación del año y hora del día.
- Velocidad y dirección del viento.
- Turbulencia del aire.
- Humedad y temperatura del suelo.
- Relación que se establece entre la dirección del viento y los efectos de la lluvia caída en los días inmediatamente precedentes.
- Rugosidad del terreno, existencia de taludes de excavación y terraplenes naturales o artificiales.
- Vegetación.
- Otros obstáculos en general.

Es, pues, evidente que no se trata de un fenómeno constante ni regular, sino que está sometido a momentos de máxima concentración distribuidos en intervalos irregulares en los cuales las molestias pueden llegar a ser muy importantes.

4. EVALUACION DEL NIVEL DE CONTAMINACION

La contaminación del aire puede tener lugar en dos ámbitos distintos: en atmósfera libre y en atmósfera de interiores. El estudio de esta última situación se realiza más bajo la óptica de un problema de higiene laboral que medio ambiental, por lo cual en este manual se tratará exclusivamente el primer caso. No obstante, existe una estrecha relación entre las dos problemáticas citadas.

En las explotaciones a cielo abierto el número de contaminantes puede ser variado, según el tipo de fuente y la clase de compuesto que cada una de ellas emite. Sin embargo, en la práctica tan solo unos pocos de ellos tienen importancia real, salvo situaciones muy especiales.

Para la caracterización y cuantificación de los niveles de contaminación producidos por el polvo se utilizan dos tipos de equipos, según que las partículas sean sedimentables o estén en suspensión. En los primeros, la toma de muestras se efectúa aprovechando su característica principal, es decir, su deposición por efecto de la gravedad, y consisten en una serie de colectores cilíndricos con un área perfectamente definida y un receptáculo donde se guarda la muestra. Fig. 6.2. En los segundos, se absorbe un cierto volumen de aire a través de un filtro donde la materia en estudio queda retenida formando una mancha característica. Estos últimos aparatos son los más completos ya que puede llegarse a una cuantificación, mientras que los del primer grupo son más bien calificadores.

Otros sistemas empleados son:

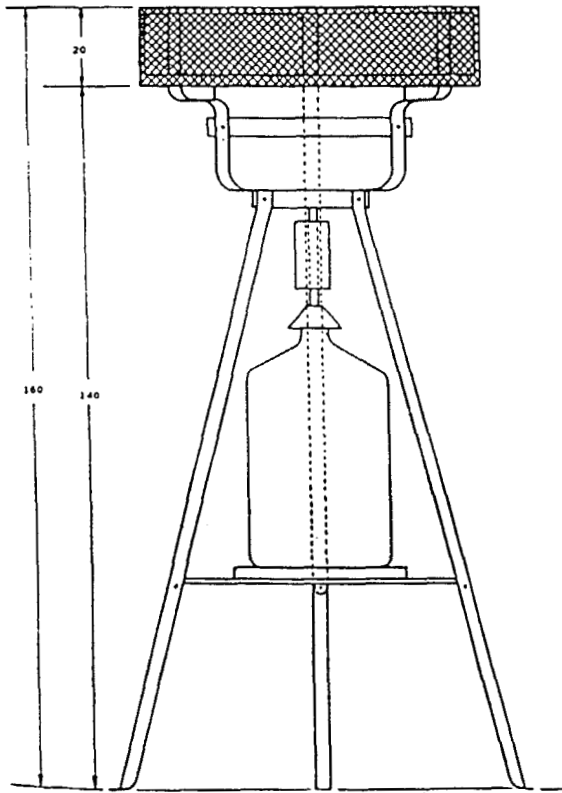


Figura 6.2. Colector de materia sedimentable.

— **Medidores direccionales.** Consisten en unas cabezas colectoras de plástico que se adaptan a un pie formando ángulos de 90° entre sí y disponen de unas aberturas para el aire y un depósito inferior donde se recoge el polvo por gravedad. Fig. 6.3. Situando estos aparatos en distintos puntos de la explotación, antes de que se comience y durante la vida de la misma, es posible conocer el nivel aproximado de polvo existente en la atmósfera y la dirección predominante del viento en la que se desplaza.

El espacio temporal de medida es normalmente cada 10 ó 30 días, al cabo de los cuales se procede a la recogida de muestras y pesada de las mismas. Con la materia recogida se realizan, en ocasiones, las siguientes determinaciones: pH en agua, materia orgá-

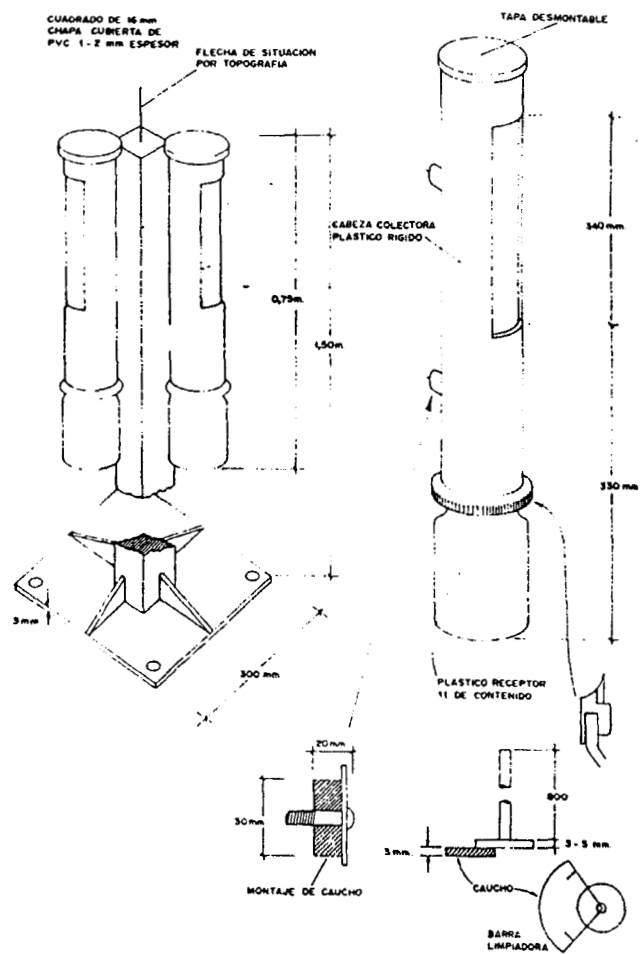


Figura 6.3. Medidores direccionales de polvo.

nica insoluble, materia inorgánica insoluble, materia insoluble total, materia soluble, materia sedimentable total, elementos o compuestos de interés como calcio, sodio, magnesio, sulfatos, nitratos, metales pesados, etc.

Este sistema es el más utilizado actualmente en Gran Bretaña en minas de carbón a cielo abierto.

- **Perfiles de exposición.** Consiste en la medida directa de la emisión fugitiva en una sección transversal por medio de un desmuestre múltiple. Permiten además medir la dirección y velocidad del viento para ajustar el perfil de exposición a las condiciones de desmuestre. Fig. 6.4.
- **Sistema de muestreo por globos.** Es un sistema de muestreo tridimensional de polvo fugitivo desarrollado para minas a cielo abierto. Consiste en globos aerostáticos fijados por cuerdas en las que a distintas alturas, 0,5, 10, 20 y 75 m, se sitúan desmuestreadores o recipientes colectoras. Este método se recomienda cuando se ha demostrado que las medidas efectuadas al nivel del suelo son inadecuadas. Fig. 6.5.
- **Sistemas fotográficos.** Mediante fotografías y películas puede estudiarse la efectividad de un método de control de polvo, observando por ejemplo la diferencia en la densidad óptica del polvo levantado por un volquete antes y después de aplicar dicho método.

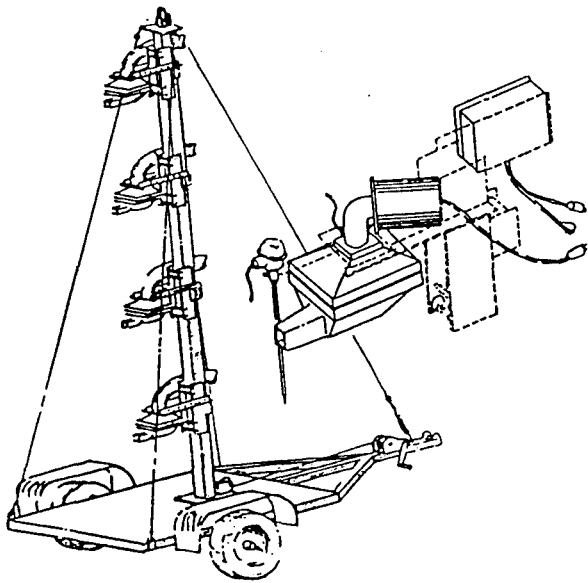


Figura 6.4. Perfil de exposición (Cowherd, 1979).

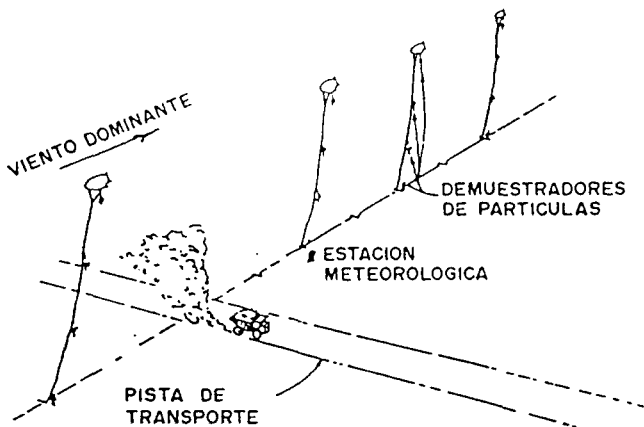


Figura 6.5. Sistema de muestreo por globos (Armstrong, Russell and Drehmel, 1980).

5. PREVENCIÓN DEL POLVO Y METODOS DE CONTROL

A pesar de que los depósitos de minerales no pueden cambiar de localización con respecto a los núcleos urbanos que puedan existir en las proximidades, si es posible

y debe plantearse, durante la etapa de planificación, el estudio del lugar más adecuado de ubicación de las plantas de tratamiento y parque de almacenamiento de minerales, con el fin de minimizar las emisiones de polvo procedentes de estas instalaciones. Deberá pues tenerse en cuenta las velocidades de los vientos y direcciones predominantes de éstos, disponibles en las estaciones meteorológicas cercanas, así como las posiciones relativas de las distintas áreas habitadas.

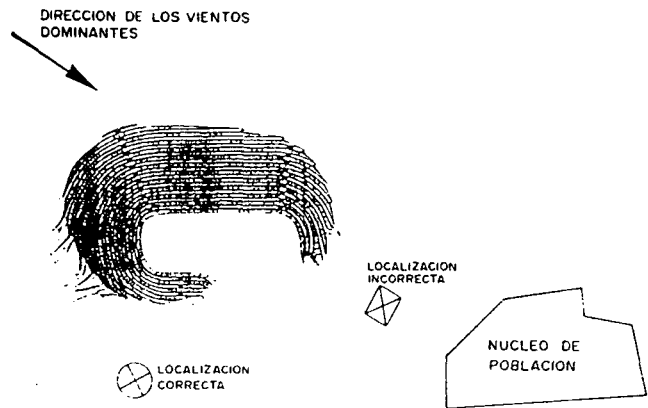


Figura 6.6. Ubicación adecuada de las instalaciones de tratamiento atendiendo a la dirección de los vientos dominantes.

Desde el punto de vista de medidas de control y prevención del polvo en las diferentes operaciones mineras caben citar las siguientes:

1. **Perforación de barrenos.** Los modernos equipos de perforación montan captadores de polvo que están constituidos básicamente por una campana de aspiración, una manguera flexible, un ciclón para separar las partículas gruesas y un filtro para las más finas, así como un ventilador para crear la depresión o vacío del conjunto. Fig. 6.7.

El polvo puede recogerse en bolsas o depositarse directamente sobre la superficie del banco en pequeños montones. En el primer caso las muestras pueden aprovecharse para el control de leyes del mineral. Además de eliminar con estos equipos las partículas más peligrosas para los operadores, con una granulometría inferior a las 5 micras, se consiguen menores costes de mantenimiento y de perforación, velocidades de penetración más altas y mejores condiciones de trabajo.

Si las formaciones rocosas a atravesar presentan agua se emplea la inyección de espumantes o agua más espumante que facilitan la eliminación del polvo.

2. **Voladura.** En esta operación se producen dos tipos de contaminación: una debida a los gases de reacción de los constituyentes químicos de los explosivos, que es inevitable y relativamente poco importante en atmósferas abiertas, y otra la producida por el polvo que se lanza al aire al proyectarse y desplazar la roca. Esta última podría aminorarse mediante la retirada de la superficie de todo el detritus de la perforación y utilizando para el retacado material granular de préstamo, tacos de arcilla o tacos hidráulicos, si se tratara de barrenos especiales.

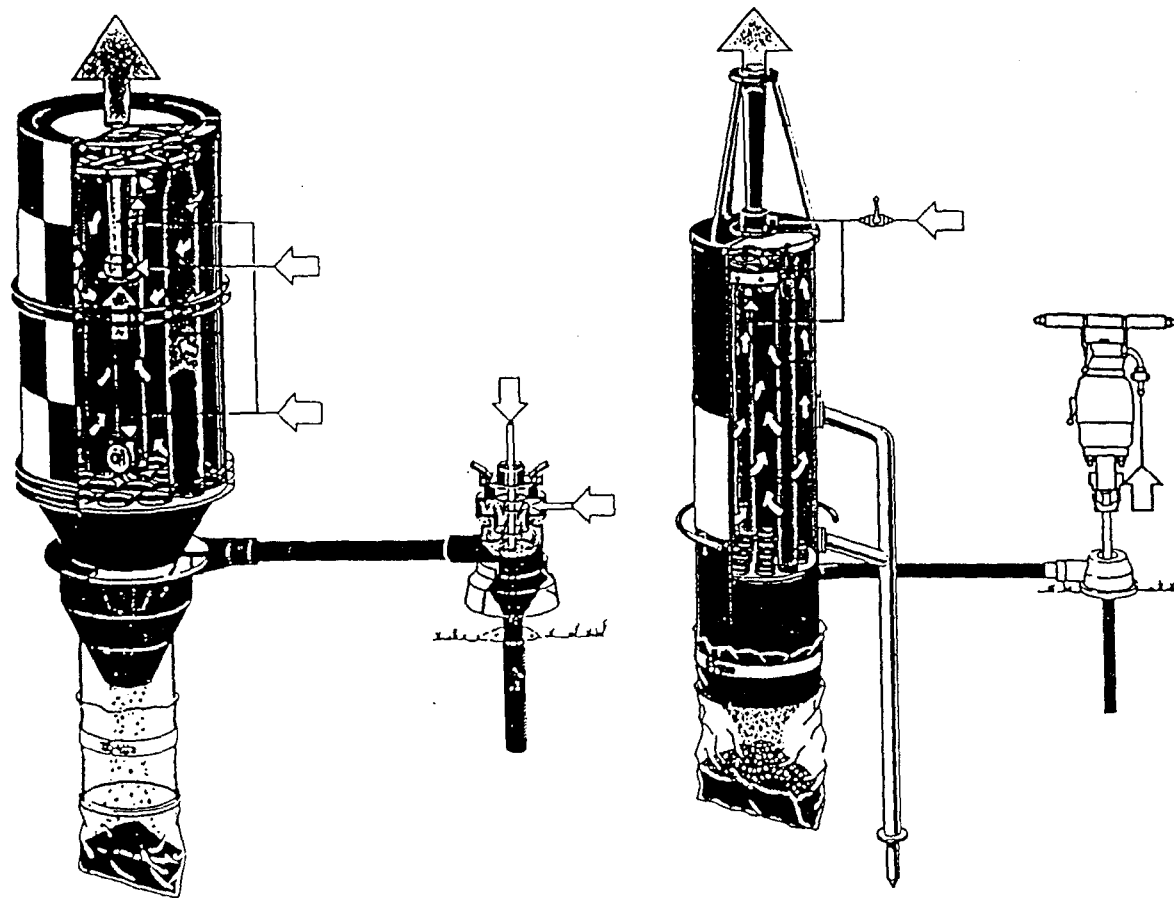


Figura 6.7. Captadores de polvo en equipos de perforación.

3. **Excavación y carga.** En estas operaciones se efectúa el arranque mecánico y la carga del estéril y del mineral, que va acompañada de una producción de finos que se pone de manifiesto durante el vertido del material sobre las unidades de transporte. Para evitar el polvo se recurre a un riego frecuente de las superficies de los montones de roca en los tajos, pero teniendo especial cuidado en no afectar negativamente a las operaciones de cribado y conminución, sobre todo de aquellos materiales que contienen arcilla.
4. **Transporte.** Es la principal fuente de polvo fugitivo que se produce por la circulación de los volquetes a través de las pistas y rampas de la mina. El peso de los vehículos hace que se trituren los materiales de construcción de la capa de rodadura de las pistas dando lugar a finos, y los propios neumáticos transportan también pequeñas cantidades de barro que se van depositando a lo largo del trayecto y que, tras su secado, se desintegra generando polvo con el movimiento del aire.

Los métodos de control más utilizados son los siguientes:

- a) **Riego con agua.** Es un método bastante económico y efectivo. La eficacia de control se cuantifica en el 84 % y 56 % para las partículas totales e inhalables respectivamente. El principal inconveniente es la frecuencia de aplicación, sobre todo en regiones áridas y en épocas de estío. El coste depende del equipo utilizado, que puede ser una simple cisterna remolcada con riego por gravedad o un vehículo especial adaptado con

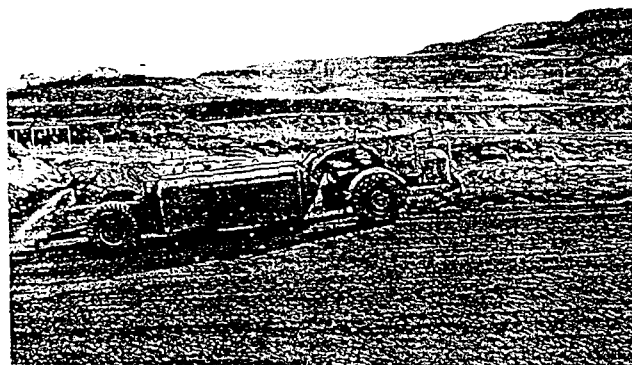


Foto 6.1. Vehículo especial de riego.

bombas y aspersores, y de los volúmenes de agua necesarios.

- b) **Estabilizantes químicos.** Los tres tipos de sustancias químicas empleadas son: agentes humidificadores, sales higroscópicas y agentes creadores de costra superficial. Cada uno de estos productos actúa en el control del polvo según principios diferentes.

Los agentes humidificadores operan reduciendo la tensión superficial del agua, consiguiendo humedecer el polvo más fino, que es el de más difícil control.

Las sales higroscópicas atraen el vapor del agua de la atmósfera, retrasan la evaporación de sus soluciones con el agua y elevan la humedad de la capa superficial de las pistas. Además, el aumento de humedad incrementa la cohesión y compactación de los materiales de las pistas, resultando una reducción importante del polvo. Las sales que más se utilizan son el cloruro sódico y el cloruro cálcico. Este último, se aplica bien en estado sólido en forma de laminitas o en forma de solución concentrada. Cuando el producto se esparce tal cual, se utilizan diversos procedimientos mecánicos, tales como las esparcidoras de arena y las máquinas agrícolas de esparcir granos, previamente se recomienda humedecer los suelos mediante riego con agua. Si lo que se emplea es una salmuera se distribuirá el producto mediante una cisterna móvil, provista de un dispositivo de aspersión.

En las Tablas 6.III y 6.IV se recogen las proporciones recomendadas de empleo del cloruro cálcico, en función de la naturaleza del terreno a tratar, la primera en estado sólido y la segunda en forma de solución concentrada.

TABLA 6.III

NATURALEZA DE LA SUPERFICIE POLVORIENTA	PROPORCIONES POR ESPARCIDO	PROPORCIONES POR AÑO
Terrenos estabilizados. Terrenos estables, como macadam, tierra apisonada, dolomíticos, etc. Terrenos enarenados para campos de educación física.	400 g/m ²	800 g/m ²
Terrenos arenosos, aglomerados de escoria, etc.	600 g/m ²	1.200 g/m ²
Terrenos limosos y arcillosos.	2 esparcidos de 300 g/m ² con varias semanas de intervalo.	600 g/m ²

Fuente: SOLVAY.

TABLA 6.IV

NATURALEZA DE LA SUPERFICIE POLVORIENTA	PROPORCIONES DE SOLUCION AL 30 %
Grava compactada, macadam, tierra apisonada.	1 l/m ²
Terreno arenoso, aglomerado de escoria.	1,5 l/m ²
Terreno limoso o arcilloso.	2 esparcidos de 0,75 l/m ² con varias semanas de intervalo.

Fuente: SOLVAY.

La solución concentrada se prepara normalmente para alcanzar el 30 % de cloruro cálcico anhidro. Para ello se disuelven 50 Kg de laminitas en 80 l de agua. Los 100 litros de solución obtenidos se esparcen sobre la superficie a tratar. Si el suelo está muy seco, o si es un terreno ya acondicionado, se diluye la salmuera al 30 % en dos o tres veces su volumen de agua y se esparce un volumen de solución doble o triple al anterior por metro cuadrado.

Los agentes creadores de costra superficial pueden estar constituidos por lignosulfonatos, resinas sintéticas, compuestos vinílicos, polímeros sintéticos, etc. Se sueñen aplicar en húmedo y tras su secado se consigue la formación de una costra que permite un buen control del polvo con una eficiencia próxima al cien por cien.

En la Tabla 6.V se indican algunos costes orientativos de aplicación de estas sustancias.

TABLA 6.V. COSTES DE EMPLEO DE ESTABILIZANTES QUIMICOS

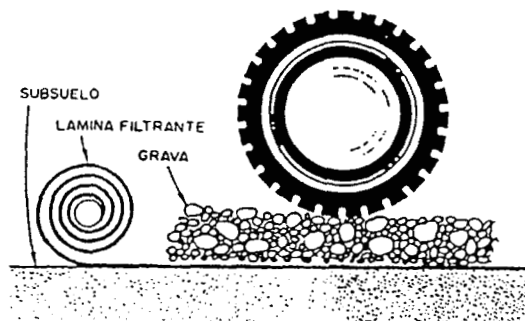
MATERIAL	COSTE (PTA/1.000 m ²)
Compuestos de estireno/butadieno.	3.000-6.500
Compuestos acrílicos.	6.500-21.000
Compuestos vinílicos.	1.500-6.500
Polímeros sintéticos.	19.000-55.000
Lignosulfonatos.	3.000-6.500

Fuente: Martín, Brookman y Hirsch.

Por último, indicar que en algunas explotaciones se utilizan esporádicamente aceites usados de la maquinaria para eliminar el polvo de las pistas. La frecuencia de aplicación es escasa, con el fin de evitar el riesgo de accidentes al patinar los vehículos de transporte.

- c) **Láminas filtrantes sintéticas.** Estas láminas, también llamadas geotextiles, se utilizan en la es-

tabilización de suelos, drenaje, control de la erosión, etc. Ensayos realizados extendiendo estas láminas sobre las pistas y cubriéndolas con material granular grueso han demostrado que además de conseguirse un diseño óptimo y mantenimiento reducido se disminuye la cantidad total de partículas suspendidas en un 58 % y de partículas inhaladas en casi un 46 %, dependiendo tales porcentajes de la naturaleza del material de subbase y capa de rodadura.



6. **Puntos de transferencia y manipulación de minerales.** Los sistemas empleados son: barrera mecánica/física o presión negativa de cierre, inyector de agua con o sin espuma, captadores de polvo, ciclones, filtros y precipitaciones electrostáticas.
7. **Escombreras y taludes de roca expuestos a la acción del viento.** La existencia de superficies desnudas, tanto en las escombreras como en los frentes de trabajo, sobre las cuales incide el viento, constituyen

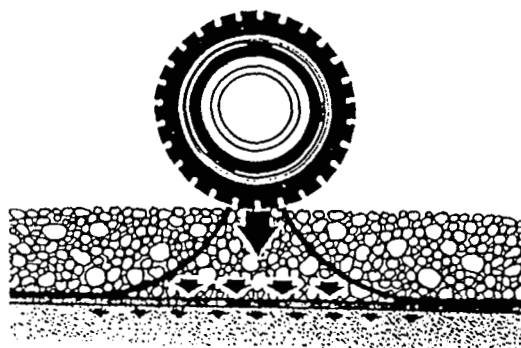


Figura 6.8. Construcción de una pista de transporte con lámina filtrante.

Finalmente, los camiones no extraviarios que transportan el mineral o el concentrado deben someterse a una limpieza antes de su entrada en las carreteras de uso público. Las estaciones de lavado y tramos de limpieza especiales, que dispondrán de aspersores laterales de agua a presión, Fig. 6.9, se ubicarán en las proximidades a los puntos de acceso de la red viaria. Como resumen, en la tabla 6.VI, se indican las eficiencias de control y los costes de aplicación de distintas sustancias empleadas en la lucha contra el polvo.

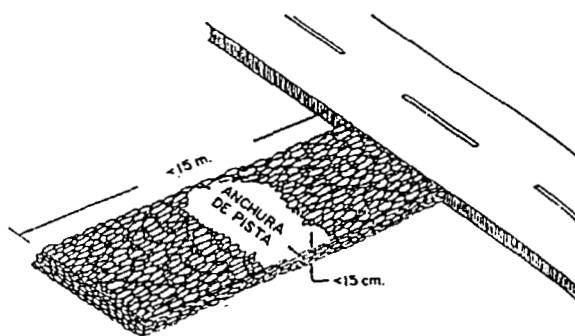


TABLA 6.VI. COSTES Y EFICIENCIAS DE CONTROL PARA PISTAS SIN PAVIMENTAR

METODO	EFICIENCIA DE CONTROL ESPERADA (%)	COSTE EFECTIVO (PTA/Km/año/%)
Aceites	50-98	28.000-230.000
Agua	40-84	38.000-130.000
Cl ₂ Ca	60	39.000
Coherex ®	90-96	20.000-40.000

Fuente: Levene y Drehmel.

5. **Almacenamiento de minerales.** Existen tres métodos utilizados en el control del polvo fugitivo procedente de las pilas o stocks de mineral: cubrición de los parques, barreras verticales contra el viento y empleo de agentes químicos que forman costras superficiales. El más costoso de todos es el primero, por cuanto supone inversiones iniciales de capital muy elevadas.

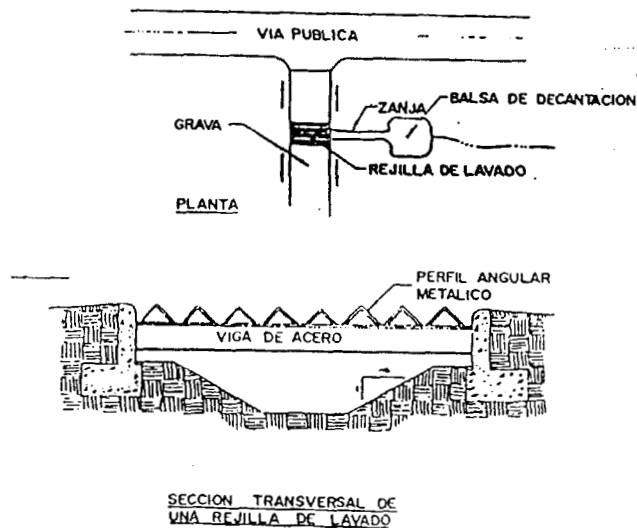


Fig. 6.9. Tramos de limpieza y rejilla de lavado.

una fuente de formación de polvo muy importante a la que debe prestarse una especial atención. Los vientos se clasifican por la velocidad, la dirección y la turbulencia. La velocidad de los vientos decrece sustancialmente conforme disminuye la distancia al suelo debido a la fricción, pero aumenta la turbulencia cuando las velocidades son superiores a los 3 ó 5 km/h.

La erosión eólica es un fenómeno superficial que depende básicamente de la velocidad y turbulencia del viento, y puede tener lugar por tres tipos de movimientos de las partículas: saltación, deslizamiento superficial y suspensión. Cualquiera de esos movimientos se ve agravado por los climas secos, ausencia de vegetación, tráfico de vehículos, etc.

4. Eflación: Remoción de las partículas finas susceptibles de ser transportadas en suspensión, dejando los granos más gruesos en el terreno.
5. Abrasión: Destrucción de las partículas bajo el impacto de otras partículas que se mueven por saltación.

El mismo autor citado clasifica los suelos minerales en cuatro tipos básicos, según el tamaño de las partículas, con respecto a su respuesta a la acción del viento. Las cuatro fracciones consideradas son las indicadas en la Tabla 6.VIII.

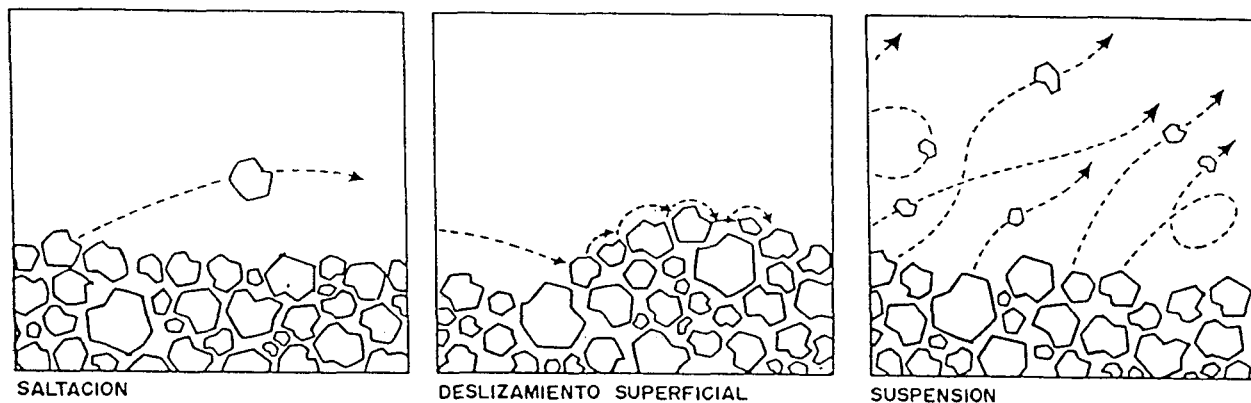


Figura 6.10. Tipos de movimientos de las partículas de un suelo.

La velocidad mínima requerida para el movimiento de las partículas por la acción del viento varía con el tamaño de éstas. Así, por ejemplo, para granulometrías entre 0,1 y 0,15 mm los umbrales de velocidad están entre 13 y 14,5 km/h, a una distancia del suelo de 15 cm.

Un hecho curioso es que para tamaños inferiores o superiores a los indicados los umbrales de velocidad aumentan, encontrándose entre los 20 y los 50 km/h a una distancia de 30 cm de la superficie.

La erosión eólica se produce, de acuerdo con Chepil, por los siguientes mecanismos:

1. Detrusión: Dislocamiento de las partículas de roca proyectadas desde la superficie y causada por la acción del viento y por el bombardeo de las partículas erosivas impulsadas por el viento.
2. Eflución: Remoción de las partículas con diámetros entre 0,05 y 0,5 mm causada principalmente por saltación.
3. Extrusión: Empuje activo de las partículas de suelo que son demasiado gruesas para ser removidas por saltación.

TABLA 6.VII

FRACCION	DIAMETRO DE LAS PARTICULAS (mm)	SUSCEPTIBILIDAD AL VIENTO
A	< 0,42	Altamente erosionable.
B	0,42-0,84	Difícilmente erosionable.
C	0,84-6,4	No erosionable normalmente.
D	> 6.4	No erosionable.

Los métodos de control de polvo ante estas situaciones son:

- Instalación de pantallas contravientos.
- Implantación de la vegetación.
- Empleo de estabilizadores.

El primer método tiene una efectividad reducida debido a que el efecto posee un carácter local y las superficies son en ocasiones irregulares y muy extensas.

En la Fig. 6.11 se representa una pantalla vegetal de una altura dada y los porcentajes de reducción de la velocidad del viento en diferentes zonas de influencia de la misma.

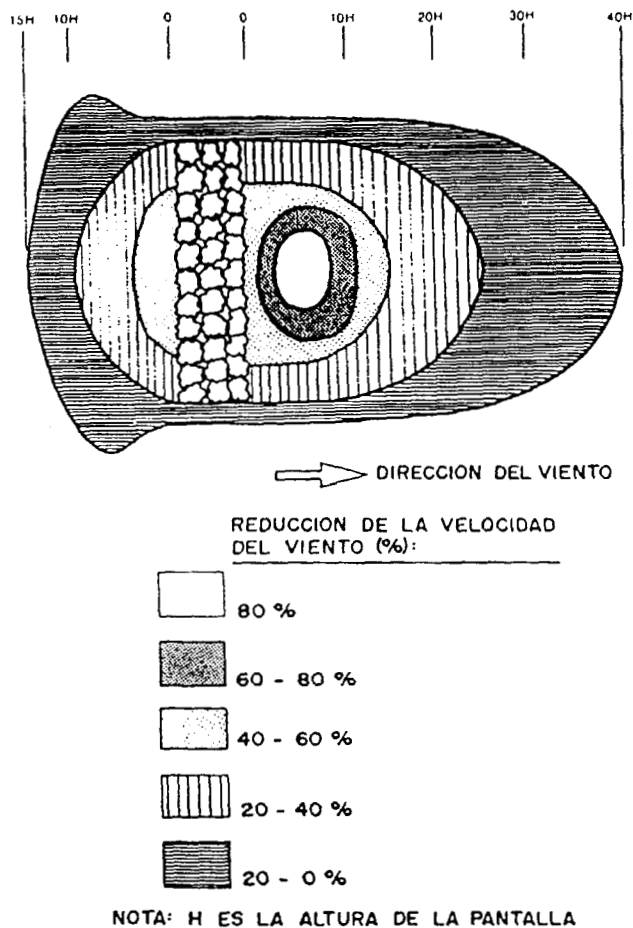


Figura 6.11. Modificación de la velocidad del viento debido a una pantalla vegetal.

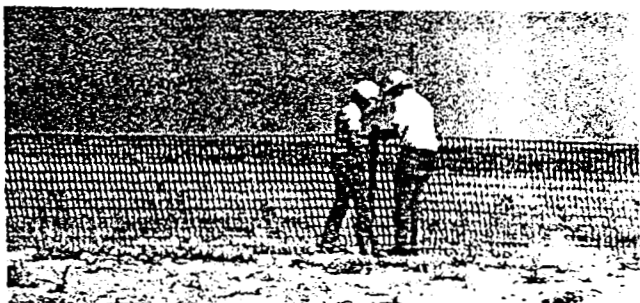


Foto 6.2. Instalación de una pantalla cortavientos.

El establecimiento de la vegetación es la solución ideal, pues reporta numerosas ventajas. Pero esto es en ocasiones inviable debido a que no se han alcanzado las situaciones finales previstas. No obstante, el correcto diseño y planificación de las operaciones puede permitir lle-

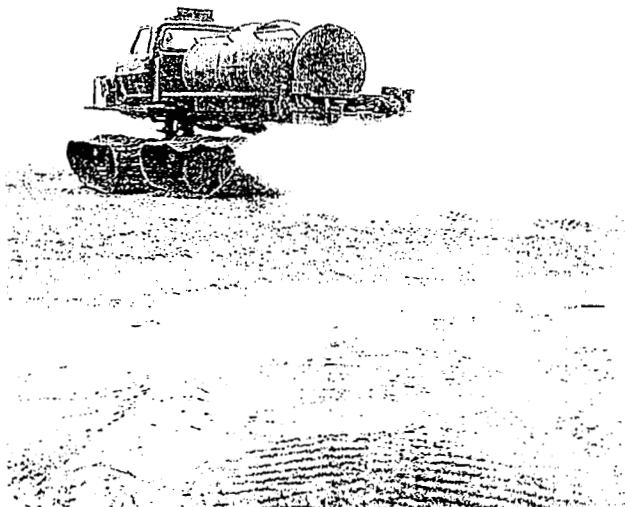


Foto 6.3. Aplicación de estabilizantes químicos sobre la plataforma de una presa de residuos.

gar a conseguir en el tiempo estados definitivos lo antes posible.

Por último, en las plataformas y taludes de las escombreras y presas de residuos y huecos excavados en materiales sueltos puede recurrirse al riego con estabilizantes químicos como los citados anteriormente.

6. RESUMEN DE RECOMENDACIONES

Para concluir este capítulo, se enumeran seguidamente las principales recomendaciones para minimizar la contaminación del aire:

1. Riego periódico de las pistas y accesos de las minas.
2. Estabilización química de los materiales de construcción de las pistas.
3. Pavimentación de los accesos permanentes a las explotaciones.
4. Retirada de las pistas del material formado por acumulación del polvo.
5. Reducción de la velocidad de circulación de vehículos.
6. Revegetación de áreas adyacentes a las pistas de transporte.
7. Limitación de los cruces de pistas.
8. Control del polvo procedente de la carga de los volquetes.
9. Reducción de las áreas de excavación expuestas a la acción del viento.
10. Rápida revegetación de los terrenos restituidos.

1. Mejora de los métodos de manipulación de los materiales.
2. Empleo de pantallas, vegetales o de otro tipo, frente al viento.
3. Control del polvo durante la perforación por medio de captadores.
4. Reducción del número de tajos con voladuras.
5. Sustitución de los volquetes por cintas transportadoras.
6. Disminución de la producción durante los vendavales.
7. Extinción de los puntos de combustión espontánea del carbón.
8. Reducción del tiempo entre las fases de explotación y restauración, y
9. Control del polvo durante el transporte del mineral desde la planta de tratamiento.

BIBLIOGRAFIA

- ARBA: «Materials for Stabilization», 1976.
- DE LORA, F. y MIRO, J. editores.: «Técnicas de Defensa del Medio Ambiente». LABOR, 1978.
- GENERALITAT DE CATALUNYA: «Recomanacions Tècniques per a la Restauració i Acondicionament dels Espais Afectats per Activitats Extractives». 1987.
- HAROLD, R. F.: «Filter Fabrics: A New Mining Tool». Coal Age.
- JACKO, R. B.: «Air Quality: Surface Mining Environmental Monitoring and Reclamation Handbook». ELSEVIER, 1983.
- JARDON, S.: «Restauración del Medio Natural Afectado por la Minería del Carbón a Cielo Abierto», 1984.
- PARRIS, J. W. and SARRY, F. G.: «Conservation and Reclamation for Mined Lands» South Carolina, 1983.
- SALT INSTITUTE.: «Dust Control», 1962.
- SALT INSTITUTE.: «Guidelines for Salt Stabilization of Roads and Streets», 1974.
- SOLVAY.: «Cloruro Cálcico».
- PARRETT, F. W.: «Foam Supressants —An Alternative for Dust Control». Industrial Minerals. January, 1986.
- WITCO.: «The Coherex Dust Control Manual».

CONTROL Y PREVENCIÓN DEL RUIDO

1. INTRODUCCIÓN

La minería, al igual que otros sectores de la industria, ha sido objeto de una creciente mecanización que ha permitido el aprovechamiento de depósitos minerales de escasa rentabilidad económica hasta épocas recientes. Las ventajas derivadas de tal progreso han sido, básicamente, un aumento de la productividad, una reducción de los costes y una disminución de la fatiga de los operadores. Pero, por el contrario, han surgido algunos inconvenientes entre los que destaca el incremento del ruido en las propias explotaciones y su entorno.

De todos es conocido que los ruidos de alta intensidad pueden llegar a provocar sobre las personas un estado de agotamiento, fatiga nerviosa, disminución de rendimiento y pérdida de audición. También, los ruidos de menor intensidad pueden perturbar a los habitantes de áreas próximas a las explotaciones, lo que cada día es más frecuente, llegando a ser causa de quejas y reclamaciones que pueden derivar en un estado de conflicto permanente.

En este capítulo, tras repasar algunos conceptos básicos, se analizan brevemente las causas y los niveles de ruido en las instalaciones de tratamiento y equipos móviles, los sistemas de control y prevención, los métodos de medida y los niveles de ruido aceptables. Se ha excluido el ruido producido en las voladuras, ya que es objeto de tratamiento en el Capítulo 9.

2. CARACTERÍSTICAS DEL RUIDO

El sonido se produce cuando cualquier superficie sólida vibra e imprime a las partículas del medio que la rodea unos desplazamientos que dan lugar a unas ondas de presión.

El sonido es un tipo de energía que se propaga en el aire como ondas elásticas en todas las direcciones y a una velocidad constante que depende de la temperatura del medio:

$$VA(m/s) = 331,6 + 0,6 \cdot T(^{\circ}C)$$

En aquellos casos en los que se interpongan obstáculos en su propagación, se producirá el fenómeno de difracción cuando la longitud de onda sea menor que las dimensiones del mismo.

2.1. Ruido

Se define como ruido todo sonido indeseable percibido por el receptor. En un sentido amplio, puede considerarse como ruido cualquier sonido que interfiere en alguna actividad humana. Para que las ondas sonoras puedan detectarse por el oído la frecuencia de éstas debe estar comprendida entre 20 Hz y 20.000 Hz.

La relación que existe entre la frecuencia y la velocidad de propagación de las ondas sonoras es:

$$VA = \lambda \cdot f$$

donde:

λ = Longitud de onda o espacio recorrido por la misma en un ciclo completo.

Las ondas sonoras que componen el ruido varían en frecuencia e intensidad.

2.2. Tono

Esta característica determina la altura del ruido y queda definida por la frecuencia fundamental, que es la frecuencia de la onda senoidal, componente de una onda acústica completa, cuya presión acústica o intensidad, frente a las restantes ondas componentes, es máxima.

Dado que el ruido es una mezcla compleja de diferentes frecuencias, es necesario conocer su espectro de frecuencias, que consiste en la representación de la distri-

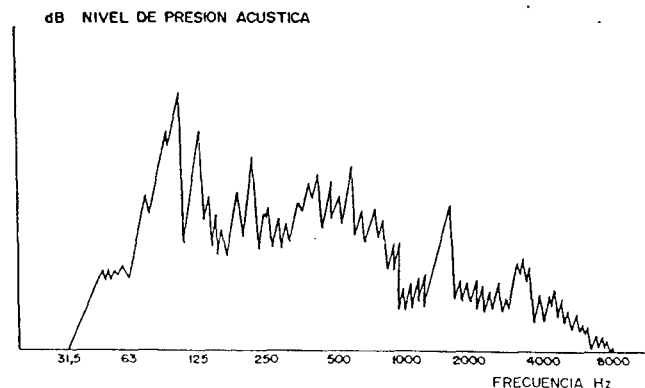


Figura 7.1. Espectro de frecuencias de un ruido.

bución de energía de un ruido en función de sus frecuencias componentes. Este estudio puede hacerse en bandas de octava o en bandas de tercios de octava.

Se entiende por bandas de octava la gama de frecuencias comprendidas entre una dada «f» y otra «2f» y entre «f» y « $\sqrt{2} \cdot f$ » en el caso de bandas de tercios de octava.

De acuerdo con la norma UNE, las bandas respectivas entre 100 y 5.000 Hz son:

- BO (125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000 Hz).
- BTO (100, 126, 160, ..., 3.150, 4.000, 5.000 Hz).

El oído humano es más sensible a las frecuencias altas que a las bajas, aunque para ambas se tenga el mismo nivel de presión sonora.

2.3. Sonoridad

Es una característica subjetiva de sonido que representa la sensación sonora producida por el mismo en la persona receptora. Depende fundamentalmente de la intensidad y frecuencia del sonido.

En la medida de la sonoridad intervienen los siguientes factores:

- **Potencia de la fuente (W).** Es la energía emitida en la unidad de tiempo por una fuente determinada.
- **Intensidad acústica (I).** Es la energía que atraviesa, en la unidad de tiempo, la superficie de una esfera de radio la distancia «r», desde el foco al punto en el que se efectúa la medición.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \text{ (W/m}^2\text{)}$$

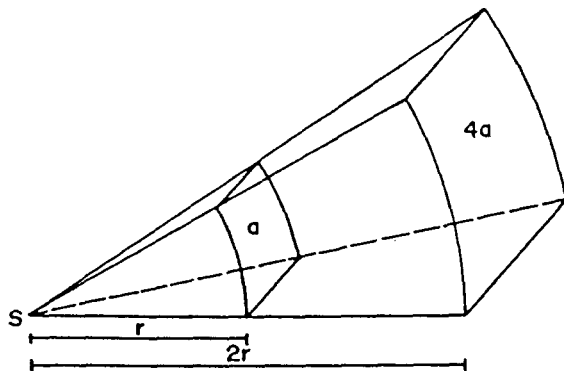


Figura 7.2. Propagación del sonido. Ley del inverso del cuadrado.

- **Nivel de referencia y unidades.** Según las Leyes de Weber-Fechner, cuando al oído se le somete a estímulos que varían en forma de progresión geométrica, las sensaciones que dicho oído experimenta crecen en forma de progresión aritmética. La relación entre dichas progresiones es logarítmica, es decir, las sensaciones o niveles de intensidad acústica son el logaritmo de los estímulos:

$$L_i = \text{Log} \frac{I}{I_0}$$

« I_0 » es distinta y diferente de cero, luego los estímulos están siempre relacionados con la «I» en un punto y momento determinado y la « I_0 » del umbral de audición. El valor que se acepta para ese umbral de sensibilidad del oído humano medio es de 10^{-12} W/m^2 para una frecuencia de 100 Hz.

La unidad fundamental de una escala logarítmica que mide la relación entre dos medidas es el «Belio», siendo empleado comúnmente el submúltiplo «Decibelio» (dB),

$1 \text{ dB} = \frac{1}{10} \text{ Belios}$. Así, la expresión del nivel de intensidad acústica adopta la forma:

$$L_i(\text{dB}) = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \cdot \text{dB}$$

Si se empleara el nivel de potencia acústica la expresión anterior se transformaría en:

$$L_w(\text{dB}) = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} \cdot \text{dB}$$

y para el nivel de presión sonora:

$$L_p(\text{dB}) = 20 \cdot \log \frac{P}{P_0} \cdot \text{dB}$$

donde la presión sonora de referencia « P_0 » vale $2 \cdot 10^{-5} \text{ Nw/m}^2$. La Fig. 7.3 recoge los niveles de intensidad de diferentes fuentes de sonido y los efectos que producen.

	Factor de intensidad de sonido	Nivel de sonido, dB	Fuente del sonido
Gama perjudicial	100 000 000 000 000	140	motor a reacción (25 m)
	10 000 000 000 000	130	pistola remachadora

	1 000 000 000 000	120	UMBRAL DEL DOLOR
			avión de hélices (50 m)
zona peligrosa	100 000 000 000	110	perforadora de roca
	10 000 000 000	100	taller de calderería
	1 000 000 000	90	camión pesado
zona segura	100 000 000	80	calle muy transitada
	10 000 000	70	coche particular
	1 000 000	60	conversación normal (1 m)
	100 000	50	conversación baja (1 m)
	10 000	40	música suave
	1 000	30	susurro (1 m)
	100	20	ciudad tranquila
10	10	ruido de hojas	
	1	0	UMBRAL DE AUDICIÓN

Figura 7.3. Niveles de intensidad de distintas fuentes de sonido.

Ya se ha indicado que la sensibilidad auditiva varía con la frecuencia. El oído filtra de una forma determinada las frecuencias complejas de un ruido. Por ello, para comparar mejor el ruido que se quiere medir con la sensación sonora que se percibe, es necesario simular en los aparatos de medida el tipo de filtro que tiene el oído, mediante las llamadas redes ecualizadoras o escalas de compensación. Normalmente, se utilizan tres tipos de escalas (A, B y C) cuyos valores de compensación pueden observarse en la Fig. 7.4.

- La escala «A» corrige las frecuencias altas y bajas.
- La escala «B» modifica las frecuencias muy bajas, y
- La escala «C» corresponde a una respuesta lineal.

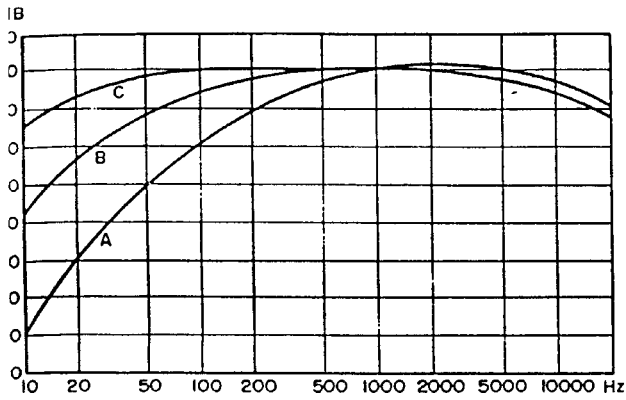


Figura 7.4. Escalas de compensación.

Se recomienda generalmente la escala de compensación «A», ya que ha mostrado mejor correlación con las sensaciones subjetivas generadas por ruido ambiental en áreas industriales y de tráfico. Si se utiliza la escala de compensación «A», la escala de dB se transforma en B (A).

4. Adición de niveles sonoros

Cuando existen varias fuentes de sonido, el nivel de presión, potencia o intensidad acústica resultante no puede calcularse recurriendo a la simple fórmula aritmética de los niveles respectivos. Para ello, se deben emplear expresiones semejantes a la siguiente:

$$L_{\text{R}} = 10 \cdot \log \left[\text{antilog} \frac{I_1}{10} + \text{antilog} \frac{I_2}{10} + \dots \right]$$

Si en vez de una fuente sonora hay dos iguales, el nivel de intensidad acústica aumenta 3dB, que es un incremento que resulta inapreciable para el oído. En el caso de tres fuentes sonoras iguales el nivel aumentará 4,77 dB, que ya es perceptible para el oído humano. Un incremento de 10 dB es juzgado por el oído como el doble de sensación sonora.

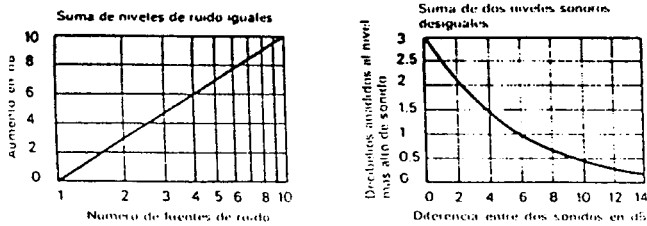


Figura 7.5. Suma de niveles sonoros.

De la misma manera cuando las fuentes sonoras presentan diferentes niveles, puede utilizarse el ábaco de la Fig. 7.5 para calcular el nivel resultante. Si, por ejemplo, dos fuentes generan ruidos de 81 y 85 dB, como la diferencia es de $85 - 81 = 4$ dB el resultado es $85 + 1,5 = 86,5$ dB.

2.5. Atenuación del sonido con la distancia

La atenuación del sonido por la difusión y absorción molecular en el aire, en un campo abierto, queda reflejada en función de la distancia en la Fig. 7.6.

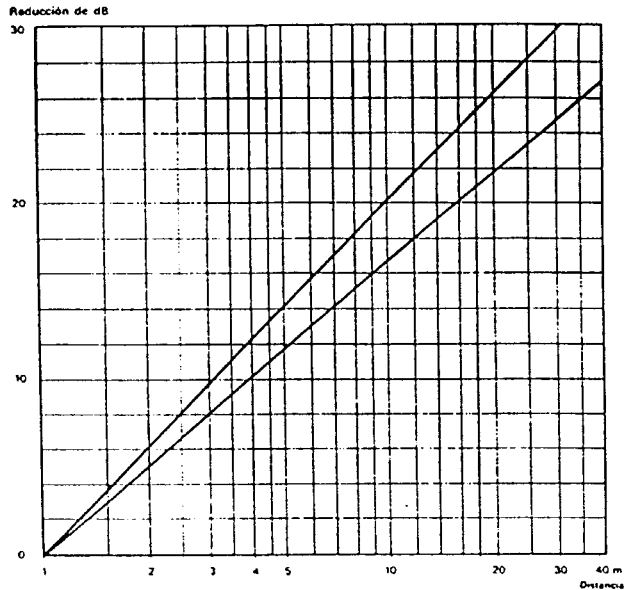


Figura 7.6. Reducción del nivel sonoro con la distancia. Curva superior sin reflexión en el suelo. Curva inferior con reflexión en el suelo.

Si se duplica la distancia, se reduce el nivel sonoro en 6 dB, y si se dobla la masa unitaria de un aislamiento, el nivel sonoro se reduce en 6 dB.

2.6. Tipos de ruidos

Las sensaciones de las personas frente a los ruidos dependen en gran medida de la tipología de éstos. En general, pueden clasificarse en ruidos continuos y ruidos intermitentes. Los primeros, que son constantes en el tiempo o presentan pequeñas variaciones, pueden definirse por el Nivel de Intensidad Acústica. Sin embargo, una característica fundamental del ruido generado por los equipos mineros es su variación continua con el tiempo. Dichas variaciones pueden alcanzar con facilidad 20 ó 30 dB (A) en unos pocos segundos, lo que dificulta la descripción del ruido con un simple valor, ya que sólo sería representativo del nivel en un instante.

En los ruidos intermitentes, es necesario incorporar el parámetro tiempo a lo largo del cual es representativo el nivel. Se introducen entonces los Niveles Sonoros Estadísticos, superados durante distintos porcentajes de tiempo. Todas esas variaciones y los distintos niveles que los identifican, pueden reducirse a un solo valor mediante el concepto de Nivel Continuo Equivalente «Leq», que representa el nivel de un hipotético ruido continuo que, durante el mismo tiempo, tiene la misma energía sonora que el nivel intermitente o variable que se quiere medir.

$$L_{\text{eq}} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \sum t_i \cdot 10^{L_i/10}$$

donde:

T = Tiempo total de la medida.

t_i = Tiempo de observación durante el cual el nivel sonoro «L_i» no varía en ± 2 db(A).

3. CAUSAS Y NIVELES DE RUIDOS EN EXPLOTACIONES MINERAS

Las dos categorías principales de fuentes de ruido en minería son las plantas de tratamiento y los equipos móviles.

Las plantas fijas comprenden una amplia gama de aparatos, incluyendo trituradoras, cribas, cintas, tolvas, celdas de flotación, acondicionadores, motores, etc. Normalmente, se ubican en una o varias áreas próximas a la mina y, frecuentemente, se construyen cubiertas para proteger a los operarios y maquinaria de las inclemencias del tiempo, e incluso para mejorar la seguridad. En la Tabla 7.1 se indica el rango de niveles de ruido correspondiente a diversos equipos de instalaciones fijas.

Los equipos móviles en minería son los propios de las operaciones básicas, perforación, voladura, carga, transporte y servicios. Existe una gran variedad de modelos y marcas de equipos en la industria minera. En la Fig. 7.7 se recogen los niveles de ruido, medidos en el puesto del operador, de las unidades más empleadas en la minería americana del carbón, según un estudio realizado por el U.S Bureau of Mines en 1979.

En lo referente a las causas del ruido en la maquinaria móvil más utilizada en minería, se han detectado seis como principales:

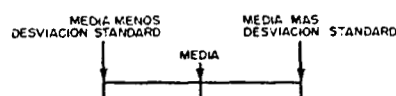
- Funcionamiento del motor.
- Salida de los gases de escape.
- Funcionamiento del ventilador del sistema de refrigeración.
- Funcionamiento de la transmisión.
- Funcionamiento del sistema hidráulico, y
- Movimiento de las orugas o roce de los neumáticos con el suelo, según el tipo de máquina.

No en todos los equipos estas fuentes de ruido tienen, lógicamente, la misma importancia.

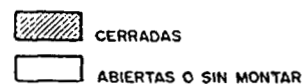
TABLA 7.1. NIVELES MEDIOS DE RUIDO EN INSTALACIONES DE PLANTAS FIJAS

EQUIPO	NIVEL DE RUIDO (dB(A))	PUNTO DE MEDIDA	EQUIPO	NIVEL DE RUIDO (dB(A))	PUNTO DE MEDIDA
Trituradora de mandíbulas.	90-100	Posición del operador.	Celdas de flotación.	63-91	Posición del operador.
Cono triturador.	92-98	Posición del operador.	Ventiladores eléctricos.	Hasta 100	A 5 m.
Molino de bolas.	Hasta 100	Posición del operador.	Martillos de aire comprimido.	104-112	Posición del operador.
Cintas transportadoras.	82-113	Posición del operador.	Sala de compresores (85 m ³ /min).	52	A 300 m.
Bombas.	89-100	Posición del operador.	Concentrador (7.000 t/día).	70	A 100 m.

LEYENDA



PUERTAS y/o VENTANAS



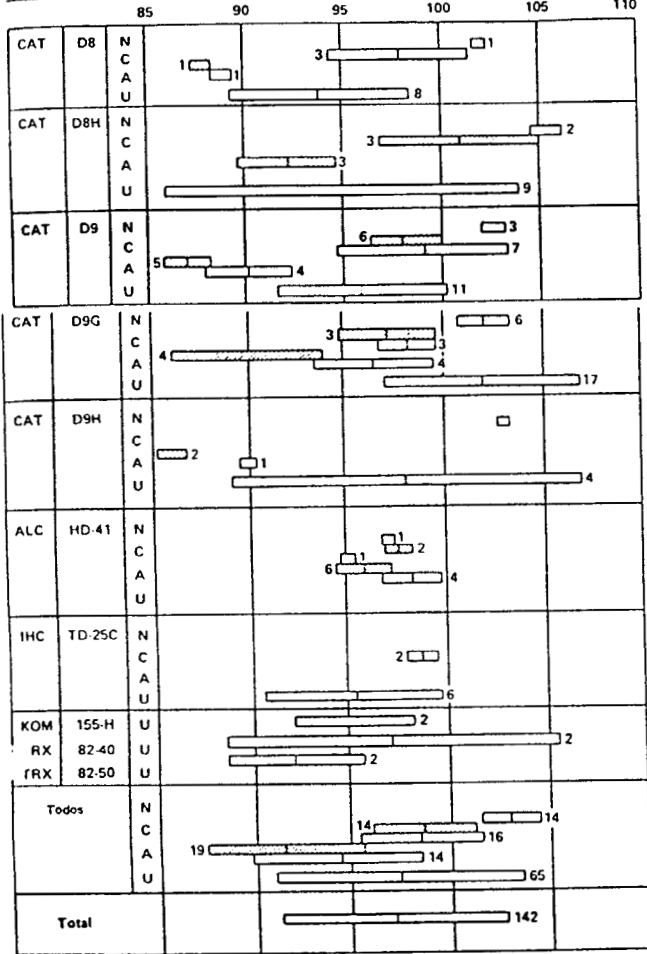
FABRICANTES

ALC	Allis-Chalmers	GTS	Gates	MSF	Massey-Ferguson	
BAT	Bates	GMC	General Motors	MGN	Michigan	
BUC	Bucyrus-Erie	HGH	Hough	NWT	Northwest	
CAT	Caterpillar	IHC	International	PGE	Page	
CHP	Champion	JOY	Joy	PRS	Parsons	
CGP	Chicago Pneumatic	KOM	Komatsu	ROB	Robbins	
CLK	Clark	KRS	Kress	SLM	Salem	
DRT	Dart	LMA	Lima	SRD	Schroeder	
DVY	Davey	LOR	Lorain	TRX	Terex	A = CABINA ACUSTICA
DLT	Drilltech	LTN	LeTourneau	TJN	Trojan	C = CABINA NO ACUSTICA
EUC	Euclid	MCK	Mack	UNT	Unit Rig	N = NINGUNA
FIA	Fiat-Allis	MTC	Manitowoc	WAB	Wabco	U = DESCONOCIDA
GRD	Gardner-Denver	MRN	Marion			

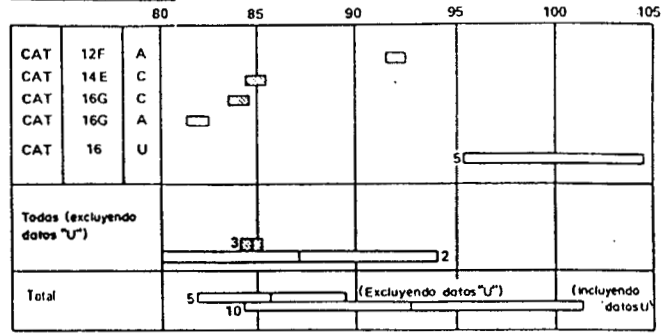
Figura 7.7. Niveles medios de ruido.

NIVELES MEDIOS DE RUIDO

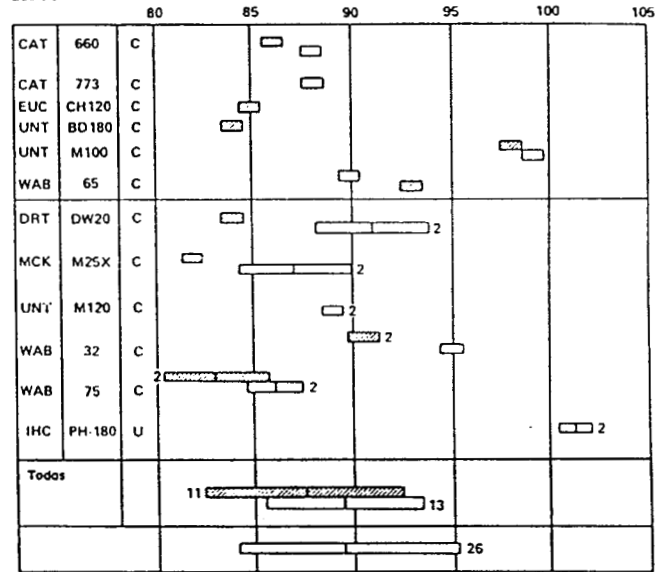
TRACTORES



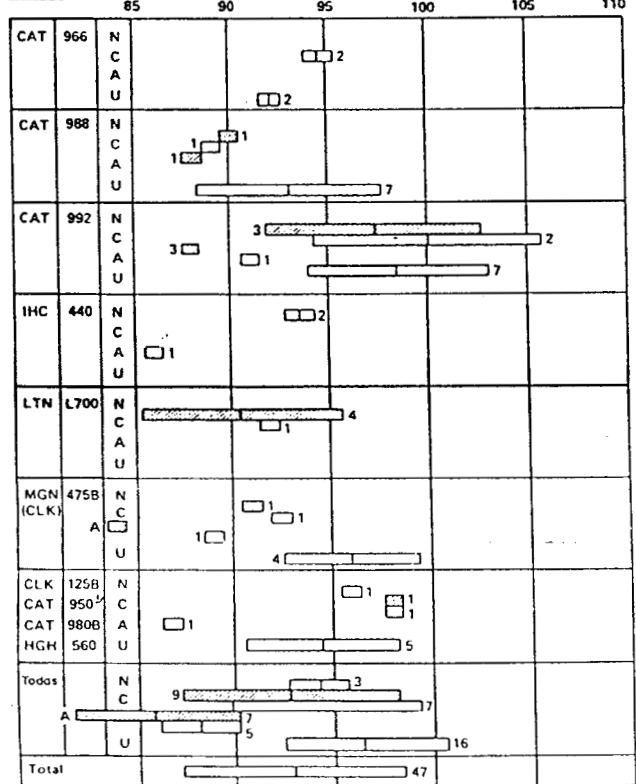
MOTONIVELADORAS



VOLQUETES



PALAS



MOTOTRAILLAS

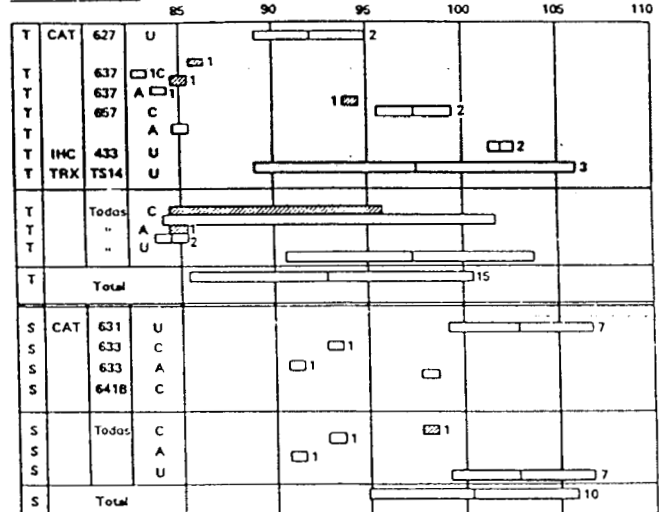


Figura 7.7. Niveles medios de ruido (cont.).

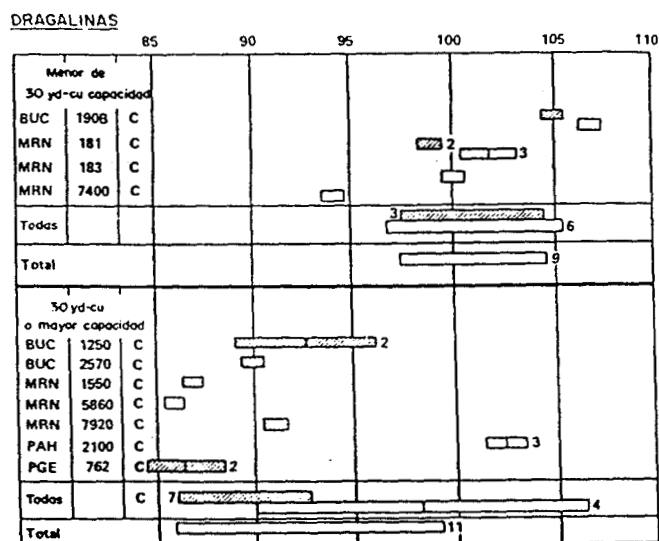
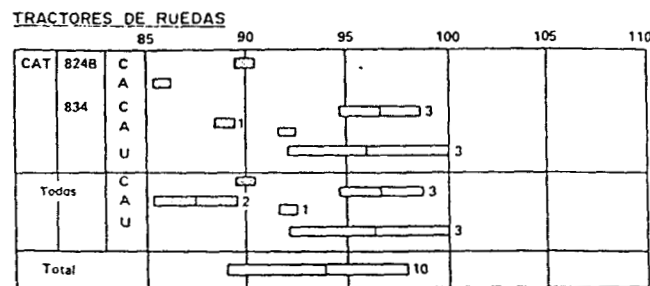
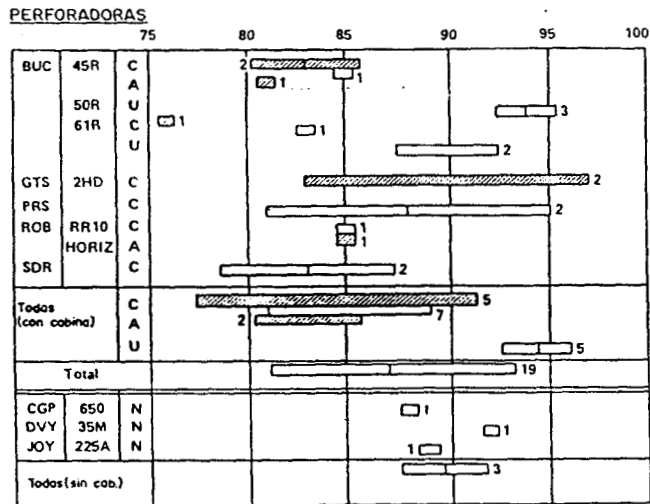


Figura 7.7. Niveles medios de ruido (cont.).

4. CONTROL Y CORRECCION DEL RUIDO

Las tres soluciones que pueden adoptarse para disminuir el ruido son:

- Reducir la causa.
- Aislar la fuente emisora.
- Absorber o atenuar el ruido entre la fuente emisora y el receptor.

Los dos primeros sistemas son los más efectivos, pero a veces requieren el desarrollo de nuevas tecnologías y, por consiguiente, mucho tiempo y capital. El diseño de la maquinaria móvil ha mejorado en los últimos años y se han ido desarrollando sistemas combinados para reducir el ruido, por ejemplo, silenciosos más grandes para los gases de escape, envío del aire del ventilador soplante hacia arriba a través de rejillas que disponen de material absorbente, recubrimientos de goma en las cajas de los volquetes, etc.

Una medida complementaria y de gran efectividad es el mantenimiento regular de la maquinaria, ya que así se eliminan los ruidos procedentes de elementos desajustados o muy desgastados que trabajan con altos niveles de vibración.

También es preciso señalar que en minería a cielo abierto es muy difícil predecir los niveles de ruido en las proximidades de las explotaciones, ya que tanto las condiciones atmosféricas variables como el efecto de la propia topografía influirán y modificarán las trayectorias de propagación.

Una técnica bastante extendida consiste en la construcción de barreras o pantallas entre la fuente emisora y el receptor. El ruido es difractado en la coronación de la pantalla, siendo este efecto más acusado en los ruidos de baja frecuencia que en los de alta, por lo que en estos últimos el apantallamiento es más efectivo. De acuerdo con Moore, la fórmula que permite estimar la reducción del nivel de presión sonora por una pantalla es:

$$R(\text{dB}) = 8,2 \log \left[\frac{44H}{\lambda} \tan \frac{\theta}{2} \right]$$

donde:

- H = Altura de la pantalla (m).
- λ = Longitud de onda de ruido (m).
- θ = Angulo de difracción del sonido.

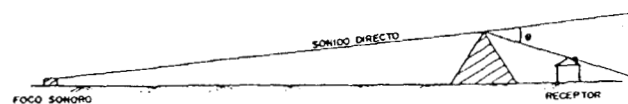
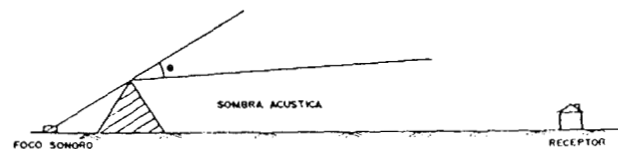
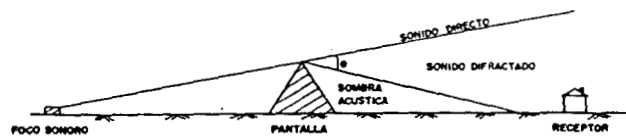


Figura 7.8. Efectos de la localización de una pantalla sobre el ruido percibido por un receptor.

En la Fig. 7.9 se recoge un ábaco de cálculo de la reducción del ruido a partir del denominado valor de pantalla «Zp» y de la frecuencia característica del sonido.

$$\text{VALOR DE PANTALLA: } Z_p = (A+B) - (R+D)$$

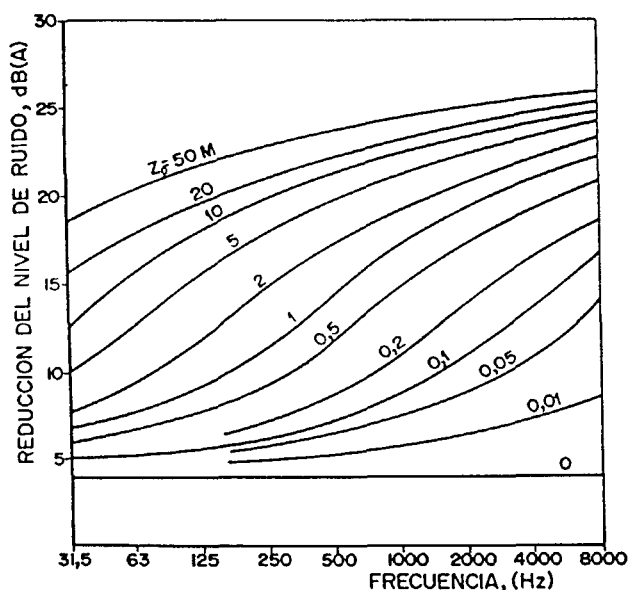
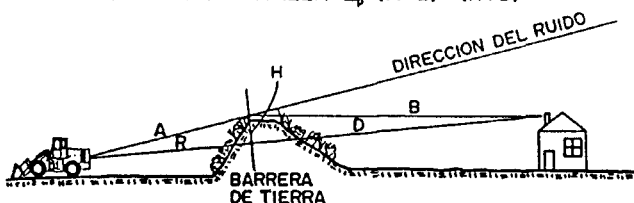


Figura 7.9. Interposición de pantallas entre la fuente de un ruido y los receptores.

En la práctica, la reducción del ruido es menor que la teórica calculada, debido a la turbulencia del aire y dispersión del ruido en la coronación de la pantalla. Estas pantallas se suelen construir con una altura de 5 a 10 m, utilizando los estériles de la mina y, en ocasiones, con la plantación de árboles que, si bien no son muy eficaces en la reducción del ruido, sirven de pantalla visual e incluso de protección frente a posibles proyecciones de roca procedentes de las voladuras.

En la Tabla 7.II se indica la atenuación del sonido debida a distintos tipos de vegetación.

5. MEDIDA Y ANALISIS DEL RUIDO

Para el control del ruido en la industria se utilizan los medidores de nivel de sonido o sonómetros, que responden al sonido de forma parecida a como lo hace el oído humano, y dan una indicación objetiva y reproducible del nivel sonoro. Están básicamente constituidos, Fig. 7.10, por los siguientes elementos:

- Micrófono.
- Amplificador.
- Atenuador calibrado.
- Redes ecualizadoras.
- Dispositivo de lectura.

Los sonómetros integradores que se suelen situar en las proximidades de las explotaciones o equipos, registran el ruido durante un cierto tiempo y dan el nivel continuo equivalente en dB(A), «Leq». Permiten no sólo la medida del ruido ambiental, sino incluso, la medida de los ruidos cíclicos, la valoración del riesgo de lesión auditiva, y la realización de mapas de ruido.

TABLA 7.II. ATENUACION SONORA PARA PROPAGACION SOBRE DISTINTOS TIPOS DE VEGETACION (dB/100 m)

TIPO DE VEGETACION	FRECUENCIA (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Hierba escasa: 0,1-0,8 m de altura	0,5	—	—	3	—	—
Hierba espesa: 0,4-0,5 m de altura	0,5	—	—	12	—	—
Arboles de hoja perenne	7	11	14	17	19	20
Arboles de hoja caduca	2	4	6	9	12	16

Fuente: Dirección General del Medio Ambiente. MOPU.

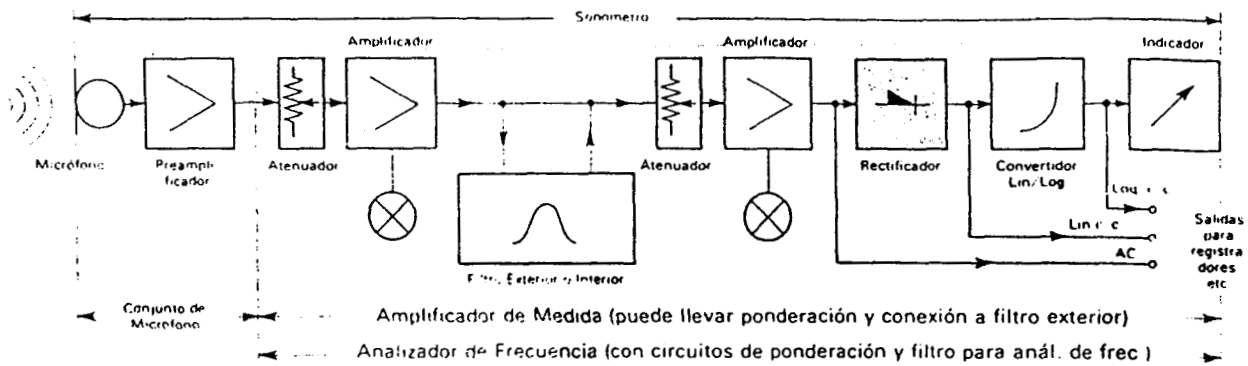


Figura 7.10. Constitución básica de un sonómetro. (Brüel & Kjaer)

6. NIVELES MAXIMOS DE RUIDO ACEPTABLES

Una exposición prolongada a niveles altos de ruido conduce a un deterioro de la audición, aunque el oído puede tolerar variaciones intensas individuales.

En ningún caso debe exponerse a una persona a un ruido continuo con un nivel sonoro superior a 115 dB(A) o intermitente superior a 140 dB(C), incluso una exposición a 90 dB(A) durante ocho horas diarias puede ocasionar daños en algunas personas. Cuando la exposición diaria se compone de periodos de ruido con diferentes niveles sonoros, hay que considerar el efecto combinado, esto es, la suma de las siguientes fracciones no debe exceder de la unidad:

$$\frac{c_1}{t_1} + \frac{c_2}{t_2} + \dots + \frac{c_n}{t_n} \leq 1,00$$

donde:

c_n = Tiempo total de exposición a un nivel sonoro determinado.

t_n = Tiempo admisible a esta exposición (ver Tabla 7.III de niveles máximos de presión sonora establecidos por la Occupational Safety and Health Act. USA).

TABLA 7.III

DURACION DIARIA EN HORAS	NIVEL DE PRESION SONORA EN dB(A)
8	90
6	92
4	95
3	97
2	100
1,5	102
1	105
0,5	110
0,25	115

Otros valores intermedios entre los tabulados pueden calcularse mediante la expresión:

$$t_n = \frac{8}{2^{(L-90)/5}}$$

donde:

L = Nivel de presión sonora en dB(A)

Los efectos producidos por el ruido sobre las personas se pueden resumir en:

- Fisiológicos (deterioro de la audición).
- Psicológicos (interferencia con la comunicación hablada, con el descanso y el sueño).
- Efectos subjetivos (Molestias e irritación).
- Efectos sobre el trabajo (molestias, accidentes, distracciones, pérdida de rendimiento, etc).
- Efectos directos sobre la salud.

En la Tabla 7.IV se indican los niveles de inmisión recomendados, como valor superior en distintos recintos.

TABLA 7.IV. NIVELES DE INMISION RECOMENDABLES (MAXIMOS) EN DISTINTOS RECINTOS

CLASE DE RECINTO	dB(A)	
Dormitorio	40	(30 noches)
Sala de estar y reposo	40-45	(35 noches)
Despacho profesional	40-45	
Servicios	50	
Estudio de grabación sonora	25	
Dormitorio de hospital	30	(25 noches)
Teatros y salas de concierto	30	
Sala de lectura	30-35	
Cines	30-40	
Aulas y laboratorios docentes	40	
Oficina numerosa	45	
Restaurantes	40-45	
Cafeterías	45-50	
Grandes almacenes	50	

En numerosas explotaciones mineras se han establecido unos límites para los niveles sonoros de 65 dB(A) durante el día y de 55 dB(A) por la noche.

Existen Ordenanzas Municipales de prevención del ruido, pero sólo en algunos Ayuntamientos como el de Madrid y el de Zaragoza, además de un Decreto Foral en Navarra.



Foto 7.1. *Instalación de un sonómetro en una cantera.*

7. RESUMEN DE RECOMENDACIONES

En el desarrollo de una nueva operación, si se quieren minimizar los problemas o las quejas derivadas de los ruidos de la maquinaria e instalaciones, deberán cubrirse las siguientes etapas:

1. Identificar las actividades existentes que pueden ser afectadas por el ruido del nuevo proyecto.
2. Determinar los niveles de ruido de cada método de trabajo alternativo.
3. Medir los niveles de ruido de las actividades existentes.
4. Comparar los niveles de ruido previstos con los ya existentes.
5. Estudiar la viabilidad y evaluar las actuaciones correctoras para reducir o eliminar el impacto del ruido.

Las medidas que pueden adoptarse para reducir los ruidos procedentes de instalaciones fijas y equipos móviles pueden resumirse en:

1. Situar las plantas de tratamiento lo más alejadas posible de ciudades o zonas residenciales.
2. Construir barreras de sonido perimetrales entre las fuentes y los receptores.
3. Cubrir las salas de compresores con estructuras de hormigón.
4. Revestir las plantas de tratamiento con paredes dobles y rellenas de fibra de vidrio u otros materiales aislantes.
5. Utilizar cintas transportadoras mejor que volquetes.
6. Instalar silenciadores en los equipos móviles.
7. Estudiar alternativas de rutas de transporte en zonas próximas a áreas habitadas.
8. Realizar un mantenimiento preventivo adecuado.
9. Instalar recubrimientos de goma en molinos, cribas, cajas de volquetes, etc, para reducir el ruido por impacto del material con elementos metálicos.
10. Utilizar equipos accionados eléctricamente mejor que por motores diésel.
11. Limitar el trabajo de las unidades más ruidosas a horas diurnas.

BIBLIOGRAFIA

- ATLAS COPCO: Manual Atlas Copco, 1984.
- BRUEL & KJAER: Documentación Técnica.
- BUREAU OF MINES: «Noise Control». Proceedings, 1984.
- CALVO MANZANO, A.: «Niveles de Ruido en Máquinas de Movimientos de Tierras». ATEM COP, 1984.
- DANIEL, J. H. et al.: «The Noise Exposure of Operators of Mobile Machines in U.S. Surface Mines, 1979». U.S.B.M, 1978.
- DOWN, C. G.: «Environmental Impact of Mining», 1978.
- LINDLEY, G. F.: «La Minería a Cielo Abierto en el Reino Unido». N.C.B, 1981.
- LORA, F. de y MIRO, J.: «Técnicas de Defensa del Medio Ambiente», 1978.
- M.O.P.U.: «El ruido». Dirección General del Medio Ambiente, 1982.
- PENCHE, C.: «Polvo y Ruidos», 1983.

CONTROL Y PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA

1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales más abundantes y constituye el medio básico de todos los procesos de vida. A pesar de su abundancia, la disponibilidad de agua para hacer frente a la creciente demanda de uso por el hombre (potable, industrial, recreo, etc.) es cada vez más limitada.

Debido al desarrollo industrial y al aumento de la población, paulatinamente son mayores las descargas contaminantes a los acuíferos (infiltraciones a través del suelo, alteración de los niveles piezométricos, etc) y a los cursos de agua superficiales, con el consiguiente deterioro de la calidad de las mismas. Como consecuencia de ello, la legislación española contempla en la «Ley de Aguas» (29/1985 de 2 de agosto), las medidas necesarias para proteger el medio acuático continental de los impactos producidos por la mala gestión y utilización de dicho recurso.

La minería es una de las actividades industriales que se encuentra más estrechamente ligada al agua, pues, por un lado, se necesita en un gran número de operaciones y, por otro, se generan grandes volúmenes. Como consecuencia de esto último, en todos los proyectos mineros es preciso contemplar los medios necesarios para el control de los vertidos, así como las medidas de prevención de la contaminación de las aguas durante la explotación y tras el abandono posterior.

La contaminación del agua se debe en general a la introducción de sustancias o de ciertas formas de energía, tales como el calor, que provocan cambios en sus características físicas y químicas.

El agua en la minería procede fundamentalmente de las infiltraciones de los acuíferos interceptados y de la escorrentía superficial. Su presencia en las minas crea numerosos problemas, por lo que es necesario su bombeo y conducción fuera de las áreas de laboreo mediante los adecuados sistemas de desagüe.

Otra fuente de efluentes es la constituida por las plantas de tratamiento de los minerales, pues frecuentemente la concentración se realiza por vía húmeda. Aunque se recircule parte del agua en el proceso mineralúrgico y se utilice un determinado porcentaje del agua de drenaje en ciertas operaciones mineras, suele existir un excedente cuya mala calidad tiene diversos efectos adversos.

Los efectos hidrológicos que pueden provocar las explotaciones mineras se presentan bajo dos facetas: por un

lado, inciden sobre las aguas subterráneas y, por otro, sobre las aguas superficiales.

Estos se resumen en:

- Disminución de la calidad del agua. Hacen inadecuada el agua para el consumo humano, industrial, recreativo y cualquier otro uso o aprovechamiento que tenga el curso de agua y el acuífero afectado.
- Causa daños ecológicos, alterando o eliminando las comunidades biológicas naturales presentes en los cursos de agua, y disminuyendo la diversidad de organismos.
- Deterioro del paisaje. La restauración paisajística de las áreas afectadas por la minería debe abarcar a todos y cada uno de los elementos del medio, y al agua en particular como componente que caracteriza y modela dicho paisaje.

En general, una alteración en la calidad de las aguas lleva implícito un cambio de uso. Cuanto más difícil resulta volver a desarrollar la actividad o actividades que se realizaban con la participación del agua, mayor será el impacto y más necesario se hace tomar las medidas correctoras oportunas.

En los epígrafes siguientes del presente capítulo se van a comentar, de forma somera, algunos de los efectos hidrológicos más importantes, así como las medidas correctoras de tales alteraciones y los parámetros físico-químicos del agua que deben analizarse para determinar el nivel de calidad de las mismas. También se indican las técnicas preventivas de formación de aguas ácidas y los tratamientos más usuales a este tipo de efluentes, por ser la acidificación del agua una de las alteraciones más significativas de las que produce la minería, ya que incide no sólo en la calidad del agua, sino también en el aprovechamiento del suelo.

2. AGUAS SUBTERRÁNEAS

La apertura de huecos en lugares donde los freáticos son poco profundos puede provocar una modificación de los niveles piezométricos y además una alteración de la calidad de las aguas.

2.1. Modificación del nivel piezométrico

Las minas subterráneas exigen para su explotación un drenaje continuo a lo largo de grandes períodos de tiempo, lo que da lugar a una alteración interna del balance de los sistemas acuíferos con conos de depresión que pueden alcanzar extensiones con radios de acción de hasta decenas de kilómetros.

El colapso de los huecos subterráneos y el efecto que tienen los hundimientos y subsidencia inducidas en todo el entorno de las excavaciones producen siempre complejas interconexiones de los sistemas hidrológicos superficiales y subterráneos.

Las explotaciones de superficie afectan también a los niveles piezométricos de dichas áreas, en unas magnitudes que en ocasiones se han minusvalorado. En muchas minas, durante la operación, se aplican diferentes sistemas de drenaje con el fin de garantizar la estabilidad de los taludes, hacer viable las diferentes labores con los equipos mineros y evitar los problemas de hinchamiento de los materiales del fondo de las explotaciones por presión del agua subterránea.

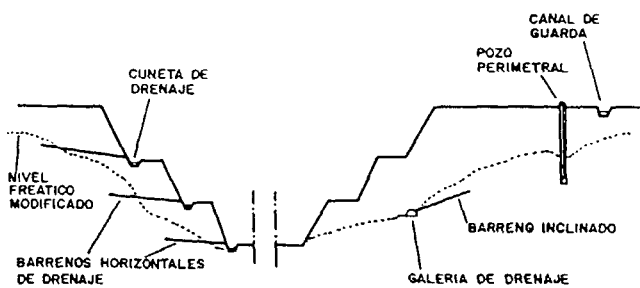


Figura 8.1. Sistemas de drenaje.

Algunas minas podrían considerarse más como explotaciones de agua que de cualquier otra sustancia, pues las relaciones de volumen de ese líquido al mineral extraído alcanza a veces cifras superiores a los $10 \text{ m}^3/\text{t}$, como sucede en ciertas minas de lignito.

Una técnica de corrección para mantener los niveles piezométricos en el entorno de las explotaciones es la conocida como de barreras o pantallas hidráulicas, que consiste en impedir el flujo de agua subterránea hacia el hueco excavado mediante la impermeabilización de una parte del macizo rocoso. De esta manera se reducen las necesidades de bombeo de las minas para mantener el cono de depresión o restringir su diámetro y otros efectos ambientales adversos.

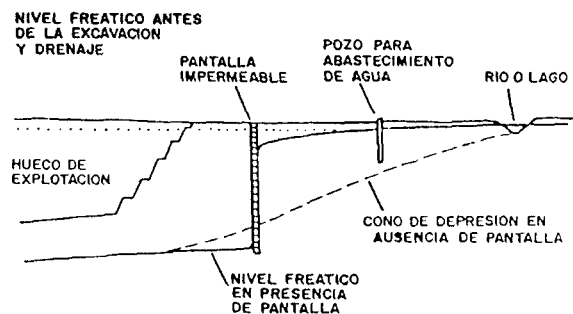


Figura 8.2. Representación esquemática de una pantalla hidráulica.

Los materiales más comúnmente utilizados son el hormigón, las suspensiones arcillosas thixotrópicas, la bentonita, los geotextiles, etc.

Las profundidades que se han alcanzado con esas barreras superan los 60 m, y con equipos avanzados se han llegado a superar los 100 m. En Alemania Oriental en una mina de carbón a cielo abierto con una pantalla de 1.250 m de longitud, los caudales de desagüe se redujeron de $1,18 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0,68 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fisher, 1979).

2.2. Alteración de los niveles piezométricos por la extracción de arenas y gravas

Las extracciones de arenas y gravas en medios aluviales modifican los niveles piezométricos. Antes de la apertura de los huecos el agua subterránea discurre siguiendo su curso natural, Fig. 8.3, pero en estados posteriores y antes de la colmatación de los taludes por efecto de la decantación de las partículas finas sobre ellos, que los hacen impermeables, el nivel piezométrico se eleva aguas abajo y se abate aguas arriba. Tras la colmatación se produce un rebajamiento importante del nivel freático aguas abajo de la explotación, que puede desembocar en la desecación de pozos y manantiales próximos a esas zonas,

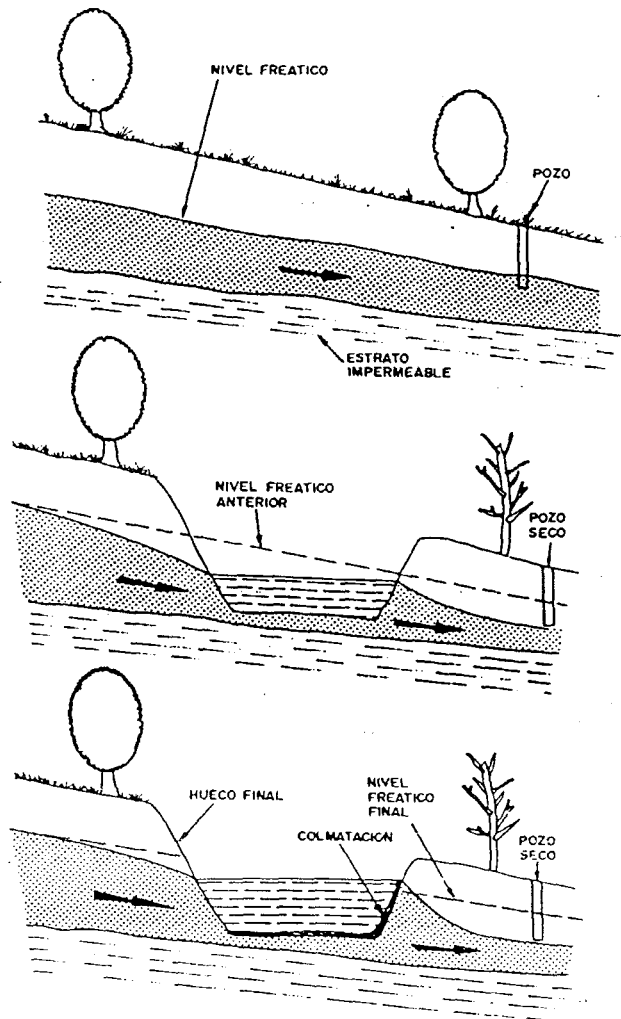


Figura 8.3. Evolución del nivel freático en una gravera.

así como en la alteración del régimen de cultivos o vegetación y en el riesgo de hundimientos al variar la capacidad portante de los suelos. Al reducirse la presión del agua se provoca un incremento de las tensiones efectivas en los sedimentos, que permite una mayor consolidación de los materiales. También pueden registrarse movimientos horizontales en las proximidades de los huecos al producirse una liberación de las presiones sobre los materiales más próximos a las explotaciones.

Así pues, las estructuras excavadas cambian las características hidrogeológicas del entorno de las minas y aunque los huecos se rellenen con estériles, la recuperación de las condiciones originales resulta muy difícil.

2.3. Contaminación del agua subterránea

La contaminación de acuíferos por las actividades mineras está directamente relacionada con la evacuación de las aguas de las explotaciones y con el tratamiento de los minerales. La presencia de escombreras que contienen materiales oxidables, como sulfuros y sustancias carbonosas, puede inducir una contaminación superficial. La extracción de materiales que cubren y protegen a las aguas subterráneas también es causa de contaminación.

En muchas ocasiones puede existir una contaminación orgánica como consecuencia del vertido incontrolado de residuos tóxicos urbanos o industriales en los huecos abandonados y de aceites residuales procedentes de la maquinaria pesada.

También en las minas subterráneas donde se utiliza relleno para el sostenimiento de los huecos, existe un riesgo de contaminación, toda vez que se introduce un material muy permeable que puede aportar sales solubles a las aguas infiltradas, especialmente cuando se presenta el proceso de formación de aguas ácidas con un gran potencial de disolución.

En muchos casos la contaminación de las aguas subterráneas supone un impacto terminal. Ello quiere decir que no es factible la descontaminación del acuífero, bien por las características intrínsecas de la zona, bien por las particularidades de la contaminación, lo cual implica un abandono a corto, medio o largo plazo de los usos que tienen esas aguas subterráneas.

Los tratamientos empleados en la corrección de las características hídricas subterráneas son físicos, químicos y bacteriológicos, dependiendo de la naturaleza de la contaminación de los acuíferos: excesiva dureza del agua (presencia de concentraciones elevadas de Ca^{+2} y Mg^{-2}), iones Fe^{+2} y Mn^{+2} , pequeñas cantidades de sulfuro o ácidos sulfhídricos, presencia de metales pesados, contaminantes, compuestos orgánicos, etc.

3. AGUAS SUPERFICIALES

La alteración de las aguas superficiales por las actividades mineras comienza en el momento en que se modifica la red de drenaje natural para evitar la entrada de agua en las explotaciones o por la necesidad de disponer de terrenos para depositar los estériles, crear la infraestructura necesaria, etc.

Las nuevas canalizaciones y cauces se realizan dejando superficies de roca desnuda sobre las que el agua puede actuar erosionándolas al disgregar los materiales y remover los elementos finos. Se produce así la principal contaminación física de las aguas superficiales, a la que hay que añadir la procedente de las aguas de drenaje bombeadas y los efluentes de las plantas de concentración de los minerales.

El aumento de la turbidez afecta de forma muy importante al medio biótico existente en las corrientes fluviales, pues dificulta la penetración de la luz y reduce la función de fotosíntesis, dando lugar todo ello a un aumento de la mortandad y a un empobrecimiento de la flora y de la fauna. Además, si las partículas son gruesas, puede producirse una sedimentación continua que provoque el atardecimiento de los canales, presas, etc.

Otro efecto perturbador de la calidad de las aguas superficiales se debe a la elevación de la temperatura de éstas, como consecuencia de la irradiación solar y temperatura ambiente del aire.

El diferencial térmico entre el agua y el aire depende entre otras cosas de las dimensiones del depósito o lámina de agua (superficie y profundidad), permeabilidad de los terrenos atravesados, gradiente hidráulico, etc.

Los efectos que tiene el recalentamiento del agua son dos: modifica la fauna acuática en beneficio de las especies más tolerantes, en detrimento de otras que pueden ser las de mayor valor ecológico, y disminuye el ritmo de saturación de oxígeno disuelto llegando a agravarse el fenómeno anterior.

La contaminación química de las aguas superficiales se produce, generalmente, por la disolución de determinados compuestos solubles que constituyen las rocas y por los cambios de pH originados por la oxidación de la pirita. Este mineral no sólo es el componente principal de los yacimientos de sulfuros metálicos, sino que también abunda en los depósitos de otros minerales metálicos y, de forma especial, en los yacimientos de carbón.

3.1. Estándares de calidad

La forma más sencilla de determinar la calidad del agua consiste en efectuar una serie de análisis físicos, químicos y/o biológicos, y comparar los resultados obtenidos con los estándares de calidad aceptados como «patrón» por la legislación vigente. Cuanta mayor diferencia exista entre los valores obtenidos y los niveles óptimos de calidad, mayor será el impacto producido y el nivel de contaminación más significativo.

Las muestras deberán recogerse en distintos puntos del curso fluvial, aguas abajo y arriba del foco de vertido. Esto sirve para reconocer la presencia de otros contaminantes de naturaleza distinta a los producidos por la actividad minera (aguas arriba) y la capacidad autodepuradora del río (aguas abajo).

Los niveles de calidad exigidos a las aguas superficiales son distintos según sea el uso para el cual estén destinados. A continuación, se indican los estándares de calidad, recogidos en la «Ley de Aguas», para la producción de agua potable, la conservación de la fauna piscícola, la aptitud para el baño y la cría de moluscos.

TABLA 8.I. PARAMETROS CARACTERISTICOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR, COMO MINIMO, EN LA ESTIMA DEL TRATAMIENTO DEL VERTIDO

PARAMETRO — UNIDAD	NOTA	VALORES LIMITES		
		Tabla 1	Tabla 2	Tabla 3
pH	(A)		Comprendido entre 5,5 y 9,5	
Sólidos en suspensión (mg/l)	(B)	300	150	80
Materias sedimentales (ml/l)	(C)	2	1	0,5
Sólidos gruesos	—	Ausentes	Ausentes	Ausentes
D.B.O.5 (mg/l)	(D)	300	60	40
D.Q.O. (mg/l)	(E)	500	200	160
Temperatura (°)	(F)	3°	3°	3°
Color	(G)	1/40	Inapreciable en disolución:	1/20
Aluminio (mg/l)	(H)	2	1	1
Arsénico (mg/l)	(H)	1,0	0,5	0,5
Bario (mg/l)	(H)	20	20	20
Boro (mg/l)	(H)	10	5	2
Cadmio (mg/l)	(H)	0,5	0,2	0,1
Cromo III (mg/l)	(H)	4	3	2
Cromo IV (mg/l)	(H)	0,5	0,2	0,2
Hierro (mg/l)	(H)	10	3	2
Manganeso (mg/l)	(H)	10	3	2
Níquel (mg/l)	(H)	10	3	2
Mercurio (mg/l)	(H)	0,1	0,05	0,05
Plomo (mg/l)	(H)	0,5	0,2	0,2
Selenio (mg/l)	(H)	0,1	0,03	0,03
Estaño (mg/l)	(H)	10	10	10
Cobre (mg/l)	(H)	10	0,5	0,2
Zinc (mg/l)	(H)	20	10	3
Tóxicos metálicos	(J)	3	3	3
Cianuros (mg/l)	—	1	0,5	0,5
Cloruros (mg/l)	—	2.000	2.000	2.000
Sulfuros (mg/l)	—	2	1	1
Sulfitos (mg/l)	—	2	1	1
Sulfatos (mg/l)	—	2.000	2.000	2.000
Fluoruros (mg/l)	—	12	8	6
Fósforo total (mg/l)	(K)	20	20	10
Idem	(K)	0,5	0,5	0,5
Amoniaco (mg/l)	(L)	50	50	15
Nitrógeno nítrico (mg/l)	(L)	20	12	10
Aceites y grasas (mg/l)	—	40	25	20
Fenoles (mg/l)	(M)	1	0,5	0,5
Aldehidos (mg/l)	—	2	1	1
Detergentes (mg/l)	(N)	6	3	2
Pesticidas (mg/l)	(P)	0,05	0,05	0,05

Fuente: Ley de Aguas 29/1985.

NOTAS:

General. Cuando el caudal vertido sea superior a la décima parte del caudal mínimo circulante por el cauce receptor, las cifras de la Tabla 1 podrán reducirse en lo necesario, en cada caso concreto, para adecuar la calidad de las aguas a los usos reales o previsibles de la corriente en la zona afectada por el vertido.

Si un determinado parámetro tuviese definidos sus objetivos de calidad en el medio receptor, se admitirá que en el condicionado de las autorizaciones de vertido pueda superarse el límite fijado en la Tabla 1 para tal parámetro, siempre que la dilución normal del efluente permita el cumplimiento de dichos objetivos de calidad.

(A) La dispersión del efluente a 50 metros del punto de vertido debe conducir a un pH comprendido entre 6,5 y 8,5.

(B) No atraviesan una membrana filtrante de 0,45 micras.

(C) Medidas en cono Imhoff en dos horas.

(D) Para efluentes industriales, con oxidabilidad muy diferente a un efluente doméstico tipo, la concentración límite se referirá al 70 por 100 de la D.B.O. total.

(E) Determinación al bicromato potásico.

(F) En ríos, el incremento de temperatura media de una sección fluvial tras la zona de dispersión no superará los 3° C.

En lagos o embalses, la temperatura del vertido no superará los 30° C.

(G) La apreciación del color se estima sobre 10 centímetros de muestra diluida.

(H) El límite se refiere al elemento disuelto, como ión o en forma compleja.

(J) La suma de las fracciones concentración real/límite exigido relativa a los elementos tóxicos (arsénico, cadmio, cromo VI, níquel, mercurio, plomo, selenio, cobre y zinc) no superará el valor 3.

(K) Si el vertido se produce a lagos o embalses, el límite se reduce a 0,5, en previsión de brotes eutróficos.

(L) En lagos o embalses el nitrógeno total no debe superar 10 mg/l. expresado en nitrógeno.

(M) Expresado en C₆O₁₄H₆.

(N) Expresado en lauril-sulfato.

(P) Si se tratase exclusivamente de pesticidas fosforados puede admitirse un máximo de 0,1 mg/l.

TABLA 8.II. CALIDAD EXIGIDA A LAS AGUAS SUPERFICIALES DESTINADAS A LA PRODUCCION DE AGUA POTABLE

PARAMETRO	UNIDAD	TIPO A1	TIPO A2	TIPO A3
pH	—	(6,5-8,5)	(5,5-9)	(5,5-9)
Color	Escala Pt	20	100	200
Sólidos en suspensión	mg/l	(25)	—	—
Temperatura	°C	25	25	25
Conductividad a 20° C	µS/cm	(1.000)	(1.000)	(1.000)
Nitritos *	mg/l NO ₂	50	50	50
Nitrosos	mg/l F	1,5	(1,7)	(1,7)
Hierro disuelto	mg/l Fe	0,3	2	(1)
Manganeso	mg/l Mn	(0,05)	(0,1)	(1)
Cobre	mg/l Cu	0,05	(0,05)	(1)
Zinc	mg/l Zn	3	5	5
Boro	mg/l B	(1)	(1)	(1)
Arsénico	mg/l As	0,05	0,05	0,1
Cadmio	mg/l Cd	0,005	0,005	0,005
Cromo total	mg/l Cr	0,05	0,05	0,05
Plomo	mg/l Pb	0,05	0,05	0,05
Selenio	mg/l Se	0,01	0,01	0,01
Mercurio	mg/l Hg	0,001	0,001	0,001
Bario	mg/l Ba	0,1	1	1
Cianuros	mg/l CN	0,05	0,05	0,05
Sulfatos **	mg/l SO ₄	250	250	250
Cloruro **	mg/l Cl	(200)	(200)	(200)
Detergentes	mg/l (laurilsulfato)	(0,2)	(0,2)	(0,5)
Fosfatos *	mg/l P ₂ O ₅	(0,4)	(0,7)	(0,7)
Alcoholes	mg/l C ₆ H ₅ OH	0,001	0,005	0,1
Hidrocarburos disueltos o emulsionados (tras extracción en éter de petróleo)	mg/l	0,05	0,2	1
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	mg/l	0,0002	0,0002	0,001
Bacterias coliformes totales	mg/l	0,001	0,0025	0,005
O ₂	mg/l O ₂	—	—	(30)
Oxígeno disuelto	% satur	(> 70)	(> 50)	(> 30)
O ₅	mg/l O ₂	(< 3)	(< 5)	(< 7)
Nitrógeno Kjeldahl	mg/l N	(1)	(2)	(3)
Amoníaco	mg/l NH ₄	(0,05)	1,5	4
Sustancias extraíbles con cloroformo	mg/l SEC	(0,1)	(0,2)	(0,5)
Coliformes totales 37° C	100 ml	(50)	(5.000)	(50.000)
Coliformes fecales	100 ml	(20)	(2.000)	(20.000)
Streptococos fecales	100 ml	(20)	(1.000)	(10.000)
Salmonellas	—	Ausente en 5.000 ml	Ausente en 1.000 ml	—

en lagos poco profundos de lenta renovación.

salvo que no existan aguas más aptas para el consumo.

TA: Las cifras entre paréntesis se tomarán como valores indicativos deseables con carácter provisional.

- 1) A1. Tratamiento físico simple y desinfección.
- 2) A2. Tratamiento físico normal, tratamiento químico y desinfección.
- 3) A3. Tratamiento físico y químico intensivos, afino y desinfección.

nte: Ley de Aguas 29/1985.

TABLA 8.III. CALIDAD EXIGIBLE A LAS AGUAS CONTINENTALES CUANDO REQUIEREN PROTECCION O MEJORA PARA SER APTAS PARA LA VIDA DE LOS PECES

PARAMETRO	TIPO S	TIPO C	OBSERVACIONES
1. Temperatura (°C)	1. La temperatura media aguas abajo de un vertido térmico (en el límite de la zona de mezcla) no deberá superar la temperatura natural en más de: 1,5° C	3° C	Se podrán decidir excepciones limitadas geográficamente en condiciones particulares si la autoridad competente pudiera probar que dichas excepciones no tendrán consecuencias perjudiciales para el desarrollo equilibrado de las poblaciones de peces. En lo referente a los lagos cuya profundidad media se sitúa entre 18 y 300 metros, se podría aplicar la siguiente fórmula: $L \leq 10 \frac{Z}{T_w} (1 - \sqrt{T_w})$ en donde: L = La carga expresada en mg P por metro cuadrado de superficie del lago durante un año. Z = La profundidad media, expresada en metros. T _w = El tiempo teórico de renovación del agua del lago, expresado en años. En los demás casos, los valores límites de 0,2 mg/l para las aguas salmonícolas y de 0,4 mg/l para las ciprínícolas, expresados en PO ₅ , podrán ser considerados como valores indicativos que permiten reducir la eutrofización. Los valores de amoníaco no ionizado podrán ser superados a condición de que se trate de puntas poco importantes que aparezcan durante el día. Estos valores corresponden a un pH 6. Podrán aceptarse valores mayores si el pH fuese superior. Los valores corresponden a una dureza del agua de 100 mg/l de CaCO ₃ . Para durezas comprendidas entre 10 y 500 mg/l, los valores límites correspondientes se pueden encontrar en la Tabla II. Los valores corresponden a una dureza del agua de 100 mg/l de CaCO ₃ . Para las durezas comprendidas entre 10 y 300 mg/l, los valores límites correspondientes se pueden encontrar en la Tabla III.
2. Oxígeno disuelto (mg/l O ₂)	2. El vertido térmico no deberá tener como consecuencia que la temperatura en la zona situada aguas abajo del punto de vertido térmico (en el límite de la zona de mezcla) supere los valores siguientes: 21,5 (0) 10 (0)	28 (0) 10 (0)	
3. pH	El límite de la temperatura de 10° C no se aplicará sino a los períodos de reproducción de las especies que tienen necesidad de agua fría para su reproducción y exclusivamente a las aguas que puedan contener dichas especies. Los límites de las temperaturas podrán, sin embargo, ser superados durante el 2 % del tiempo. 50 % ≥ 9	50 % ≥ 7	
4. Materias en suspensión (mg/l)	Cuando el contenido de oxígeno descienda por debajo de: 6	4	
5. DBO (mg/l O ₂)	La autoridad competente deberá probar que esta situación no tendrá consecuencias perjudiciales para el desarrollo equilibrado de las poblaciones de peces. 6-9 (0)(1) (≤ 25) (0)	6-9 (0)(1) (≤ 25) (0)	
6. Fósforo total (mg/l P)	(≤ 3) (0,2)	(≤ 6) (0,4)	
7. Nitritos (mg/l NO ₂)	(≤ 0,01)	(≤ 0,03)	
8. Compuestos fenólicos (mg/l C ₆ H ₅ OH)	(2)	(2)	
9. Hidrocarburos de origen petrolero	(3)	(3)	
10. Amoníaco no ionizado (mg/l NH ₃)	≤ 0,025	≤ 0,025	
11. Amonio total (mg/l NH ₄)	≤ 1 (4)	≤ 1 (4)	
12. Cloro residual total (mg/l HOCl)	≤ 0,005	≤ 0,005	
13. Zinc total (mg/l Zn)	≤ 0,3	≤ 1,0	
14. Cobre soluble (mg/l Cu)	(≤ 0,04)	(≤ 0,04)	

(0) Se podrán superar los límites fijados en circunstancias meteorológicas o geográficas excepcionales y cuando las aguas experimenten un enriquecimiento natural en determinadas sustancias, entendiéndose por tal, el proceso mediante el cual una masa de agua determinada recibe del suelo ciertas sustancias contenidas en él sin intervención del hombre.

(1) Las variaciones artificiales de pH con respecto a los valores constantes no deberán superar -0,5 unidades de pH en los límites comprendidos entre 6,0 y 9,0, a condición de que estas variaciones no aumenten la nocividad de otras sustancias en el agua.

(2) Los compuestos fenólicos no podrán estar presentes en concentraciones que alteren el sabor del pescado.

(3) Los productos de origen petrolero no podrán estar presentes en las aguas en cantidades que:

- Formen una película visible en la superficie del agua o se depositen en capas en los lechos de las corrientes de agua o en los lagos.
- Transmitan al pescado un perceptible sabor a hidrocarburos.
- Provoquen efectos nocivos en los peces.

(4) En condiciones geográficas o climatológicas particulares y especialmente en el caso de bajas temperaturas del agua y reducida nitrificación o cuando la autoridad competente pueda probar que no hay consecuencias perjudiciales para el desarrollo equilibrado de las poblaciones de peces, se podrán fijar valores superiores a 1 mg/l.

- Tipo S (aguas salmonícolas). Las aguas en las que viven o podrían vivir los peces que pertenecen a especies tales como el salmón (*Salmo salar*), la trucha (*Salmo trutta*), el timalo (*Thymallus thymallus*) y coregono (*Coregonus*).

- Tipo C (aguas ciprínícolas). Las aguas en las que viven o podrían vivir los peces que pertenecen a los ciprínidos (*Cyprinidae*), o a otras especies tales como el lucio (*Esox lucius*), la perca (*Perca fluviatilis*) y anguila (*Anguilla anguilla*).

Fuente: Ley de Aguas, 29/1985

TABLA 8.IV. ZINC TOTAL

Concentraciones de zinc (mg/l Zn) en función de los diversos valores de la dureza de las aguas comprendidos entre 10 y 500 mg/l CaCO₃

	DUREZA DEL AGUA (mg/l CaCO ₃)			
	10	50	100	500
Aguas salmonícolas (mg/l Zn)	0,03	0,2	0,3	0,5
Aguas ciprinícolas (mg/l Zn)	0,3	0,7	1,0	2,0

Fuente: Ley de Aguas, 29/1985.

TABLA 8.V. COBRE SOLUBLE

Concentraciones de cobre soluble (mg/l Cu) en función de los diversos valores de las durezas de las aguas comprendidos entre 10 y 300 mg/l CaCO₃

	DUREZA DEL AGUA (mg/l CaCO ₃)			
	10	50	100	300
mg/l Cu	0,005	0,022	0,04	0,112

NOTAS:

- Las cifras entre paréntesis se tomarán como valores indicativos deseables con carácter provisional.
- En ningún caso las excepciones previstas podrán ignorar las obligaciones de protección de la salud pública.
- En la fijación de los valores de los parámetros, se ha partido de la hipótesis de que los demás parámetros, estén mencionados o no, resultan favorables. Ello implica que la concentración de sustancias nocivas que aquí no se mencionen serán muy débiles. Si dos o más sustancias nocivas estuvieran presentes en una mezcla podrían aparecer efectos acumulativos importantes (efecto de adición, de sinergia, o efectos antagónicos).

Fuente: Ley de Aguas, 29/1985.

TABLA 8.VI. CALIDAD EXIGIDA A LAS AGUAS DULCES SUPERFICIALES PARA SER APTAS PARA EL BAÑO

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR MAXIMO	METODO DE ANALISIS E INSPECCION
1. Coliformes totales	100 ml	10.000	Recuento NMP o filtración y cultivo con identificación de colonias.
2. Coliformes fecales	100 ml	2.000	Recuento NMP o filtración y cultivo con identificación de colonias.
3. <i>Streptococos</i> fecales	100 ml	(100)	Método de Litsky y NMP o filtración y cultivo.
4. <i>Salmonellas</i>	1 l	0	Filtración, inoculación, identificación.
5. Enterovirus	PFu/10 ml	0	Concentración y confirmación.
6. pH	u	6 a 9	Electrometría con calibración en los pH 7 y 9.
7. Color	—	Sin cambios anormales	Inspección visual o fotometría escala Pt-CO.
8. Aceites minerales	mg/l	Sin película visible ni olor	Inspección visual y olfativa o residuo seco.
9. Sustancias tensoactivas	mg/l laurilsulfato	Sin espuma persistente (0,3)	Inspección visual. Espectrofotometría con azul de metileno.
10. Fenoles	mg/l C ₆ H ₅ OH	Sin olor específico 0.05	Inspección olfativa. Espectrofotometría método (4 AAP).
11. Transparencia	m	1	Disco de Secchi.
12. Oxígeno disuelto	% saturado	(80-120)	Método de Winker o electrométrico.
13. Residuos de alquitrán y flotantes	—	(Inexistencia)	Inspección visual.

Frecuencia mínima de análisis: Bimensual.

NOTAS: Las cifras entre paréntesis se tomarán como valores indicativos deseables provisionales.

Los parámetros 3, 4 y 5 serán comprobados cuando, mediante inspección, se estime posible su presencia por deterioro de la calidad de las aguas.

Los parámetros 9, 10 y 11 serán comprobados en laboratorio si se sospecha el incumplimiento por la inspección organoléptica.

Las muestras se deberán tomar en la hora de máxima afluencia de bañistas y a 30 cm de profundidad, salvo el parámetro 8 que se tomará en superficie.

El parámetro se considera correcto si los valores del 95 % de las muestras se mantienen inferiores a lo exigido,

que se rebaja al 80 % en los parámetros 1 y 2, siempre que ningún valor rebase en más del 50 % el valor de los límites estipulados por éstos, y para los parámetros 6, 12 y microbiológicos.

TABLA 8.VII. CALIDAD EXIGIBLE A LAS AGUAS CUANDO REQUIEREN PROTECCION O MEJORA PARA CRIA DE MOLUSCOS

PARAMETROS	VALOR	PARAMETROS	VALOR
1. pH. Unidad pH	7-9.		
2. Temperatura °C	La diferencia de temperatura provocada por un vertido no deberá, en las aguas para cría de moluscos afectadas por dicho vertido, superar en más de 2° C a la temperatura medida en las aguas no afectadas.	7. Hidrocarburos de origen petrolero	— Una medición individual no podrá indicar un valor inferior al 60 % salvo cuando no haya consecuencias perjudiciales para el desarrollo de las poblaciones de moluscos. Los hidrocarburos no deberán hallarse en el agua para cría de moluscos en concentraciones tales que: — Produzcan en la superficie del agua una película visible y/o un depósito sobre los moluscos. — Provoquen efectos nocivos sobre los moluscos.
3. Coloración (después de filtración) mg PVI	Después de filtración, el color del agua provocado por un vertido no deberá, en las aguas afectadas por dicho vertido, acusar una diferencia de más de 10 mg PVI con el color medido en las aguas no afectadas.	8. Sustancias organohalogenadas	La concentración de cada sustancia en el agua para cría de moluscos o en la carne de los moluscos no deberá rebasar un nivel que provoque efectos nocivos en dichos moluscos y sus larvas.
4. Materias en suspensión mg/l	El aumento del contenido de materias en suspensión provocado por un vertido no deberá, en las aguas para cría de moluscos afectadas por dicho vertido, ser superior en más de un 30 % al que se haya medido en las aguas no afectadas.	9. Metales: Plata, Ag; Arsenico, As; Cadmio, Cd; Cromo, Cr; Cobre, Cu; Mercurio, Hg; Niquel, Ni; Plomo, Pb; Zinc, Zn; mg/l	La concentración de cada sustancia en el agua para la cría de moluscos o en la carne de moluscos no deberá rebasar un nivel que provoque efectos nocivos en dichos moluscos y en sus larvas.
5. Salinidad %	— ≤ 40 %. — La variación de la salinidad provocada por un vertido, en las aguas para cría de moluscos afectadas por dicho vertido, no deberá ser superior en más de un 10 % a la salinidad medida en las aguas no afectadas.	10. Coliformes fecales/100 ml	Los efectos de sinergia de estos metales deberán ser tomados en consideración.
6. Oxígeno disuelto (% saturación)	— ≥ 70 % (valor medio). — Si una medición individual indicara un valor inferior al 70 %, las mediciones se repetirán.	11. Sustancias que influyen en el sabor de los moluscos	≤ 300 en la carne de los moluscos y en el líquido interlarvar ¹ . Concentración inferior a la que pueda deteriorar el sabor de los moluscos.

¹ Este valor deberá ser respetado obligatoriamente en aquellas aguas en las que vivan los moluscos directamente comestibles.

NOTAS:

- a) Se podrán superar los límites fijados en circunstancias meteorológicas o geográficas excepcionales.
- b) Las cifras entre paréntesis se tomarán como valores indicativos deseables con carácter provisional.

Fuente: Ley de Aguas, 29/1985.

Además de los criterios relacionados en las tablas expuestas anteriormente, existen otros, procedentes de distintas fuentes bibliográficas, que se diferencian de los propuestos en la legislación española, bien por los parámetros

utilizados como indicadores de calidad de agua para distintos usos y actividades, bien por los rangos de valores señalados como límites. En la Tabla VIII se ve un ejemplo de esto.

TABLA 8.VIII. CALIDAD DEL AGUA PARA DIFERENTES UTILIZACIONES NORMAS USA ¹

Calidad del agua	Recreo y estética	ABASTECIMIENTO AGUAS		VIDA PISCICOLA Y VIDA ANIMAL LIBRE			AGRICULTURA		
		Permisible	Deseable	Organismos de aguas limpias	Vida libre	Organismos marinos estuarios	Abastecimientos de aguas para granjas	Animales	Riegos
Color, unidades		75	< 10	10 % de la luz penetra hasta el fondo	10 % de la luz penetra 2 m				
Temperatura, °C	< 29°	< 29°	< 29°	28-35° Durante 6 h					13-29°
Coliformes fecales, n.º/100 ml	2.000-200	2.000	20	> 20	35-200	35-200			4.000
Alcalinidad (Co ₃ Ca) ₂ , p.p.m.		30-500	30-500						
Cloruros p.p.m.		250	25						
Cromo hexavalente, p.p.m.		0.05	Ausente				0.05	0.05	5-20
Cobre, p.p.m.		1.0	Ausente				1.0		0.2-5.0
Oxígeno disuelto, p.p.m.		> 3.0	Cerca de la saturación	> 4,0	Fondo aeróbico	4,0			
Dureza (Co ₃ Ca) ₂ , p.p.m.		300-500	60-120						
Hierro, p.p.m.		0.3	Virtualmente ausente				0.3		

Tabla VIII (continuación)

Calidad del agua	Recreo y estética	ABASTECIMIENTO AGUAS		VIDA PISCICOLA Y VIDA ANIMAL LIBRE			AGRICULTURA						
		Permisible	Deseable	Organismos de aguas limpias	Vida libre	Organismos marinos estuarios	Abastecimientos de aguas para granjas	Animales	Ruegos				
Manganeso, p.p.m.	5.0-9.0	0,05	Ausente	6-9	7,0-9.2	6,9-8,5	0,05	10.000	2,0-20				
Nitratos, p.p.m.		10,0 (N) Ind.	Virtualmente ausente				45,0						
pH		6,0-8,5											
Sulfatos, p.p.m.		250	50										
Sólidos totales disueltos, p.p.m.		500	200						500-5.000	0-5.000			
Grasas y aceites (percloroformo), p.p.m.		0,15	0,04										
Pesticidas, p.p.m.		0,001-0,1	Ausente				Varía con el organismo		Varía con el organismo	Varía con el organismo	0,0001-0,02		
Fenol, p.p.m.		0,001	Ausente										
Radiactividad beta, mCi/litro		1.000	100				1.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Cianuros, p.p.m.		0,20	Ausente								0,20		
Turbidez, p.p.m.		Virtualmente ausente	10-50										

¹ Esta norma americana, según la traducción de Martínez de Bascaran, en Nancerow, 1977.

4. CARACTERISTICAS DE LAS AGUAS GENERADAS POR LAS ACTIVIDADES MINERAS

Independientemente de la fuente que da origen a las aguas residuales, éstas se dividen en dos grandes grupos:

- Aguas alcalinas o con bajo potencial de solubilización, y
- Aguas ácidas o con alto potencial de solubilización.

De acuerdo con White (1968), una clasificación más detallada de las aguas mineras es la de la Tabla 8.IX.

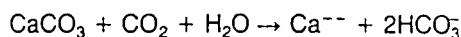
TABLA 8.IX

CLASE	pH
1. Altamente ácidas	1,5 a 4,5
2. Blandas, ligeramente ácidas	5,0 a 7,0
3. Duras, neutras a alcalinas	7,0 a 8,5
4. Blandas, alcalinas	7,5 a 11,0
5. Muy salinas	6 a 9
6. Blandas, ácidas	3,5 a 5,5

4.1. Aguas alcalinas

Las aguas alcalinas se producen en las explotaciones mineras cuando las filtraciones desde la superficie o desde acuíferos suprayacentes circulan a través de materiales calizos y dolomíticos. La disolución del carbonato cálcico

tiene lugar debido a la presencia en el agua del anhídrido carbónico, que da lugar a la siguiente reacción:



El contenido en ion bicarbonato en las aguas es el que marca la alcalinidad de éstas, midiéndose tal característica en mg/l mediante la expresión:

$$100[(\text{HCO}_3^-) + 2(\text{CO}_3^{--}) + (\text{OH}^-)]$$

Las aguas alcalinas pueden ser, aunque no es frecuente, tan perniciosas como las ácidas. Los materiales rocosos recién excavados dan lugar a una mayor aportación de contaminantes que los terrenos de igual litología pero no alterados, ya que los estratos presentan materiales más fácilmente lixiviables. Algunas aguas alcalinas contienen altas concentraciones de hierro ferroso, que tras su oxidación e hidrólisis pueden llegar a cambiar el drenaje al tipo ácido. Estos tipos son de descargas son más comunes en minas subterráneas que de cielo abierto.

4.2. Aguas ácidas

Cuando los yacimientos que se explotan son de carbón, de sulfuros metálicos o de uranio, y quedan expuestos a la meteorización grandes cantidades de minerales sulfurados (pirita, marcasita, pirrotina, blenda, etc., que se denominarán a partir de ahora con el término genérico de piritas) se forman las denominadas aguas ácidas. Para que esto tenga lugar son necesarias unas condiciones aerobias, es decir la existencia de cantidades suficientes de agua y oxígeno, y simultáneamente la acción catalizadora de bacterias.

Los factores que influyen en la generación de las aguas ácidas a partir de los materiales rocosos que contienen pirita son los siguientes: el pH, la cantidad de oxígeno en

la superficie de la pirita, la morfología de los minerales sulfurosos presentes, la temperatura, el ritmo al que los productos de reacción son evacuados del lugar de reacción, la capacidad de neutralización de las rocas de estéril en el área de reacción, la humedad y la disponibilidad de dióxido de carbono, nutrientes y elementos traza esenciales para la existencia de microorganismos.

Jonh (1987) ha demostrado que el factor más crítico en la oxidación de la pirita es la disponibilidad de oxígeno y que la concentración de oxígeno es lineal, lo cual atribuye a la complejidad de los mecanismos de adsorción-desadsorción en el lugar de reacción. En la Fig. 8.4, se indican las reacciones que tienen lugar en las diferentes etapas de formación de las aguas ácidas.

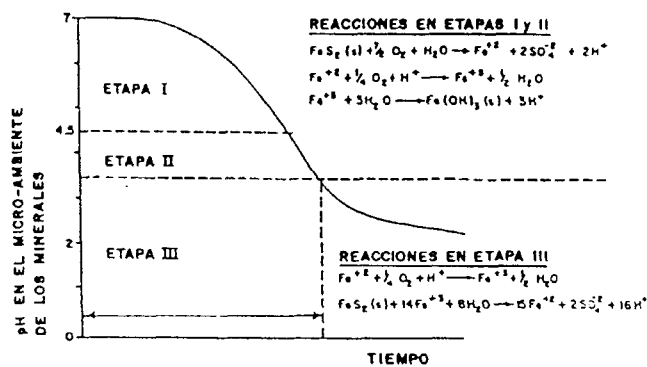


Figura 8.4. Etapas en la formación de aguas ácidas (Ferguson y Erickson, 1987).

Primero, se produce el sulfato ferroso que al ser oxidado nuevamente se transforma en sulfato férrico, y éste a su vez al reaccionar con el agua da lugar al hidróxido férrico, que es insoluble y es el que provoca la coloración amarilla de las aguas, y al ácido sulfúrico. Es importante destacar que una tonelada de pirita, cuando se oxida totalmente, produce casi una tonelada de hidróxido férrico y cerca de tonelada y media de ácido sulfúrico.

Por último, el ion férrico se ve afectado por las reacciones de oxidación-reducción con el sulfuro de hierro pasando a sulfato, tal como se indica en la Fig. 8.4.

En la oxidación del hierro ferroso a férrico interviene la acción catalizadora de algunas bacterias, pues de lo contrario el tiempo de transformación sería mucho mayor. En la primera etapa del proceso de formación de las aguas ácidas, el pH está próximo a 7 y la oxidación debida al aire y la debida a las bacterias, fundamentalmente a la «*Thiobacillus ferrooxidans*» se producen a un ritmo semejante. El carácter alcalino del agua subterránea neutraliza parcialmente la acidez que se ha producido lentamente. En la segunda etapa se acumula el ácido formado, descendiendo el pH y predominando la oxidación de la pirita por la acción bacteriana. Y en la última etapa, el pH desciende por debajo de 3 en las proximidades de los granos de pirita, variando la generación de ácido al aumentar la solubilidad del hierro y disminuir la precipitación de hidróxido férrico. El ion Fe^{+2} es oxidado a férrico por la acción de las bacterias, y a su vez este último oxida a la pirita produciendo más ácido, como se ha indicado.

La actividad de las bacterias es muy importante en los pH inferiores a 3, habiéndose comprobado que la inhibi-

ción de los microorganismos puede llegar a reducir la cantidad de ácido sulfúrico en un 75 %.

El vertido de las aguas ácidas procedentes del drenaje de minas en operación o abandonadas plantea problemas: los ecosistemas fluviales se degradan pudiendo llegar a extinguirse la vida acuática; se imposibilita el empleo de esas aguas para el abastecimiento a poblaciones, pues, por un lado, el agua se hace fuertemente corrosiva y, por otro, aumenta la concentración en metales como el hierro, manganeso, aluminio, magnesio, arsénico, selenio, cinc, níquel, etc., al elevarse su solubilidad.

El drenaje ácido de las minas parece a simple vista limpio e incoloro pues todos sus contaminantes son solubles en el agua ácida. Pero cuando un río contaminado entra en contacto con un curso de agua limpia, los ácidos son parcialmente neutralizados y el hierro comienza a depositarse en forma de hidróxido férrico, dejando el característico revestimiento amarillo y rojizo del lecho del río que llega a constituir un impacto paisajístico.

Otros problemas que presentan las aguas ácidas son los posibles daños a estructuras metálicas y de hormigón, la destrucción o inhibición de la cubierta vegetal implantada en los terrenos restaurados, la adsorción de los cationes metálicos por parte los sedimentos orgánicos e inorgánicos, por algunas plantas acuáticas y por especies piscícolas; la contaminación de acuíferos, etc.



Foto 8.1. Agua ácida en el fondo de una mina de carbón.

5. TECNICAS PREVENTIVAS DE FORMACION DE AGUAS ACIDAS

Las técnicas preventivas son aquéllas encaminadas al control de la oxidación de la pirita, y pueden clasificarse en tres grupos de métodos: los *Métodos de Barrera*, que intentan aislar la pirita de los elementos meteorizantes o del sistema de transporte hidrológico; los *Métodos Químicos*, que modifican la composición de las soluciones de agua en los materiales rocosos y limitan las posibilidades de reacción; y los *Métodos de Inhibición Bacteriana*, que rompen el proceso de oxidación cíclico catalizado biológicamente.

Como las técnicas preventivas indicadas están relacionadas con los sistemas de circulación y control del agua, se recogen estos últimos en la Tabla 8.X.

TABLA 8.X

SISTEMAS DE CONTROL DEL AGUA		CONTROLES DE AGUA SUPERFICIAL					CONTROLES DE AGUA SUBTERRANEA				
		Instalaciones de superficie y excavaciones existentes	Canales de guarda y de desvío de aguas de escorrentía	Modelado de superficies y restauración	Impermeabilización de suelos	Modificación de cursos de agua	Reducción de la permeabilidad de estratos suprayacentes.			Sellado de minas abandonadas	Pozos de desagüe
							Cementación y pantallas de hormigón	Sellado de sondeos	Impermeabilización de suelos		
FUENTES DE AGUA											
Capas de carbón y estratos saturados.	Estratos asociados con capas de carbón.						○				○
	Otros estratos que actúan con fuentes de agua.						○		○		○
Entrada de agua a través de la superficie.	Filtraciones a través del yacimiento.	○	○	○	○	○					
	Filtración superficial general.	○	○	○	○				○		
	Inundaciones superficiales.		○	○	○	○					
Entrada de agua a través de fracturas.	Sistema de juntas en el macizo rocoso.						○				○
	Fallas y zonas de fractura.					○	○		○		○
	Fracturas en zonas de subsidencia.			○	○	○	○				○
Infraestructura minera construida.	Minas subterráneas abandonadas (galerías interconectadas).						○			○	
	Minas a cielo abierto y abandonadas.	○	○	○	○	○			○		
	Chimeneas y sondeos.	○	○	○				○			
	Pozos y excavaciones abiertas.	○	○	○			○			○	

5.1. Métodos de barrera

Dentro de este grupo se distinguen las siguientes técnicas:

- Revegetación de los terrenos
- Aislamiento del agua
- Aislamiento del oxígeno

A. Revegetación de los terrenos

Se ha comprobado en la práctica que la explanación y revegetación de los terrenos ayuda a mejorar la calidad de las aguas. Esto probablemente es debido a las restricciones físicas del sistema (Kleinmann y Erickson, 1986) ya que la compactación de los materiales reduce la exposición de la superficie de la pirita al agua y al oxígeno. La cubrición de los estériles con suelos y vegetación incre-

mentan también la evapotranspiración y restringen la migración del agua, y posiblemente la del oxígeno, hacia la zona pirítica. El oxígeno es también evacuado de los poros del suelo por las raíces de las plantas, la respiración microbiana y la descomposición de mulches orgánicos.

La revegetación es una técnica que coadyuva al control de formación de aguas ácidas, llegando en algún caso a reducir éstas hasta en un 50 %, pero debe complementarse con otras técnicas como se comentará más adelante.

B. Aislamiento del agua

Esta clase de tratamiento físico consiste en aislar al material pirítico del agua como medio de reacción y como fluido de transporte de los productos. En la construcción de estas barreras físicas se utilizan los estériles de las minas, materiales de préstamo de canteras y materiales sintéticos. Alternativamente el desvío de las aguas superficiales, el drenaje y el tendido de los taludes pueden aplicarse para reducir el contacto entre el agua y la pirita.

En lo referente a los estériles piríticos, su colocación selectiva en los vertederos se emplea como una técnica de barrera. Para aislar la pirita de la zona superficial húmeda y oxigenada, así como de la zona saturada, se recomienda que esos materiales se ubiquen dentro de las escombreras en puntos secos y elevados. El esquema más utilizado, Fig. 8.5, consiste en colocar sobre el fondo de la explotación, o más convenientemente sobre la cota del nivel freático previsto después de la restauración, una capa de material permeable y alcalino encima de la que depositan los estériles piríticos para después cubrirlos con otros estériles inertes compactados o materiales impermeables.

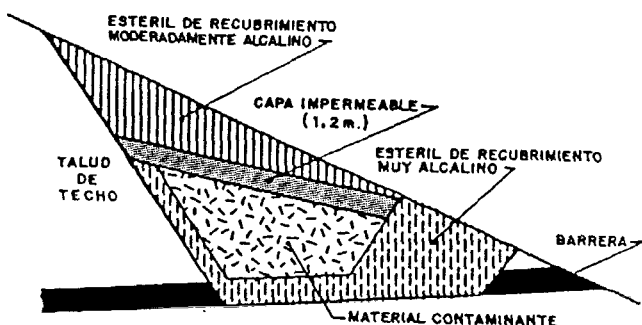


Figura 8.5. Colocación selectiva de materiales contaminantes.

Esta técnica de vertido selectivo es virtualmente impracticable cuando todos los estériles o una gran parte de ellos son potencialmente ácidos. En tales casos se recomienda la impermeabilización superficial de las escombreras.

Los principios generales que deben seguirse son los siguientes:

- 1.º Cubrir los taludes y la superficie para evitar la infiltración del agua y la difusión del aire.
- 2.º Estabilizar las plataformas y los taludes para reducir la erosión por el agua y el aire.

- 3.º Impedir la penetración en el vertedero de vehículos, animales, etc., que puedan dañar a la cubierta impermeable durante su construcción.

Los materiales que pueden emplearse en la impermeabilización de las superficies de escombreras, con las ventajas e inconvenientes que presentan, se indican en la Tabla 8.XI.

Un esquema típico de cubierta combinada que sirve para prevenir la desecación y agrietamiento de las arcillas es el siguiente:

CONSTRUCCION DE LA CUBIERTA	cm
— Especies vegetales (estabilizan la superficie y mejora la estética del vertedero)	20
— Tierra vegetal (evita la desecación de las arcillas)	20-30
— Material grueso (sirve de barrera a las raíces)	50-200
— Capa de arcilla (evita el paso del agua)	20-30
— Material grueso (actúa de barrera capilar).	

Para reducir el riesgo de rotura de las cubiertas impermeables y, consecuentemente, de la pérdida de control de las aguas ácidas, puede recurrirse a un diseño celular de los vertederos combinado con la aplicación de bactericidas. Fig. 8.6. Esta práctica es la más adecuada cuando la vida de la mina es grande y se pretende impedir que se inicien los procesos de oxidación de los materiales depositados.

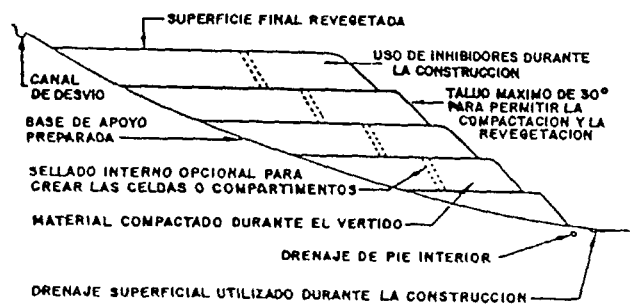


Figura 8.6. Sección transversal de un vertedero construido de forma celular (Bell, 1987).

En otro contexto, dentro de los huecos de excavación se suele recurrir al empleo de barreras de arcilla. En las minas de carbón se colocan sobre los frentes descubiertos de mineral o huecos de labores antiguas antes de proceder al autorrelleno de los huecos Fig. 8.7., y en determinadas explotaciones cuando se pretende crear un lago y los taludes expuestos contienen suficiente material pirítico que puede hacer que desemboque en un depósito de agua ácida.

En otros casos, la arcilla se emplea para impedir que el agua de los acuíferos interceptados entre en contacto con los estériles alojados en los huecos, siempre que estos puedan dar lugar a un drenaje ácido. Fig. 8.8.

TABLA 8.XI

MATERIAL DE CUBIERTA	PERMEABILIDAD DEL AGUA (m/s)	VENTAJAS/INCONVENIENTES
— Arcilla compactada	10^{-9} - 10^{-11}	Disponible en muchos lugares y barata. Fácilmente erosionable, y puede sufrir daños por agrietamiento y penetración de las raíces. Buen sellado si se protege y mantiene.
— Tierras de cultivo compactadas	10^{-7} - 10^{-9}	Como en el caso anterior, pero generalmente más permeables.
— Tierra vegetal compactada	10^{-5} - 10^{-8}	Como en el caso anterior, más permeables. Duración incierta.
— Turba	10^{-5} - 10^{-6}	Necesita mantenerse en condiciones de saturación. Normalmente impracticable en taludes de vertederos muy pendientes. Coste medio.
— Hormigón y lechada de cemento	10^{-10} - 10^{-12}	Sujeto a agrietamiento, heladas y daños mecánicos. Coste alto.
— Asfalto	10^{-20}	Como en el caso anterior. Más impermeable y mayor coste de instalación.
— Láminas sintéticas	Impermeable	Requiere un lecho de apoyo adecuado y una cubierta protectora. Muy impermeable y duradera. Sujeta a daños mecánicos y penetración de las raíces. Coste elevado.

Fuente: Modificado de Bell (1988).

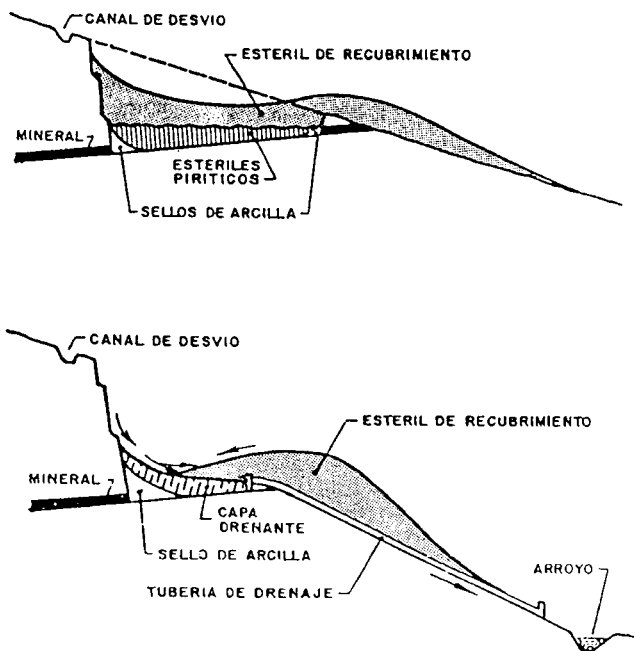


Figura 8.7. Sellado con arcilla de los frentes de mineral descubiertos.

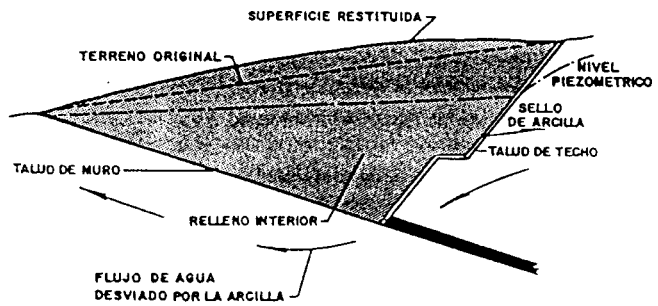


Figura 8.8. Colocación de capa de arcilla sobre el talud excavado para evitar la entrada de aguas subterráneas al hueco relleno de estériles. (Norton, 1983).

C. Aislamiento del oxígeno

El oxígeno se necesita para que se produzca la oxidación directa de la pirita, para el paso de ión ferroso a férrico, y para la respiración de las bacterias. El primer método de aislamiento del aire que puede emplearse es el de inundación de sus labores, tanto en minería a cielo abierto como en minería de interior, siendo en esta última don-

de se empezó a aplicar en la década de los años 60. Con esta técnica se impide que el aire entre en contacto con los materiales contaminantes, y por lo tanto se produzca la oxidación de la pirita. Su aplicación exige unas condiciones muy estrictas, pues en las minas subterráneas es preciso sellar todas las fracturas existentes y garantizar que no se producen otras nuevas grietas, taponar los sondeos abandonados y efectuar cierres en los socavones y labores, Fig. 8.9, que permiten el desagüe de las minas al mismo tiempo que impiden la entrada de aire.

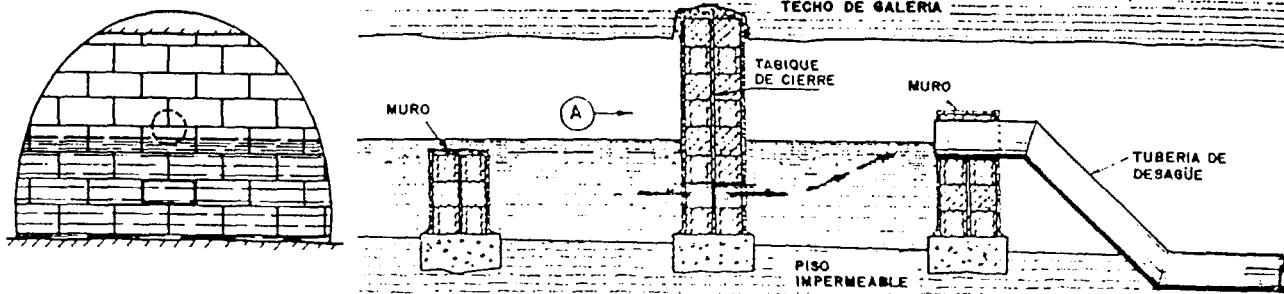


Figura 8.9. Cierre de galería de mina. (Modificado de Kim et al, 1982).

En las minas a cielo abierto la viabilidad de esta técnica depende de la posibilidad de mantener estable el nivel freático dentro de los materiales que contienen pirita, pues de lo contrario un descenso del agua provoca la acidificación de esta en los materiales suprayacentes. Un método de control indirecto del oxígeno puede conseguirse mediante la colocación entre la atmósfera y el estéril piritico de materiales consumidores de oxígeno, como por ejemplo el compost, los lodos fecales tratados, etc.

Por último, en contraste con lo que sucede en las escombreras de estériles gruesos, en los depósitos de residuos de lavaderos de carbón y estériles finos de plantas de tratamiento, la presencia de oxígeno se limita a los niveles más superficiales debido a la escasa difusión del oxígeno, y al consumo de éste en la oxidación de la pirita y por las bacterias existentes.

Aunque los métodos descritos pueden resultar costosos en un principio, a largo plazo pueden constituir una solución permanente.

5.2. Métodos químicos

Los métodos químicos intentan romper de varias formas el sistema de drenaje de aguas ácidas.

A. Adición alcalina

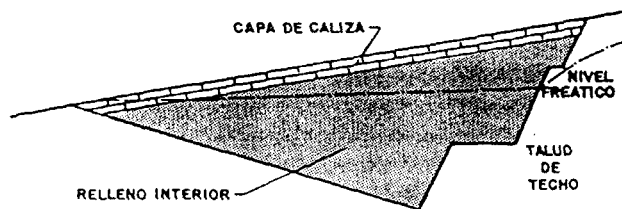
Las sustancias más utilizadas son los compuestos alcalinos tales como el hidróxido sódico (NaOH , sosa cáustica), la caliza (CO_3Ca), la cal (CaO , Ca(OH)_2) y el carbonato sódico (Na_2CO_3). La adición de estas sustancias, además de producir la neutralización de las aguas ácidas, crean un ambiente desfavorable para la oxidación de la pirita. Primero, porque las bacterias que oxidan el hierro re-

quieren un ambiente ácido para que su actividad sea óptima y, segundo, porque con pH cercanos al neutro el hierro férrico precipita, con un posible efecto de recubrimiento de la superficie de la pirita y rotura del mecanismo de oxidación.

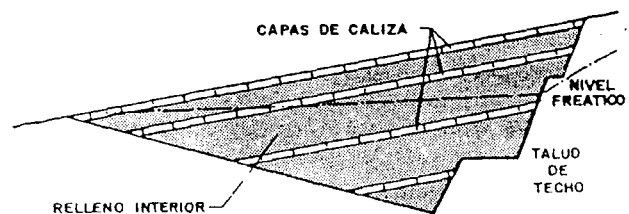
Son muchos los métodos que pueden aplicarse, pero entre ellos destaca el de la carga del agua con productos alcalinos antes de que ésta entre en contacto con la pirita. En las minas a cielo abierto esto se puede hacer colocando material alcalino sobre la capa de rodadura de las

pistas de transporte, en capas estratificadas en los vertederos, Fig. 8.10, o mezclado con los estériles. La adición de caliza sobre las superficies a restaurar facilita el establecimiento de la cubierta vegetal e inhibe la formación de aguas ácidas.

Una nueva técnica consiste en la colocación de materiales alcalinos (mezcla de sustancias de alta y baja velocidad de disolución, como por ejemplo calizas y briquetas



a/. CAPA UNICA DE CALIZA EN SUPERFICIE



b/. VARIAS CAPAS DE CALIZA

Figura 8.10. Colocación de capas de materiales alcalinos en vertederos interiores (Read, 1984).

de cenizas de sosa) en puntos estratégicos de la superficie donde se produce la recarga de los acuíferos. Con esto se consigue una neutralización rápida y unas condiciones alcalinas suficientes para mantener un pH casi neutro.

Por último, la adición de compuestos alcalinos, a través de sondeos, a las aguas retenidas en minas abandonadas o en escombreras de estériles, se ha ensayado en diversas ocasiones, pero con resultados no demasiado buenos; pues, los productos químicos que se precisan deben ser bastantes solubles, ya que de lo contrario pasaría como con la caliza que al estar en suspensión actuarían en puntos muy próximos al lugar de inyección y, además, no seguiría la neutralización de las aguas, pero se evitaría la formación de éstas, pues los materiales se irían en la zona saturada y rápidamente abajo interaccionando muy poco con la zona no saturada.

Considera
el control
de la
oxidación

Se fosfata a los estériles tóxicos ralentiza la oxidación de la pirita, debido a la formación de fosfatos insolubles ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ y FePO_4), disminuyendo la concentración de hierro férrico disponible para la oxidación con la pirita.

Actualmente, se ha utilizado el apatito junto con carbonato sódico para neutralizar las aguas de una subterránea abandonada mediante la inundación de labores.

En ensayos de laboratorio se ha visto que la adición de apatito triturado en una proporción de 3 ppt (3 t por cada 1.000 t) reduce la formación de aguas ácidas en un 96 %.

5.3. Métodos de inhibición bacteriana

La presencia de bacterias oxidantes del hierro controla fuertemente la formación de aguas ácidas, ya que si esos microorganismos se eliminan se consigue reducir la acidificación en más de un 50 %. Entre las sustancias químicas más efectivas para inhibir a la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*, se encuentran los surfactantes aniónicos y los ácidos orgánicos.

El detergente aniónico más eficaz y económico es, hasta el momento, el Sodio Lauril Sulfato (SLS). Este compuesto se administra en forma de solución diluida, con unas concentraciones del orden de 25 ppm, sobre la superficie de la escombrera, intentando saturar los primeros 20 ó 30 cm, ya que es una zona donde se produce la oxidación de la pirita y además las aguas que percolen extenderán la acción bactericida a los niveles inferiores. Este tratamiento se ha visto que es muy útil cuando los estériles son propensos a formar aguas ácidas antes de la revegetación, debiendo aplicarse mediante riego por aspersión durante la nivelación de los estériles y antes del extendido de los suelos. Pero esta técnica no puede ser considerada como un medio de control a largo plazo, pues sólo es efectiva durante unos meses.

En los últimos años, se han desarrollado los bactericidas con efectos retardados. Estos consisten en unos pellets o pastillas en una matriz polimérica, un agente activo y otras sustancias químicas, que actúan como agentes hidrófobos o como generadores de porosidad, regulando la difusión del surfactante a la superficie y su disolución al

estar en contacto con la humedad. Suelen tener forma cilíndrica, ya que es una geometría con una alta relación superficie/volumen, y tiene una actuación lenta cuando desciende la superficie efectiva en el transcurrir del tiempo. Los productos comercializados actualmente poseen tiempos activos superiores a los cinco años, habiéndose comprobado en algunas minas que al cabo de dos años la producción de aguas ácidas se mantiene en unos porcentajes por debajo del 80 %.

Los costes de aplicación de los bactericidas comerciales varían entre las 130.000 y las 250.000 PTA/ha, si se utilizan en forma de solución, y entre las 800.000 y 1.350.000 PTA/ha si se combinan las soluciones con el sistema de pellets de efecto retardado.



Foto 8.2. Pastillas de bactericida. (Promac).

Por último, a escala de laboratorio se han ensayado otras sustancias como los sorbatos y los benzoatos utilizados en la conservación de alimentos (Erickson et al, 1985; Onysko, 1986). En concentraciones equivalentes, el benzoato y el SLS, tienden a ejercer una acción ligeramente más intensa de inhibición que el sorbato. La efectividad de los diferentes inhibidores está afectada por la naturaleza de los materiales estériles, ya que interviene la afinidad de adsorción, las interacciones químicas específicas, el pH, etc.

5.4. Técnicas de predicción de formación de aguas ácidas

Las técnicas para predecir el potencial de formación de aguas ácidas pueden dividirse en cinco grupos (Ferguson y Erickson, 1986):

1. Estudios mineros regionales.
2. Modelos geológicos y paleoambientales.
3. Ensayos estáticos geoquímicos.
4. Ensayos cinéticos geoquímicos.
5. Modelos matemáticos.

Los estudios mineros regionales suponen un examen y muestreo de minas en operación y abandonadas próximas al área del proyecto. Con los datos recogidos y te-

niendo en cuenta el entorno geológico se efectúan simples extrapolaciones.

Los modelos paleoambientales examinan las condiciones de deposición regionales de los minerales sulfurados. El azufre pirítico formado en aguas salobres o marinas suele tener una mayor tendencia que el formado en aguas dulces para generar aguas ácidas. Los modelos geológicos de una secuencia sedimentaria o de los yacimientos ígneos/metamórficos son útiles para estimar las dimensiones y la localización de las zonas con un potencial de formación de aguas ácidas.

Los ensayos estáticos geoquímicos comparan simplemente la capacidad de generar ácido y la de consumir éste por los carbonatos existentes en muestras de roca. Fig. 8.11. Las técnicas evaluación Acido/Base y la de relación PPA/Azufre se utilizan frecuentemente en las minas de carbón de Estados Unidos, mientras que la del Ensayo Inicial de Investigación BC se aplica en minas metálicas en Canadá. La determinación de los potenciales ácidos es similar a las tres técnicas, mientras que la de los potenciales de neutralización son diferentes.

Estos ensayos son llamados estáticos, por no considerar la velocidad relativa de producción de ácido y su consumo. El ritmo de liberación de la acidez a partir de la oxidación de los sulfuros y de la alcalinidad por medio de la disolución de los carbonatos puede ser diferente y llegar a afectar a la generación de las aguas de drenaje ácidas. Geidel (1979) sugiere que la liberación de la alcalinidad está limitada por un valor máximo debido a la presión parcial del anhídrido carbónico, mientras que la de la acidez no está limitada. Diversos investigadores han criticado el uso de los ensayos estáticos y sugieren que solamente se apliquen en los casos más simples donde la cantidad de ácido producido o el material consumido por el ácido es significativo. En cualquier caso, son muy útiles para predecir la calidad del drenaje y, sobre todo, para indicar la conveniencia de procedimientos más sofisticados.

Los métodos llamados cinéticos son ensayos de meteorización simulada, también de laboratorio. Tabla 8.XII. Aunque permiten obtener una mayor precisión, la interpretación es más difícil, se requiere mucho más tiempo y son más costosos.

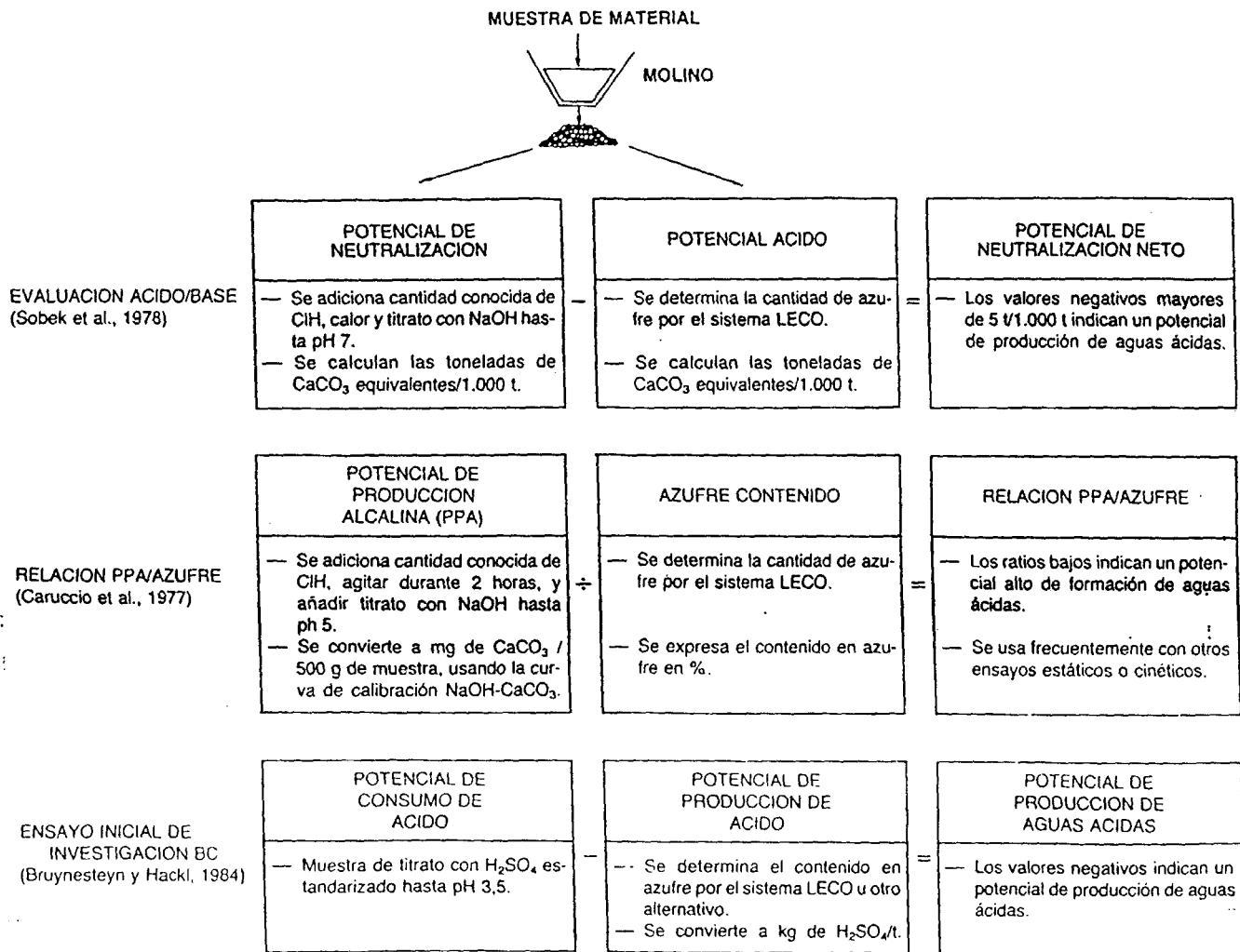


Figura 8.11. Técnicas de predicción de formación de aguas ácidas. (Ferguson y Erickson, 1987).

TABLA 8.XII. TECNICAS CINETICAS DE PREDICCION DE DRENAJES ACIDOS (Ferguson y Erickson, 1986)

ENSAYO	DESCRIPCION	APLICACION	REFERENCIAS
1. Ensayo de confirmación de investigación BC.	<ul style="list-style-type: none"> — Muestra colocada en un recipiente Erlenmeyer de 250 ml con 70 ml de medio nutriente. cultivo de Thiobacillus ferrooxidans en pH = 2.2-2.5. — Se coloca el recipiente en un Shaker giratorio a 35° C en atmósfera de CO₂ enriquecida. — Registro de pH y adición de muestra. — Si el pH se eleva sustancialmente entonces la muestra no es productora de ácido. — Si el pH se mantiene bajo entonces la muestra tiene un cierto potencial ácido. 	Usado frecuentemente en minas metálicas en Canadá.	Bruynesteyn y Hackl (1984).
2. Recipiente Shake.	<ul style="list-style-type: none"> — Muestra colocada en un Erlenmeyer de 1l con 600 ml de agua o solución nutriente. — Serie de muestras ensayadas a distintos pH iniciales, inoculaciones y temperatura. 	Algo usado en minas metálicas de Canadá.	Davidge (1984). Halbert et al. (1983).
3. Reactor Soxhlet.	<ul style="list-style-type: none"> — Se utiliza reactor Soxhlet estándar o modificado. — Se coloca agua en el recipiente, se evapora y se pasa por un condensador. El líquido condensado cae dentro de la placa porosa que contiene a la muestra y después retorna al recipiente. — Se analiza el lixiviado después de 64 a 192 h. para una gama de parámetros. 	Algo usado en minas de carbón en Appalachia, EE. UU.	Sullivan y Sobek (1982). Renton (1983).
4. Célula de humedad.	<ul style="list-style-type: none"> — La muestra se coloca en un recipiente de plexiglass conectado a un humidificador de aire. — El aire pasa a través de la muestra durante 3 días. — Se hace pasar aire seco durante 3 días y se añaden 20 ml de agua al séptimo día. — El lixiviado se agita y se analiza para una gama de parámetros. — El ensayo se repite a las 8-10 semanas. 	Relativamente frecuente en minas de carbón de Appalachia, EE. UU.	Caruccio et al. (1977, 1980).
5. Lisímetros/Columnas.	<ul style="list-style-type: none"> — Muestra colocada en una columna y periódicamente lixiviada por agua destilada. — Análisis de muestras lixiviadas para una gama de parámetros. — Lixiviación para un periodo mínimo de 8 a 10 semanas. — Variaciones diversas en los procedimientos de lixiviación descritos en la literatura. 	Relativamente usado en Canadá y EE. UU.	Sturey et al (1982). Apel (1983). Ritcey y Silver (1981).
6. Ensayos en pilas y cortas.	<ul style="list-style-type: none"> — La muestra de todo uno se coloca sobre una superficie impermeable. — Las precipitaciones proporcionan un lixiviado que se recoge en una balsa. — Las muestras de lixiviado se analizan para una gama de parámetros. — Los ensayos se llevan a cabo al menos durante un año. 	Poco usado en Canadá y EE. UU.	Eger et al. (1981). Murray y Okuhara (1980).

Estos ensayos son muy interesantes para determinar si los constituyentes minerales de los estériles son tóxicos para los microorganismos e inhiben su crecimiento. Otros ensayos cinéticos permiten ver el cambio de calidad de los líquidos lixiviados con el tiempo, y usar esos resultados en modelos físicos y matemáticos de predicción.

Los modelos matemáticos se han desarrollado recientemente para predecir cuantitativamente la calidad de los drenajes. Estos modelos son muy complejos y no han sido ampliamente validados o verificados con experiencias reales de campo.

6. TRATAMIENTO DE EFLUENTES

6.1. Eliminación de sólidos en suspensión. Decantación

Los sólidos en suspensión constituyen una de las fuentes más frecuentes de contaminación física de las aguas. Esta se produce por la fuerza erosiva del agua que provoca en su circulación superficial el arrastre de partículas sólidas.

El tratamiento más común consiste en retener las aguas en unas balsas o reposadores durante un tiempo suficiente para que se produzca la decantación de los sólidos. Si químicamente el agua no está contaminada y se cumplen los estándares de calidad, los efluentes se podrán verter a un cauce público o reutilizar en las explotaciones, y en caso contrario proceder a la depuración química de las aguas con los procesos que se exponen en los siguientes epígrafes.

Dado que las balsas de decantación constituyen un tipo de obras complementarias a las de control de la erosión, su cálculo y dimensionamiento son objeto de estudio en el capítulo 11.

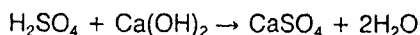
6.2. Neutralización química

El proceso de neutralización de las aguas ácidas mediante la adición de sustancias alcalinas es el que actualmente se lleva a cabo en la mayoría de las minas que producen esos efluentes.

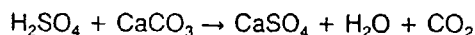
El tratamiento en las plantas convencionales se realiza en tres etapas: neutralización, oxidación y precipitación. Las reacciones principales que tienen lugar según el tipo de agente alcalino que se utilice son:

1. Neutralización del ácido con una base.

Con cal:



Con caliza:



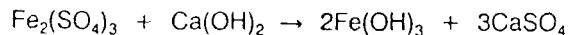
2. Oxidación del hierro ferroso o férrico.

Se lleva a cabo tomando oxígeno de la atmósfera mediante la agitación de las aguas en unos tanques. Con esto se consigue modificar el estado del hierro haciéndolo insoluble.

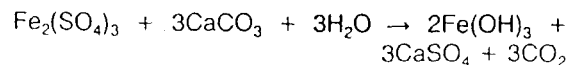
3. Precipitaciones de los hidróxidos de hierro.

Los hidróxidos se forman al reaccionar el sulfato férrico con los agentes alcalinos.

Con cal:



Con caliza:



La separación de los sólidos insolubles se realiza en decantadores circulares o rectangulares, ayudada por la acción de floculantes. La filtración en sus diversas variantes puede emplearse como sistema complementario.

Los agentes alcalinos pueden ser muchos: cal rápida, cal hidratada, roca caliza, caliza en polvo, magnesita, dolomita, sosa caústica, cenizas de sosa e hidróxido de amonio. Pero de todos ellos, los que se usan en la práctica, por razones económicas, son: la cal, la cal hidratada y la caliza. En la Tabla 8.XIII se comparan esos productos en coste y por factor de basicidad.

TABLA 8.XIII

AGENTE ALCALINO	COMPOSICION QUIMICA	FACTOR DE BASICIDAD	COSTE RELATIVO
Cal rápida	CaO	1,79	1,60
Cal hidratada	CaO(OH) ₂	1,35	2,30
Caliza en roca	CO ₃ Ca	1,00	1,00
Caliza en polvo	CO ₃ Ca	1,00	1,25

* Equivalente en peso a CO₃Ca.

La concentración de metales pesados puede reducirse por precipitación, si bien es necesario tener en cuenta que cada uno de los metales precipita como hidróxido a pH distintos, por ejemplo el pH mínimo para el Pb⁻² es 6,3, para el Fe⁻² es 9,5 y para el Mn⁻² es 10,6. Hay que tomar precauciones cuando están presentes metales anfóteros como el cinc y el aluminio que se redisuelven en la solución si ésta es demasiado alcalina.

6.2.1. METODO CONVENCIONAL

En la Fig. 8.12 se representa el esquema de la planta de tratamiento con cal de Lignitos de Meirama. La línea de proceso comienza con la entrada del agua ácida a la planta, a través de un canal donde se mide el caudal y el pH, pasa seguidamente a las cubas de neutralización donde se adiciona la lechada de cal hasta alcanzar un valor del pH entre 10 y 10,5, con el que se consigue que se formen los hidróxidos de hierro y manganeso. Estas cubas disponen de unos agitadores que garantizan una mezcla homogénea, transcurrido cierto tiempo.

En un depósito más pequeño se recogen las aguas de recirculación de los fangos del decantador y las aguas sucias procedentes del lavado de los filtros. Seguidamente el agua pasa por gravedad a los tanques de aireación, donde por medio de unas turbinas se consigue la oxidación del hierro ferroso y el manganeso.

En el canal de rebose de los tanques de aireación se añade el policloruro de aluminio, que es un floculante primario. El agua entra a continuación en los decantadores-floculadores transportando ya los pequeños flóculos de los precipitados coloidales y materiales en suspensión. Para producir el encadenamiento de esos flóculos y su posterior decantación se dosifica sobre la campana de reacción un polielectrolito aniónico, que es un compuesto polimérico. El lecho de fangos que se forma en el fondo del decantador se barre hacia el centro mediante un rastrillo giratorio y su purga se efectúa desde la arqueta central inferior.

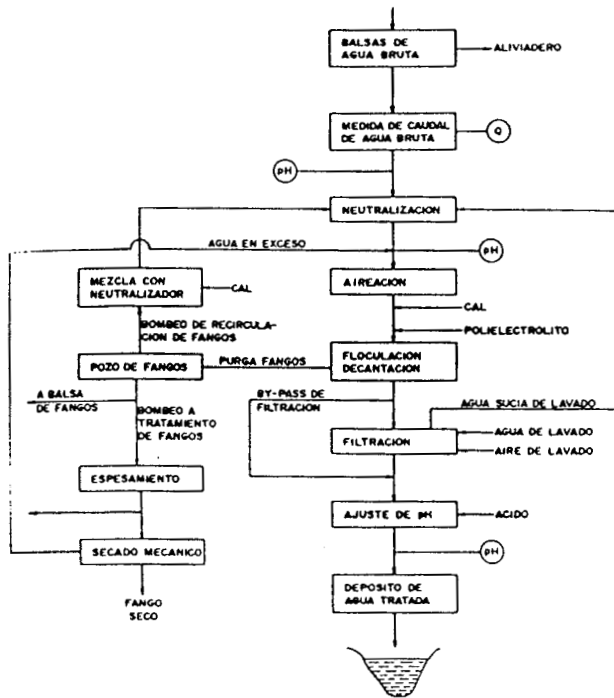


Figura 8.12. Esquema de la planta de tratamiento de aguas de Lignitos de Meirama.

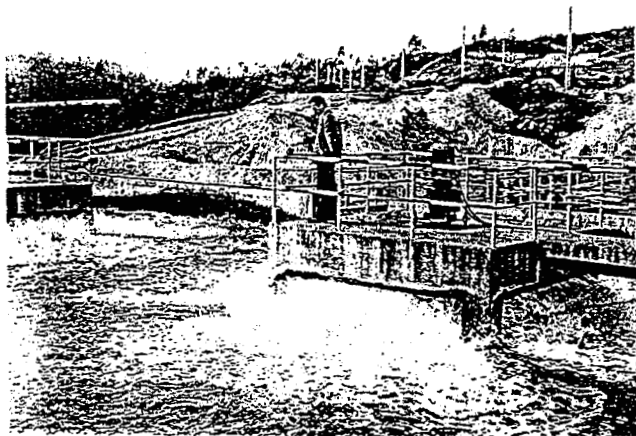


Foto 8.3. Tanques de aireación.

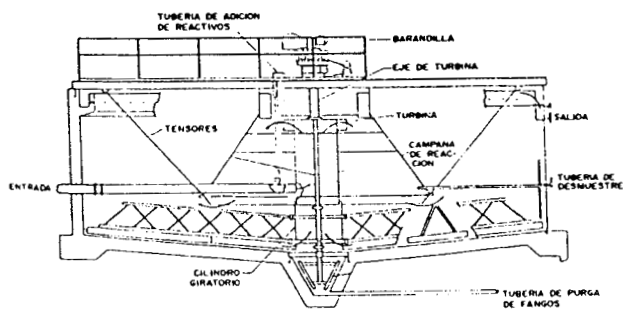


Figura 8.13. Sección vertical de un decantador.

El agua clarificada que sale del decantador pasa a unos filtros de arena distribuyéndose por medio de unos canales longitudinales. El material del lecho de filtrado suele ser arena sílicea, que es soportada por un falso fondo constituido por losas prefabricadas de hormigón armado, que disponen de unas boquillas que sirven para colectar de forma uniforme el agua filtrada y distribuir el agua y el aire de lavado necesarios para la limpieza del filtro, que son aportados por un canal longitudinal situado en la parte inferior.

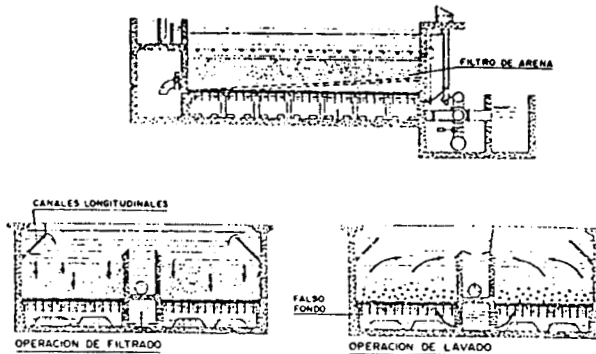


Figura 8.14. Secciones de un filtro de arena.

De la batería de filtros, el agua pasa a un depósito de ajuste de pH, donde tras medirse éste se adiciona ácido sulfúrico, si es necesario, consiguiéndose la mezcla y homogeneización mediante un agitador rápido del tipo turbina con palas. A la salida existe otro pH-metro que realiza el ajuste fino y que va provisto de alarma que en caso de anomalía cierra la entrada de agua a la planta depuradora.

En cuanto a los fangos producidos, se envían directamente a unas balsas de almacenamiento donde una vez secados se extraen y se extraen y se vierten en las escombreras mezclados con los estériles rocosos, aprovechando una parte de ellos en los trabajos de revegetación.

Respecto al empleo de caliza, en lugar de cal, en las plantas convencionales ésta tiene algunas ventajas entre las que destacan: es un producto barato, abundante y poco peligroso; no se requiere un control muy sensible en su alimentación y los lodos que se producen son mucho más densos y más fáciles de manejar. Por el contrario, los inconvenientes que plantea son; el largo tiempo de retención que se precisa para la neutralización, sobre todo cuando contienen cierta cantidad de dolomía, y la falta de economía si se precisan cantidades muy grandes.

En la Fig. 8.15 se representa el esquema de tratamiento propuesto por el U.S. Bureau of Mines, en el que la caliza se reduce a una granulometría de unas 5 a 10 micras mediante un molino autógeno. Este material se mezcla con agua para formar una suspensión que se adiciona al flujo de agua ácida. Después se pasa a un tanque de aireado donde se desprende el anhídrido carbónico formado y se oxida el hierro ferroso. Los lodos de yeso y los óxidos de hierro se separan en los tanques de sedimentación.

Como ya se ha indicado, la principal limitación de este método está en la lenta oxidación del hierro, pues en el intervalo de pH (6,8 a 8,0) en el que se opera en este tratamiento la velocidad de oxidación del hierro oscila entre 10 y 25 ppm/min.

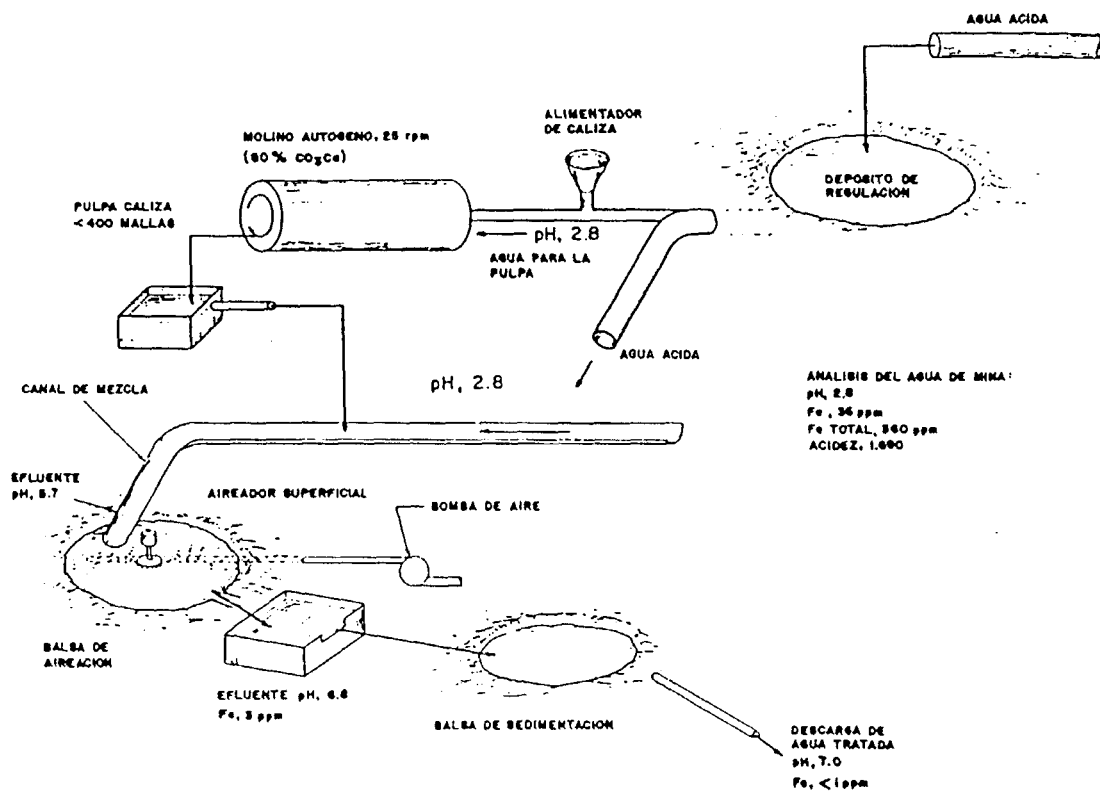


Figura 8.15. Tratamiento de neutralización de aguas ácidas con caliza (Kim et al, 1982).

Con el fin de aumentar la capacidad de tratamiento, reducir las dimensiones de los tanques de aireación y el consumo de energía que se precisa para la oxidación del hierro se están llevando a cabo investigaciones sobre posibles catalizadores como el carbono activado, las bacterias ferro-oxidantes, partículas de arcilla, etc.

6.2.2. SISTEMA ILS (IN LINE SYSTEM)

Este sistema ha sido desarrollado por Ackman y Kleinmann (1984) del U.S. Bureau of Mines de Estados Unidos con el fin de airear el agua mediante un mecanismo sencillo y de reducido coste. Consiste en unas bombas de inyección que se instalan en un punto próximo del extremo de la tubería del bombeo. Fig. 8.16. Estas bombas fabricadas de PVC disponen de dos entradas, una para el agua y otra para el aire que se succiona por efecto Venturi al circular el fluido, dando lugar a la primera etapa de aireación.

El agua, después de atravesar el difusor, llega a un mezclador estático formado por una serie de tubos de unos 30 cm de diámetro dentro de los cuales existe una hélice que fuerza al fluido a seguir un movimiento turbulento que favorece la mezcla y aumenta la reactividad.

Los requerimientos de aireación varían en función de la concentración de hierro y del caudal tratado. El ritmo de oxidación del Fe^{+2} depende fundamentalmente del oxígeno

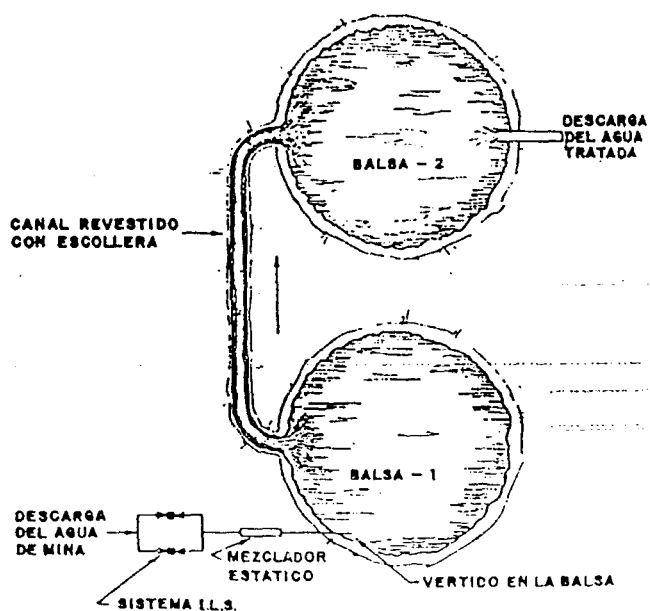


Figura 8.16. Instalación de tratamiento con sistema ILS.

no disuelto y del pH. En ensayos reales se ha visto que para pH bajos (4,6 a 5,5) la oxidación del hierro se acelera de 10 a 400 veces y para pH casi neutros (6,9 a 7,5)

por 1000. En los tratamientos convencionales es preciso elevar mucho el pH para conseguir una oxidación rápida del hierro.

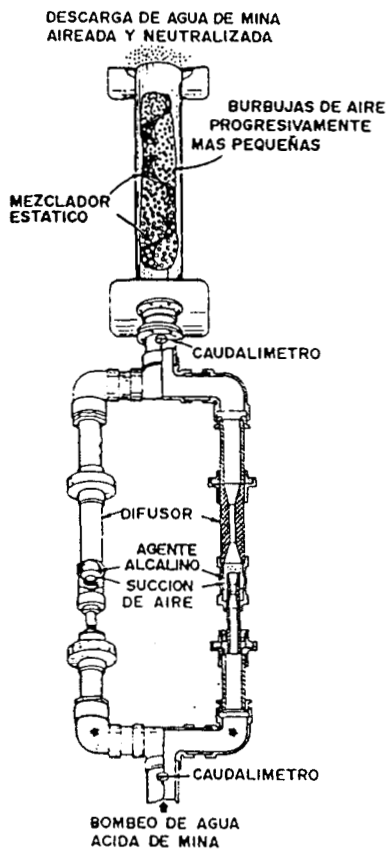


Figura 8.17. Esquema de instalación de una bomba de inyección y de un mezclador estático (Ackman y Kleinmann, 1984).

Si el sistema se utiliza además para la neutralización, la cámara de succión también sirve para añadir el material alcalino, por ejemplo caliza, NaOH, KOH o caliza molida. Alternativamente, el material neutralizante puede inyectarse en la línea por medios mecánicos antes de entrar en las bombas de inyección. La oxidación del Fe^{+2} se consigue en pocos segundos, por lo que el sistema combinado de neutralización y aireación produce resultados muy satisfactorios.

Otras experiencias de preaireación son las llevadas a cabo por Jageman et al (1987) que han demostrado que cuando las aguas ácidas de mina contienen carbonatos disueltos éstos reaccionan con la cal hidratada para formar carbonato de calcio, aumentando el consumo del agente neutralizante requerido y el volumen de lodos formados durante el proceso. La preaireación actúa de manera que los carbonatos disueltos se remobilizan produciendo CO_2 antes de la etapa de neutralización, repercutiendo favorablemente en los costes de tratamiento.

6.2.3. NEUTRALIZACION CON AGUAS FRESCAS

Consiste en la introducción de aguas fluviales frescas en las labores de las minas abandonadas que producen efluentes ácidos. Con ello, se consigue que la neutraliza-

ción y consiguiente precipitación de hidróxidos se produzca fuera de los cauces naturales.

Los principales inconvenientes que plantea este sistema son: la necesidad de disponer de un gran volumen de agua en las proximidades, la construcción de balsas aguas abajo para decantar sólidos en suspensión, dimensiones suficientes de los huecos para alojar a todo el agua y a los precipitados y permitir además un tiempo de retención adecuado. Este sistema requiere obviamente unas condiciones de aplicación muy específicas, pero puede ser la solución más económica en algún caso de abandono de mina.

6.3. Osmosis inversa

La ósmosis inversa es un sistema efectivo de remoción de los iones polivalentes de las aguas de drenaje. En la Tabla 8.XIV se presentan los datos de tratamiento de efluentes de minas de carbón. Todos los metales pesados llegan a suprimirse en un 99 % como media.

TABLA 8.XIV. TRATAMIENTO DE EFLUENTES MINEROS POR OSMOSIS INVERSA

	ELIMINACION (%)
Ca	98 a 99,8
Mg	98,5 a 99,8
Fe, total	98,5 a 99,9
Al	91,7 a 99,2
Mn	97,8 a 99,1
Cu	98,7 a 99,5
SO_4	99,3 a 99,9
Acidez	81,0 a 91,7
Conductancia	95,0 a 99,9

La ósmosis inversa es un proceso que consiste en la utilización de una membrana que deja pasar el agua, reteniendo en un lado los contaminantes. Estas membranas tienen un espesor de unas 100 micras y están constituidas por una película de acetato de celulosa. La recuperación de agua limpia es alta, llegando a valores del 90 % de la total. Esta recuperación está limitada por la precipitación de las sustancias sobre la membrana cuando éstas superan el punto de saturación. La primera sustancia que precipita es, generalmente, el sulfato cálcico.

Este sistema de tratamiento tiene diversos inconvenientes, entre los que destaca la pérdida de rendimiento al obstruirse las membranas, el alto coste y la difícil manipulación de los lodos.

6.4. Intercambio iónico

Al igual que el sistema anterior, el tratamiento de las aguas ácidas por intercambio iónico con resinas sintéticas de alto peso molecular permite obtener agua con un alto grado de pureza e incluso recuperar metales pesados, pero plantea numerosos inconvenientes como son el ensuciamiento progresivo de las resinas, la interferencia de los iones, la capacidad de carga limitada, los elevados

costes de operación y el almacenamiento de las soluciones de regeneración.

6.5. Tratamiento en ciénagas con especies vegetales y calizas

Basándose en observaciones sobre ciénagas y pantanos naturales, numerosos investigadores (Hunstsman et al, 1978; Wieder et al, 1982; Kleinmann et al, 1986), desde finales de los 80, están estudiando y evaluando la utilización de esos lugares como sistemas de bajo coste y conservación para el tratamiento de aguas ácidas de mina, sobre todo de explotaciones abandonadas, que producen pequeños caudales de efluentes.

Inicialmente las áreas de tratamiento se construyeron simulando ciénagas naturales donde dominaban diferentes tipos de musgos: «*Sphagnum recurvum*, *Sphagnum brevifolium*, *Sphagnum fimbriata*», pero la experiencia ganada en el campo ha demostrado que también son muy efectivas las plantas emergentes como son las del género «*Typha*», es decir aneas, espadañas y amentos.

La eliminación de metales se produce por diversos procesos: por absorción, especialmente por intercambio iónico, por oxidación debido a las bacterias, por la captación de las plantas como nutrientes, por precipitación como minerales sulfurados en el ambiente del sustrato inferior y por la simple filtración.

Las especies «*Sphagnum*» tienen una gran superficie y son extremadamente eficientes como medio de intercambio iónico y, además, actúan como un buen filtro de las partículas de hidróxido férrico. Las especies «*Typhas*» son muy efectivas a pesar de no tener una gran superficie, ya que son capaces de retener eficazmente hasta 300 ppm de Fe y 200 ppm de Mn en el tejido radicular rizomatoso, y 45 ppm de Fe y 52 ppm de Mn en las hojas. Además, estas plantas emiten a través de sus raíces oxígeno atmosférico y anhídrido carbónico, que favorecen la acción oxidante de las bacterias en el sustrato rico en materia orgánica. También las algas contribuyen a la eliminación de metales.

El tratamiento natural finaliza con la neutralización del agua aprovechando los afloramientos calizos que existan en las proximidades. En resumen, cuando las aguas ácidas atraviesan esas charcas las especies vegetales son capaces de reducir la concentración de hierro, manganeso, calcio y magnesio elevando su pH, por ejemplo de 2,5 a 4,5, y con la acción neutralizante de los materiales alcalinos alcanzar pH entre 6 y 7.

Los criterios constructivos de las ciénagas, dados por Kleinmann (1986), son los siguientes:

- 1.º Las dimensiones deben permitir el tratamiento de los caudales de efluentes en cualquier época del año y para las precipitaciones que se produzcan. El área mínima debe ser de 300 m²/l/s y como área media se utiliza 900 m²/l/s.
- 2.º Debe minimizarse la velocidad de circulación del agua y maximizar el tiempo de retención en el sistema.
- 3.º Mantener láminas de agua entre 5 y 50 cm.
- 4.º Proporcionar un suelo óptimo a las plantas hidrófitas (tales como la *Typha*) formado por materia orgánica descompuesta (turba) con cierto contenido de suelo mineral.

- 5.º Evitar las circulaciones cortas del agua mediante la construcción de canales.
- 6.º Disponer entramados de aneas que cubran aproximadamente el 40 % de la superficie total.
- 7.º Colocar un lecho de caliza para ayudar a la neutralización del pH.
- 8.º Construir pequeños saltos o estructuras de aireación a lo largo de los canales de caliza.

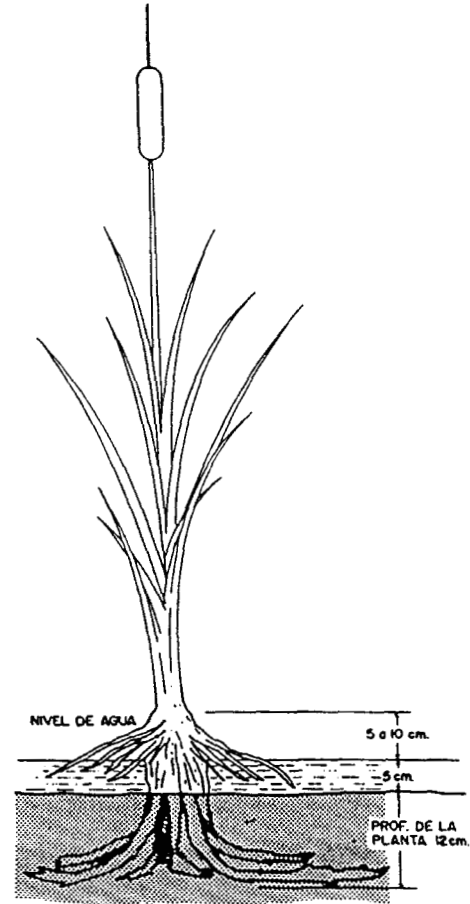


Figura 8.18. Anea.

En la Fig. 8.19 se pueden ver dos diseños de ciénagas utilizados en el tratamiento de aguas ácidas en Montana; el primero para un caudal de 1 l/s, un pH de 2,7 y unas cantidades totales de Fe, Al, Mn y concentración de sulfatos de 284, 178, 1,51 y 2.618 mg/l respectivamente, y el segundo para un caudal entre 0,4 y 0,5 l/s con un pH de 3,1 y cantidades de Fe, Al, Mn y sulfatos de 148, 47, 1,2 y 1.560 mg/l respectivamente.

En cuanto a los costes de construcción, las cifras varían desde las 7.000 PTA/m² para las ciénagas grandes hasta las 17.000 PTA/m² para las pequeñas (Hiel y Kerins, 1987).

6.6. Tratamientos biológicos

Estos sistemas aprovechan la capacidad de las bacterias, como la «*Desulphovibro desulfuricans*», para reducir en un medio anaerobio los sulfatos que transportan los efluentes produciendo precipitados sulfurosos de los metales disueltos.

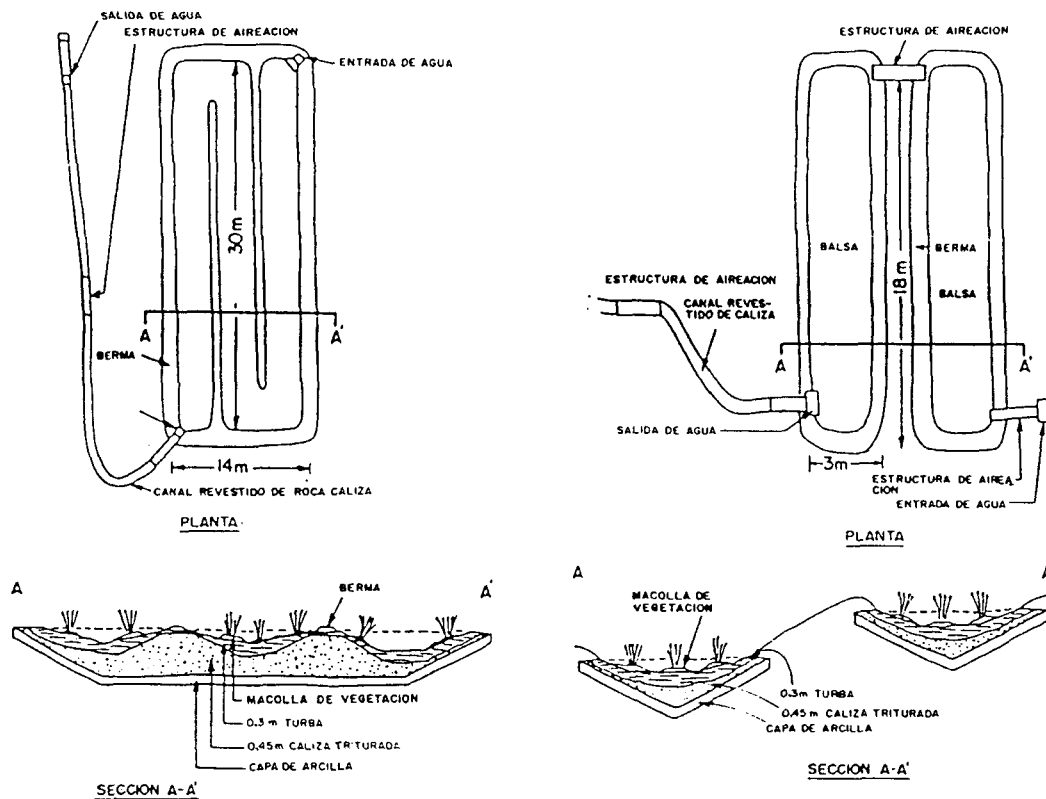


Figura 8.19. Diseños de ciénagas para tratar grandes (a) y pequeños (b) caudales (Hiel y Kerins, 1987).



Foto 8.4. Ciénaga en fase de construcción.

Este tipo de tratamiento se encuentra sólo en fase de experimentación, habiéndose llegado al nivel de planta piloto (Nakamuro, 1988), pero aún plantea inconvenientes que hacen inviable su aplicación a escala industrial.

BIBLIOGRAFIA

- ACKMAN, T. E.: «Sludge Disposal From Acid Mine Drainage Treatment». RI-8762, 1982.
- ACKMAN, T. E. and KLEINMANN L. P.: «In-Line Aeration and Treatment of Acid Mine Drainage». Bureau of Mines, RI-8868, 1984.

- AGUILO, M. et al.: «Guía para la Elaboración del Medio Físico: Contenido y Metodología». CEOTMA, 1984.
- BOE: «Legislación Ambiental». Departamento de Programación. Editorial del BOE, 1988.
- BUREAU OF MINES.: «Control of Acid Mine Drainage-Proceedings of a Technology Transfer Seminar». IC-9027, 1985.
- BUREAU OF MINES.: «Mine Drainage and Surface Mine Reclamation». Volume I: Mine Water and Mine Waste. IC-9183, 1988.
- CHIRONIS, M. P.: «Mine Built Ponds Economically Clear Acid Mine Waster». Coal Age, January 1987.
- FERNANDEZ-RUBIO, R. et al.: «Abandono de Minas. Impacto Hidrogeológico». IGME 1986.
- FERNANDEZ ALLER, R.: «Contaminación de Aguas por Residuos Mineros». II Curso sobre Escombreras y Presas de Residuos. Fundación Gómez-Pardo 1987.
- HERRANZ, F.: «Tratamiento de Aguas en la Explotación Minera de Meirama». III Curso sobre Alteraciones en el Medio Ambiente y La Restauración de Terrenos en Minería a Cielo Abierto. Fundación Gómez-Pardo. Madrid 1986.
- HILL, R. D.: «The Impacts of Coal Mining on Surface Water and Control Measures Therefore». Proceedings of the Second U.S. Polish Symposium. EPA 1979.
- KIM, A. G. et al.: «Acid Mine Drainage: Control and Abatement Research». Bureau of Mines IC-8905, 1982.
- KLEINMANN, L. P. and ERICKSON, P. M.: «Control of Acid Mine Drainage: An Overview of Recent Developments». Innovative Approaches to Mined Land Reclamation, 1986.
- LOPEZ JIMENO, E. y LOPEZ JIMENO, C.: «Control de la Erosión y Contaminación de las Aguas». I Seminario sobre la Restauración de Canteras y Minas a Cielo Abierto. Fundación Gómez-Pardo. Madrid, 1988.
- MARTY, J.: «Automated Plant Cleans Acid Water» Coal Age. May 1981.
- MOEBS, N. N. and CLAR, M. L.: «Feasibility of Water Diversion and Overburden Dewatering». Bureau of Mines. IC-9024, 1985.
- RASTOGI, V. and SOBEK, A. A.: «The Economics of Using Bactericides in Active Mining and in Reclamation to Control Acid Mine Drainage». B. F. Goodrich. 1986.

CONTROL DE LAS VIBRACIONES Y ONDA AEREA PRODUCIDAS POR VOLADURAS

INTRODUCCION

Dentro de una explotación minera, la perforación y voladura ocupa un lugar destacado, no sólo por su peso dentro del coste de operación, sino incluso por su influencia directa en los rendimientos y costes de las otras fases del ciclo: carga, transporte y trituración. Las alteraciones principales que originan las voladuras son: vibraciones, onda aérea y proyecciones de roca. 9.1. Todas ellas pueden, en algunas circunstancias, originar daños potenciales en las estructuras próximas y además ser causa de conflictos permanentes con los habitantes cercanos a la explotación.

Para solventar este problema será necesario una mayor cualificación de los responsables de las voladuras, con el fin de reducir los niveles de las perturbaciones a un coste aceptable. Además, es recomendable, e incluso necesaria, una labor de información y de relaciones públicas por parte de la dirección de la mina, que en algunos casos puede llegar a ser más eficaz que otras líneas de actuación.

En este capítulo se analiza la teoría de generación y propagación de las vibraciones y onda aérea producidas por las voladuras, los criterios de daños existentes en la actualidad y de una manera especial, los parámetros de diseño que debe considerar el especialista para controlar esas alteraciones ambientales.

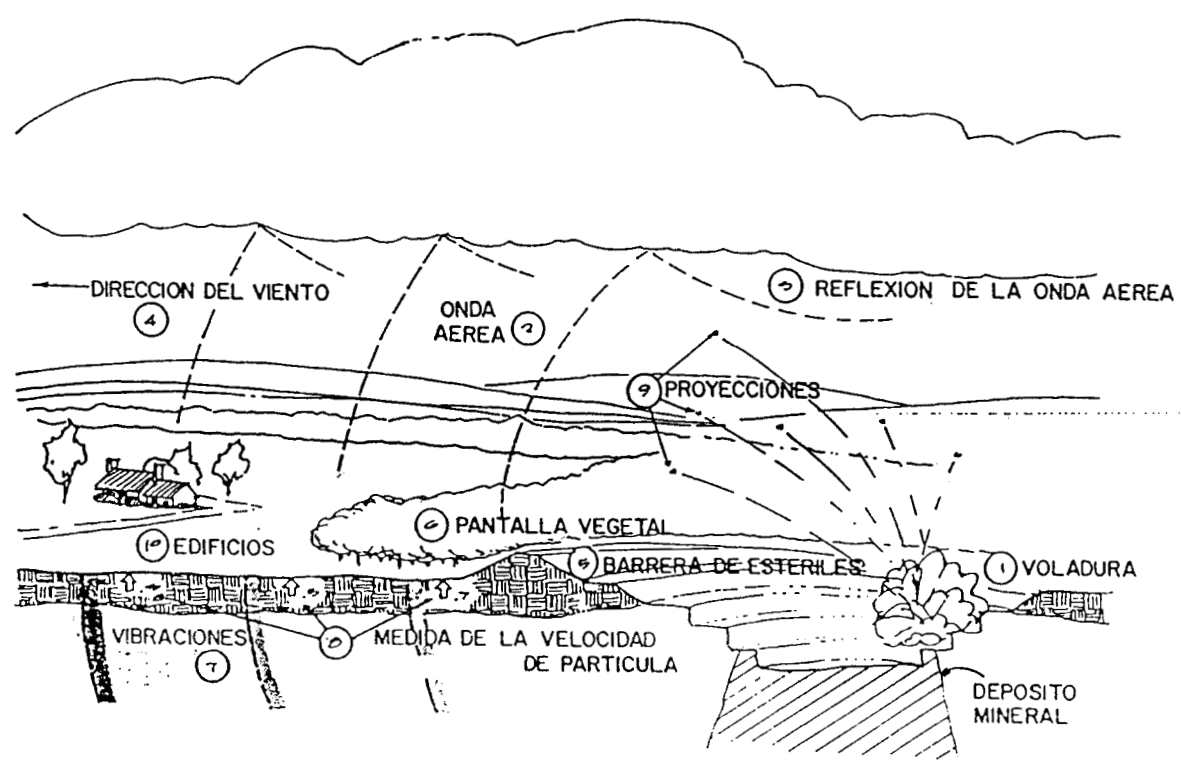


Figura 9.1 Perturbaciones originadas por las voladuras de rocas.



Foto 9.1. Voladura en banco de una mina a cielo abierto.

2. VIBRACIONES DEL TERRENO

2.1. Tipos de perturbación derivadas de las vibraciones

Cuando un explosivo detona dentro de un barreno, se produce una liberación súbita de energía que se propaga radialmente en todas las direcciones, no circunscribiéndose su actuación al volumen de roca que se desea fragmentar.

El fenómeno de propagación de dicha energía es muy complejo y depende de la presión de explosión que genera la carga dentro de los barrenos y de otros factores que intervienen en el proceso de la voladura, tales como las tensiones generadas en el agrietamiento del macizo y la penetración de los gases en las discontinuidades, las propiedades de las rocas, etc. La energía no aprovechada se manifiesta en el entorno como una perturbación en forma de onda elástica amortiguada, cuya intensidad es directamente proporcional a la energía desarrollada en el punto emisor.

Los efectos de las vibraciones pueden clasificarse en tres grupos:

- Molestias a las personas que se encuentren próximas a las voladuras.
- Daños estructurales y arquitectónicos en las edificaciones.
- Inestabilidades en los macizos rocosos.

2.2. Conceptos básicos del movimiento ondulatorio

Los parámetros básicos que intervienen en el estudio de las ondas sísmicas son la velocidad de partícula, la velocidad de propagación de las ondas longitudinales, las tensiones inducidas, la disipación y la dispersión, la frecuencia y la longitud de onda.

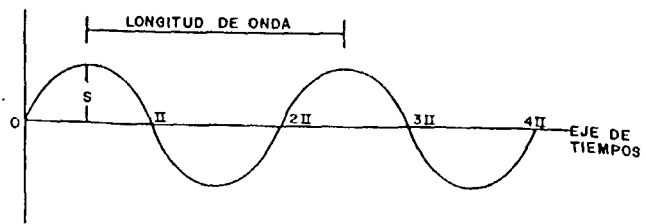


Figura 9.2. Movimiento ondulatorio sinusoidal.

Las fórmulas de cálculo de cada uno de estos parámetros son las siguientes:

$$\text{Velocidad de propagación} = \frac{X}{T}$$

$$\text{Frecuencia} = \frac{\text{n.º de ciclos}}{\text{unidad de tiempo}} \text{ (Hz)}$$

$$\text{Amplitud (S)} = \text{Máximo desplazamiento de la onda}$$

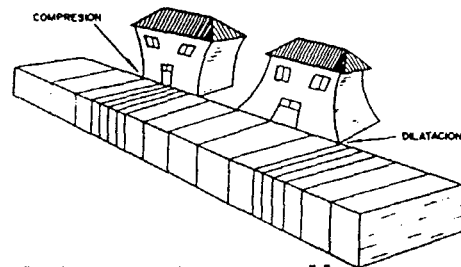
$$\text{Velocidad de partícula} = \frac{\text{Suma de desplazamientos (S)}}{\text{Tiempo}}$$

$$\text{Longitud de onda} = \frac{\text{Distancia}}{\text{Frecuencia}}$$

$$\text{Tensión} = \frac{\text{Velocidad de partícula}}{\text{Velocidad de propagación}}$$

Las ondas sísmicas se clasifican en: ondas internas y ondas superficiales. Las primeras se propagan en el interior del macizo rocoso, existiendo dos tipos: ondas de compresión P y ondas de cizallamiento S. La deformación

EFFECTO DE LA PROPAGACION DE LA ONDA "P"



EFFECTO DE LA PROPAGACION DE LA ONDA "S"

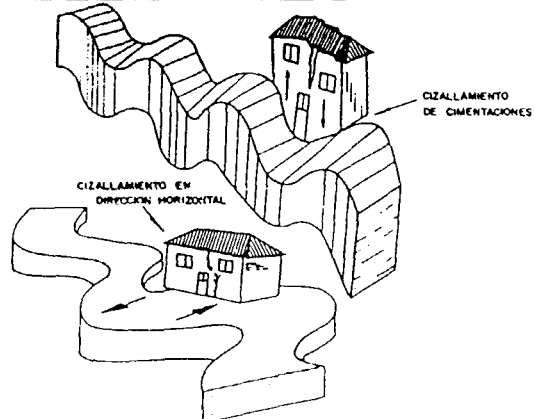


Figura 9.3. Efectos de las ondas P y S sobre un edificio.

La roca puede ocurrir por un cambio de volumen debido a la onda de compresión o por un cambio de forma debido a la onda de cizallamiento.

Las ondas superficiales afectan a un espesor de roca aproximadamente igual a la longitud de onda. Las ondas superficiales son generadas por las ondas internas que no pueden transmitirse en el interior por condicionantes físicos o geométricos. La mayor parte de la energía es transmitida por las ondas superficiales, que además se caracterizan por tener las frecuencias más bajas.

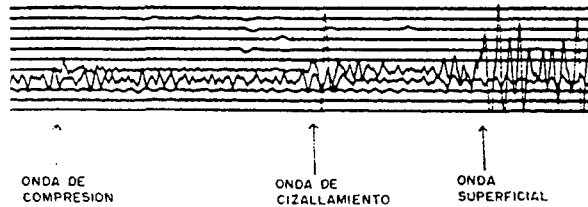


Figura 9.4. Ondas sísmicas.

Como todas las ondas sísmicas presentan una disipación o disminución de la amplitud del desplazamiento con la distancia y las internas presentan incluso una dispersión en la que las componentes de alta frecuencia viajan más rápido que las de baja frecuencia.

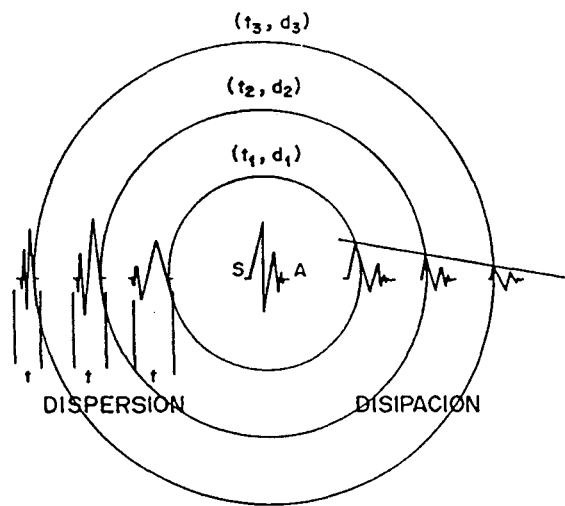


Figura 9.5. Dispersión y disipación de las ondas.

3. La fragmentación de la roca como mecanismo fuente de vibraciones

La fragmentación de la roca por un explosivo incluye: generación de una onda de tensión por la presión del terreno, el desarrollo de un sistema de grietas asociado a la onda de tensión, la extensión y apertura de las grietas por la penetración de gases a alta presión y la liberación y aceleración de la masa rocosa fragmentada a una determinada velocidad.

La apertura de las grietas por la expansión de los gases es el mecanismo que más contribuye a la vibración

del terreno, generando ondas superficiales que no tienen gran dispersión y que se disipan menos que las ondas internas.

2.4. Medida de la energía sísmica y ley de transmisión

La vibración del terreno puede medirse por medio del desplazamiento «S», la velocidad de partícula «v» o la aceleración de partícula «a».

Si el desplazamiento es «S», se tiene

$$v = \frac{dS}{dt}$$

$$a = \frac{dv}{dt}$$

Si «f» es la frecuencia del desplazamiento, la velocidad de partícula y la aceleración, suponiendo un movimiento ideal sinusoidal, vienen dadas por:

$$v = 2\pi f S$$

$$a = 4\pi^2 f^2 S$$

La velocidad de partícula es el parámetro más representativo de las vibraciones y el más utilizado en los estudios de voladuras.

Los dos factores principales que afectan a los niveles de vibración producidos en una voladura son la carga de explosivo y la distancia. Una de las expresiones más empleadas que correlaciona tales parámetros y que permite estudiar la transmisibilidad de esos movimientos sísmicos es la siguiente:

$$v = H \left[\frac{D}{Q^\alpha} \right]^\beta$$

donde:

v = Velocidad de partícula (mm/seg).

D = Distancia de la voladura al punto de medición (m).

Q = Carga máxima por número de detonador (kg).

H, α , β = Constantes empíricas.

La velocidad de partícula en función de la carga sigue una expresión de la forma:

$$v \propto Q^a$$

donde «a», según el U. S. Bureau of Mines; es del orden de 0,8.

La relación entre el nivel de vibraciones y la distancia sigue una expresión de la forma:

$$v \propto \frac{1}{D^b}$$

tomando «b» un valor próximo a 1,6.

La ley resultante es entonces:

$$v \propto \frac{Q^{0.8}}{D^{1.6}}$$

o bien,

$$v = H \frac{Q^{0,8}}{D^{1,6}}$$

que puede expresarse de la forma:

$$v = H \left[\frac{D}{Q^{0,5}} \right]^{-1,6}$$

En realidad «H» y «β» deben determinarse en cada caso mediante la realización de una campaña vibrográfica en la que registrando «v», para distintas cargas y distancias, se ajuste una curva a la nube de puntos obtenidos.

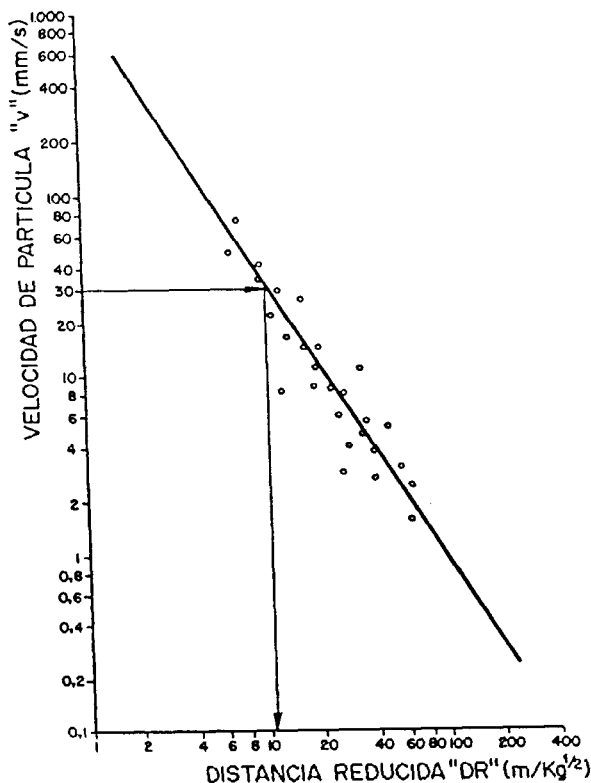


Figura 9.6. Correlación entre la velocidad de partícula y la distancia reducida «D/√Q».

2.5. Instrumentación

Un registrador de vibraciones o sismógrafo consiste básicamente en un sensor y un registrador.

El sensor suele estar constituido por tres unidades independientes colocadas ortogonalmente. El sensor para medir las velocidades de partícula es un transductor electromagnético que transforma el movimiento del terreno en energía eléctrica.

El registrador proporciona un registro visual de la vibración producida por la voladura, de forma que permite su análisis. Se basa en los cambios de voltaje producidos en el sensor, que son calibrados, amplificados y referenciados introduciendo una escala de tiempos.

El registro puede hacerse sobre papel fotográfico o bien en un soporte magnético que posibilita un estudio más detallado con su posterior reproducción.

El registro se denomina sismograma, y puede reflejar las tres componentes del movimiento ondulatorio. Estas son:

- Longitudinal L: mide la componente en la dirección voladura-registro.
- Transversal T: mide la componente perpendicular a la dirección de transmisión de la onda de vibración.
- Vertical V: mide la componente perpendicular al plano de la superficie.

La velocidad de partícula total se obtiene por la combinación de las tres componentes en el vector resultante, usando la fórmula:

$$V_R = \sqrt{V_L^2 + V_T^2 + V_V^2}$$

2.6. Criterios de daños

La elección de criterios o umbrales de prevención de daños de las vibraciones es una de las tareas más delicadas que exige el conocimiento de los mecanismos que intervienen en los fenómenos de las voladuras. Un criterio arriesgado puede llevar a la aparición de daños en estructuras próximas y reclamaciones de sus ocupantes, mientras que un criterio conservador puede dificultar y restringir el desarrollo de la actividad explotadora.

Dentro de los daños que se pueden producir en las edificaciones, se pueden diferenciar tres categorías principales con un número ilimitado de variantes dentro de cada una de ellas:

1. Daños a equipos y material instalado dentro de la estructura. Incluye diversos conceptos tales como daños a componentes electrónicos, daños a ordenadores, etc.
2. Daños arquitectónicos. Esta categoría incluye todos los daños que no afectan a la estructura o que la resistencia de ésta es capaz de soportar. Los tipos de daños más usuales son: rotura de ventanas, agrietamiento de enlucidos y alicatados, daños en paredes o muros que no son de carga y deformaciones en marcos de puertas y ventanas.
3. Daños estructurales. Considera todos los daños que afectan a la integridad de la estructura resistente del edificio. Incluye grietas en cimientos, agrietamientos de pilares, muros de carga, etc. y que pueden haber sido causados y agravados por las citadas vibraciones.

De estas tres categorías, los daños arquitectónicos y estructurales han sido objeto de numerosos estudios, sin embargo los daños a equipos y aparatos instalados no han recibido la adecuada atención.

Todo estudio de vibraciones debe basarse en las siguientes consideraciones:

- Importancia de la construcción, en términos de valor histórico, sensibilidad de los equipos instalados, etc.
- Condiciones y características de construcción del edificio.

- Empleo y funciones del edificio.
- Coste de reparación.
- Repercusión social de quejas y reclamaciones potenciales.

Así pues, en algunos proyectos puede ser posible, desde el punto de vista económico, arriesgarse a unos cos-

tes de reparación de los daños potenciales mejor que imponer unos criterios de prevención fuertemente restrictivos, siempre que exista una garantía absoluta de no producir daños a las personas u otros seres vivos.

En la Fig. 9.7. se resumen los principales criterios de daños publicados por organismos y técnicos especialistas. En España la legislación vigente se recoge en el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera. ITC 10.3-01 (Especificación Técnica 0380-1-85).

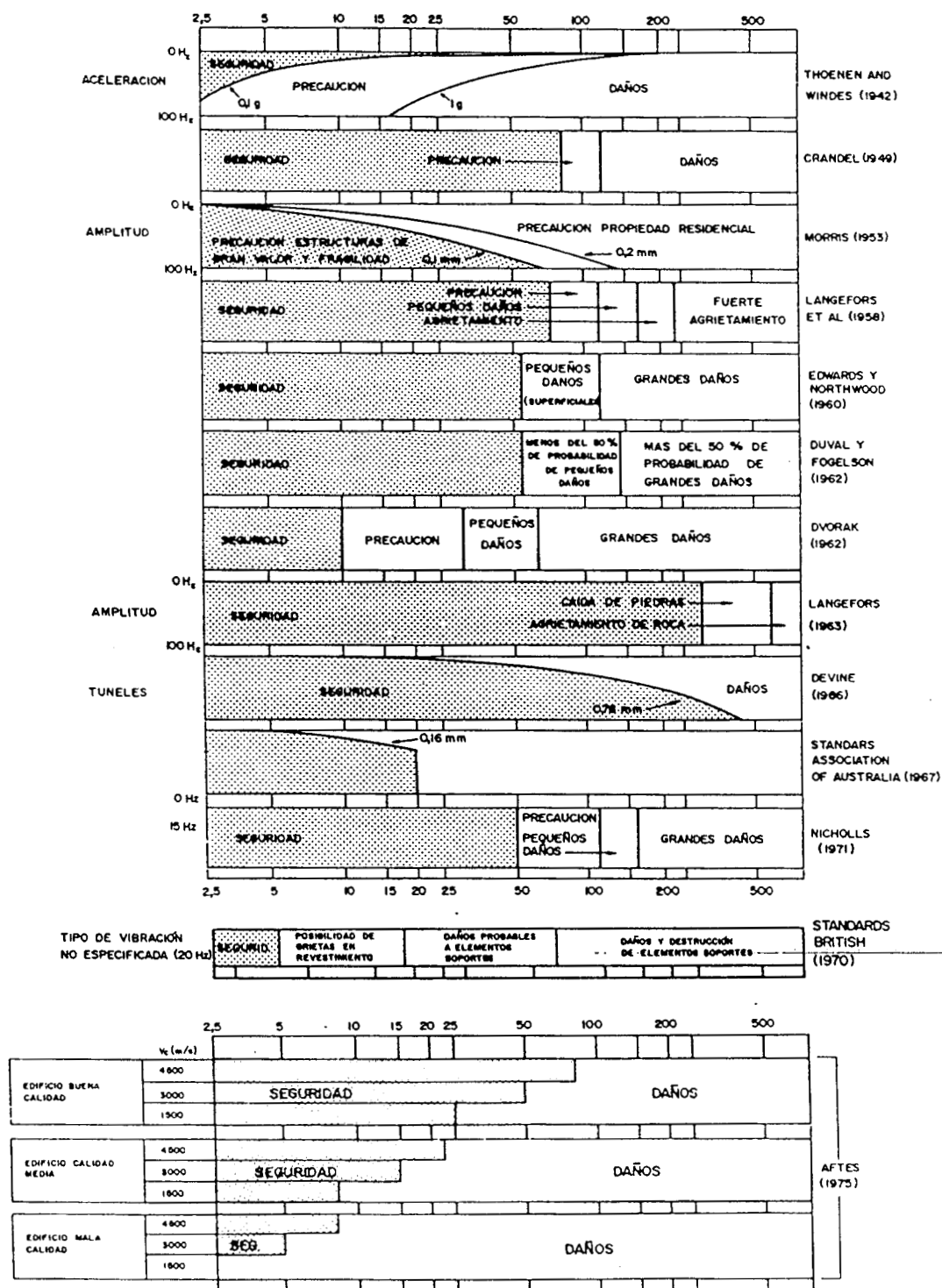
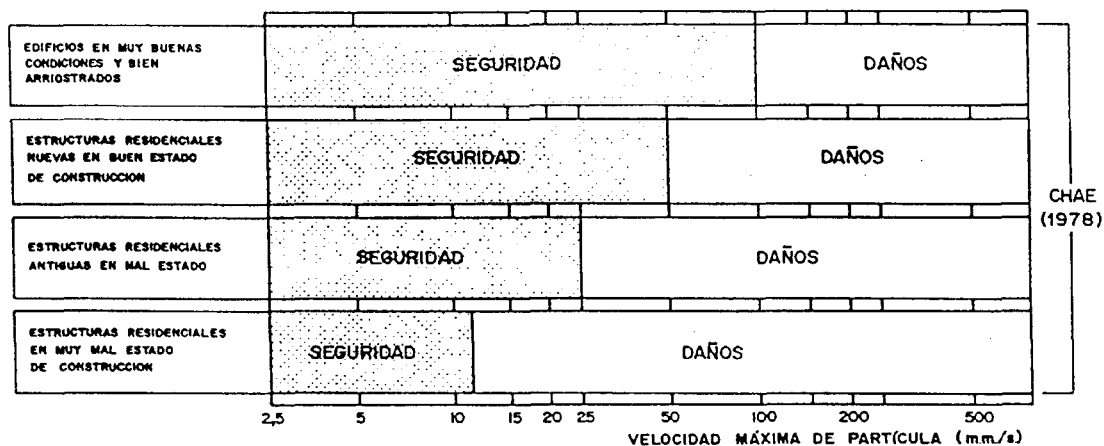
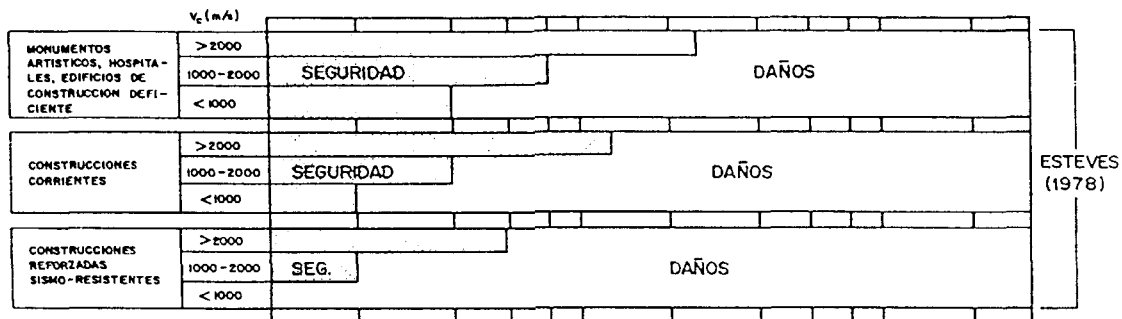
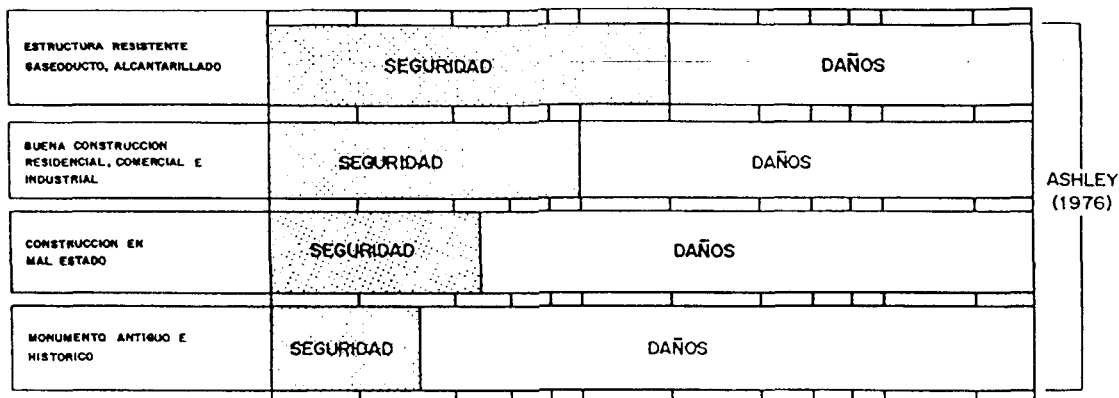
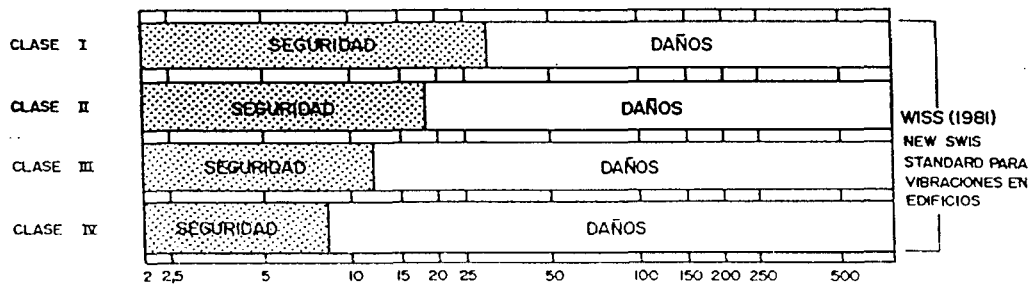


Figura 9.7. Criterios de daños.



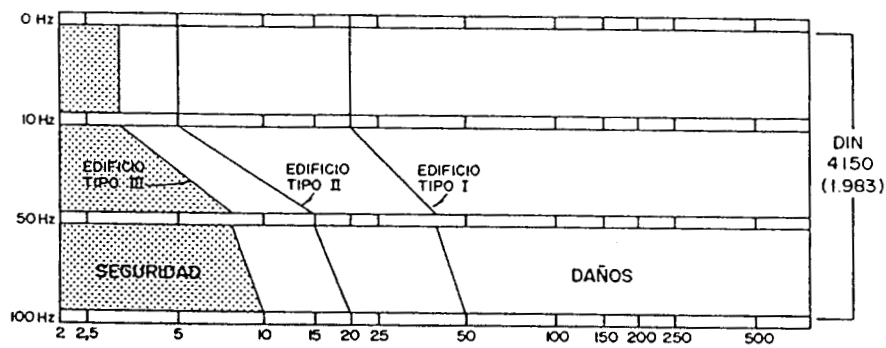
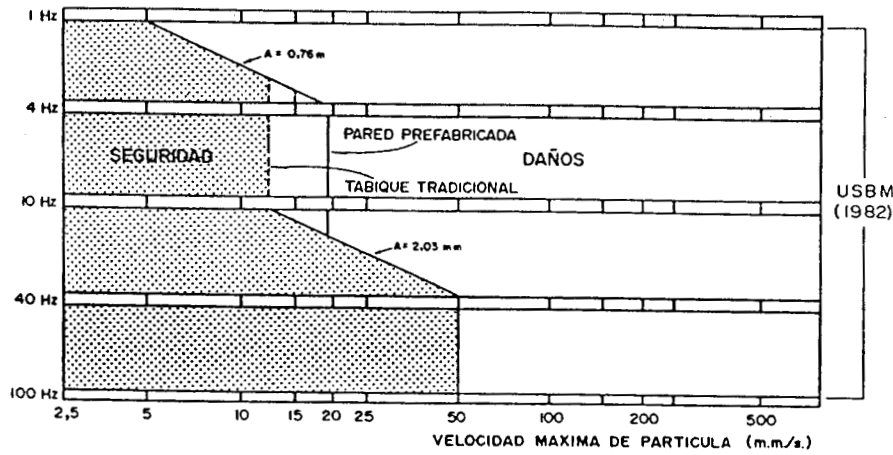
VIBRACIONES (10-60 Hz.)



LEYENDA

- CLASE I : EDIFICIOS METÁLICOS O DE HORMIGÓN ARMADO.
- CLASE II : EDIFICIOS CON MUROS Y PILARES DE HORMIGÓN, PAREDES DE HORMIGÓN O MAMPOSTERÍA.
- CLASE III : EDIFICIOS COMO LOS MENCIONADOS ANTERIORMENTE PERO CON ESTRUCTURA DE MADERA Y PAREDES DE MAMPOSTERÍA.
- CLASE IV : CONSTRUCCIÓN MUY SENSIBLE A LAS VIBRACIONES; OBJETOS DE INTERÉS HISTÓRICO.

Figura 9.7. Criterios de daños (continuación).



NORMA DIN 4150 (v RESULTANTE)

TIPO I : EDIFICIO PUBLICO O INDUSTRIAL.

TIPO II : EDIFICIOS DE VIVIENDAS O ASIMILABLES A VIVIENDAS.
EDIFICIOS CON REVOCOS Y ENLUCIDOS.

TIPO III : EDIFICIOS HISTORICO-ARTISTICOS O QUE POR SU CONSTRUCCION SON SENSIBLES
A LAS VIBRACIONES Y NO ENTRAN EN LOS GRUPOS I Y II.

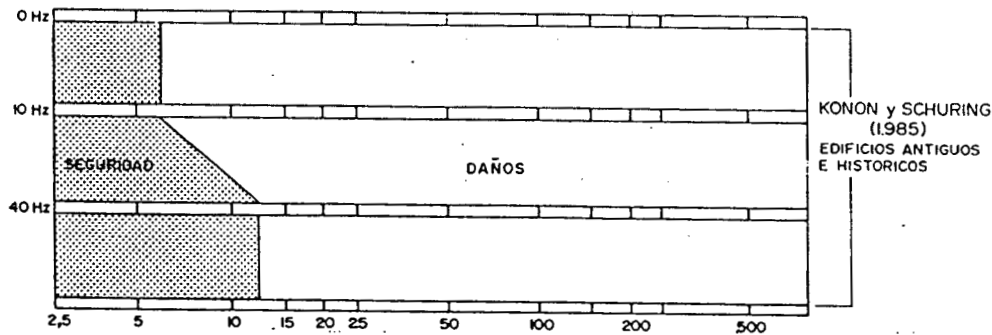


Figura 9.7. Criterios de daños (continuación).

3. CONSIDERACIONES PRACTICAS EN EL DISEÑO DE VOLADURAS

Los parámetros que intervienen en la fragmentación de las rocas se clasifican en cuatro grupos: Propiedades de las rocas, propiedades del explosivo, geometría de las voladuras, y tiempos de retardo y secuencia de iniciación.

El primer grupo no es controlable por el operador, pero sí los otros tres que se analizan a continuación.

3.1. Propiedades del macizo rocoso

En la ley general de amortiguación de las vibraciones, las constantes características «H» y «β» dependen de las propiedades del macizo rocoso en que se produce la voladura, siendo necesario conocer la geología local, el tipo de roca, el espesor y tipo de recubrimiento.

Normalmente los valores de «β» presentan poca variación, pero no así los valores de «H» que pueden tener una gran dispersión.

Las frecuencias de las vibraciones dependen, asimismo, de las propiedades del macizo y del espesor y tipo de recubrimiento. En general, con rocas aflorantes y competentes, se tienen frecuencias altas (20-80 Hz), amplitudes bajas y amortiguación rápida, y en los materiales de recubrimiento se tienen frecuencias bajas (10-20 Hz) y amplitudes elevadas.

3.2. Propiedades del explosivo

Las tensiones inducidas por el paso de la onda de choque en la proximidad de un barreno vienen dadas por la expresión:

$$\sigma_i = PB \left[\frac{r}{DS} \right]^x$$

donde:

PB = Presión del barreno.

r = Radio del barreno.

DS = Distancia del barreno al punto de estudio.

x = Factor de amortiguamiento con un valor próximo a 2.

En la Fig. 9.8. puede verse, para una carga cilíndrica detonada en granito, la correspondencia entre la velocidad de partícula y la tensión inducida, cuya constante de proporcionalidad es la impedancia del medio.

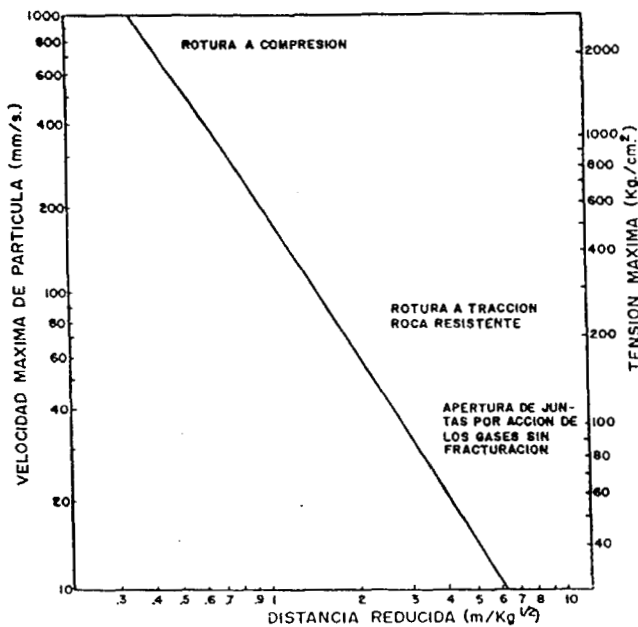


Figura 9.8. Relación entre intensidades de vibración y tensiones inducidas.

Por tanto, los explosivos que generen presiones de barreno más bajas provocarán niveles de vibración inferiores y estos explosivos serán los de baja densidad y baja velocidad de detonación, Tabla 9.1.

TABLA 9.1

TIPO DE EXPLOSIVO	NIVEL RELATIVO DE VIBRACION
ANFO	1
Hidrogeles	2
Hidrogeles aluminizados	2,4

Una vez seleccionado el explosivo, es posible modificar la presión de barreno mediante las siguientes técnicas:

- Adición de materiales inertes y diluyentes al explosivo base a granel.
- Aprovechamiento de la influencia del diámetro de carga sobre la velocidad de detonación.
- Variación de la velocidad de régimen de detonación mediante el sistema de iniciación.
- Desacoplamiento y seccionado de la carga.

3.3. Geometría de la voladura y secuencia de iniciación

A. Diámetro de perforación

El aumento de los equipos de carga permite trabajar con mayores alturas de banco y, por tanto, con unidades de perforación más grandes y altas cargas en los barrenos. Una técnica para obviar este problema consiste en dividir con espaciadores la carga dentro de los barrenos e iniciar cada una de éstas secuencialmente.

B. Piedra y espaciamiento

Si la piedra es tan grande que los gases producidos encuentran dificultades para fragmentar y desplazar la roca, estos gases se verán confinados durante un período de tiempo demasiado grande y la energía de explosión acumulada, al reducir el movimiento de la roca, generará un incremento considerable de los niveles de vibración del terreno.

El esquema adoptado debe permitir una distribución espacial del explosivo adecuada, siendo necesario utilizar el consumo específico correcto, ya que reduciendo éste un 20 % con respecto al óptimo, los niveles de vibración se multiplicarán por 2 y 3, como consecuencia de la falta de energía para desplazar y esponjar la roca.

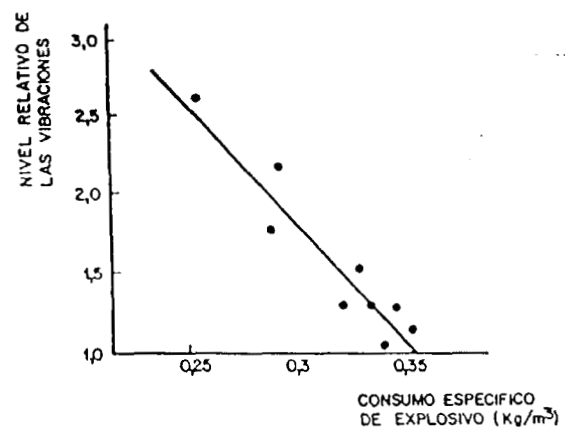


Figura 9.9. Efecto de la disminución del consumo específico sobre el nivel de vibración.

C. Altura de banco

La longitud de las grietas radiales creadas alrededor de los barrenos, para un valor de piedra dado, son proporcionales a la altura del banco «H». La relación óptima entre «H» y «B» es:

$$\frac{H}{B} \geq 3$$

Esta relación se cumple en la mayoría de las canteras y explotaciones de descubierta de carbón. Sin embargo, en la minería metálica la altura de banco puede estar condicionada por una limitación de la dilución.

D. Sobreperforación

En rocas masivas y formaciones estratificadas con fuerte buzamiento, la sobreperforación deber ser 1/3 de la piedra u «8D» en barrenos de gran diámetro. Cuando se utilizan longitudes mayores a las indicadas, cada sección adicional colabora con una energía cada vez menor en el cizallamiento y movimiento de la roca en la base y, por tanto, una parte cada vez mayor de la energía desarrollada por el explosivo se transforma en vibraciones del terreno, además se producen gastos superfluos en perforación y explosivos y se puede llegar a dejar un piso muy irregular.

tiguador. El espaciado consiste en dividir la columna de carga mediante espacios cilíndricos vacíos.

F. Secuencias de encendido y tiempos de retardo

Cuando se disparan voladuras secuenciales con un gran número de barrenos, deben observarse las siguientes recomendaciones:

1. Minimizar el peso del explosivo por unidad de tiempo.
2. Seleccionar un intervalo de retardo entre filas efectivas que permita un buen desplazamiento de la roca.
3. Minimizar el número de barrenos con detonadores instantáneos o del cero, ya que éstos presentan menor dispersión que los números más altos de la serie.
4. Plantear una secuencia de disparo que asegure un frente efectivo lo mayor posible, sobre todo para las últimas filas, y que no presente piedras efectivas demasiado grandes.

Cuando el número de barrenos es reducido, se debe intentar emplear todos los detonadores de la serie y si es necesario disponer de varios detonadores del mismo número, se colocarán en puntos lo más alejados posible. En operaciones donde el diámetro de perforación obli-

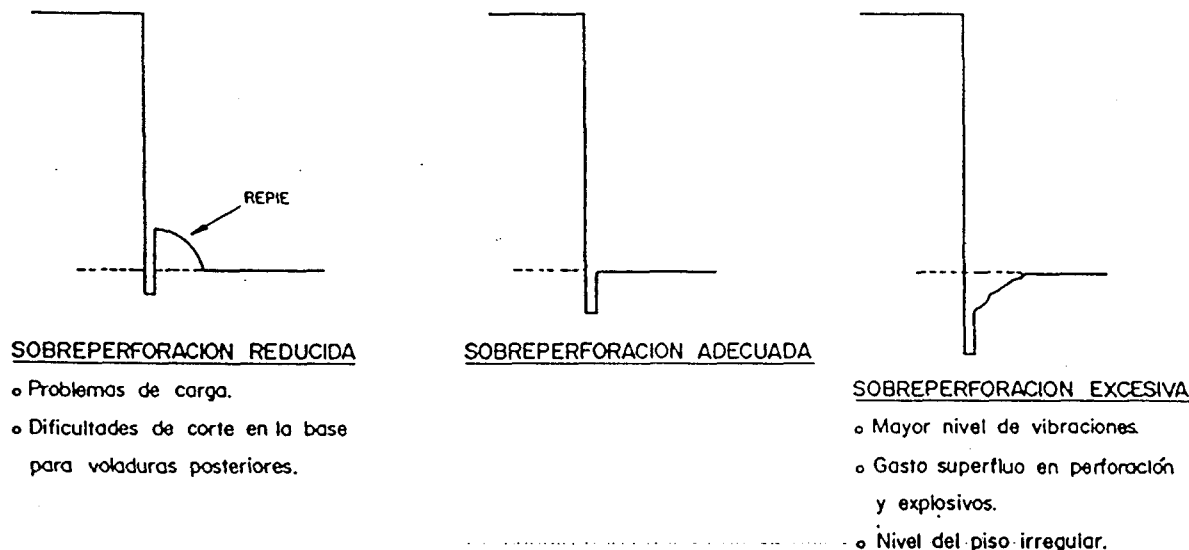


Figura 9.10. Efecto de una sobreperforación inadecuada.

E. Desacoplamiento y espaciado de la carga

Dado que la gama de explosivos disponibles no siempre permite una variación de la curva Presión de Barreno-Tiempo, el desacoplamiento y espaciado de las cargas son técnicas que pueden ayudar a conseguir el perfil más adecuado de ésta.

El desacoplamiento se consigue dejando un hueco anular vacío o con material inerte granular entre la carga y la pared del barreno ejerciendo un papel de colchón o amor-

ga a subdividir la columna de explosivo para que las cargas operantes sean pequeñas, se podrán colocar varios detonadores de distinto número dentro del barreno.

Como las series de detonadores eléctricos permiten gamas de tiempos bastante reducidas, esta limitación se podrá obviar con el empleo de explosores secuenciales o con los relés de microrretardo. Los explosores secuenciales están constituidos por un sistema de descarga por condensador y un equipo electrónico con temporizador para disparar varios circuitos desfasados a distintos intervalos

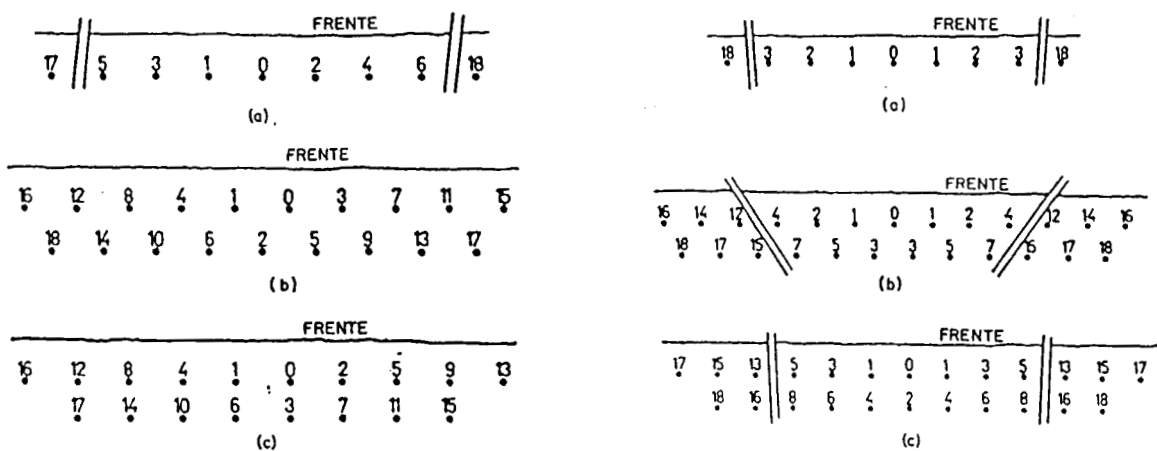


Figura 9.11. Voladuras secuenciadas con detonadores de microrretardo.

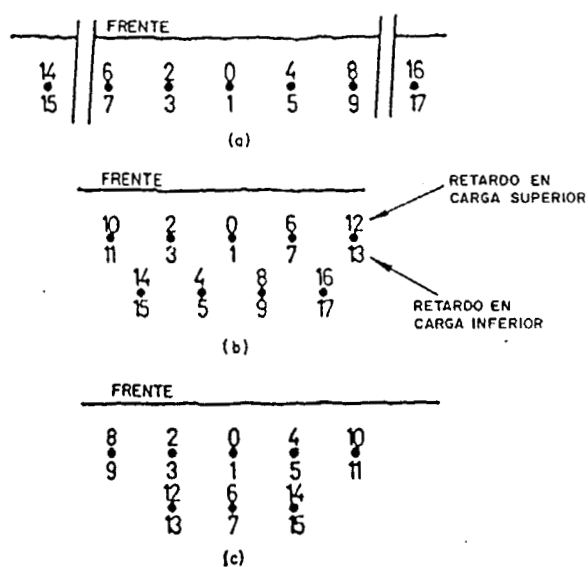


Figura 9.12. Disparo con cargas secuenciadas dentro de los barrenos.

de tiempo. El número de circuitos más común es de 10 y se abarcan intervalos de tiempo desde 5 hasta 999 milisegundos.

En cuanto a los relés que se utilizan combinadamente con cordón detonante, la principal ventaja de este sistema consiste en la posibilidad de conseguir series ilimitadas de intervalos de explosión. Existen accesorios de 15 y 25 ms.

Los relés pueden intercalarse entre barrenos o entre grupos de barrenos, según sean las cargas operantes recomendadas. Para reducir la posibilidad de superposición de ondas, la iniciación se hará en sentido opuesto a la posición de la estructura a proteger o puntos de observación.

Cuando se disparan voladuras de varias filas caben múltiples posibilidades de secuencia de iniciación. En el caso de la Fig. 9.14 se trata de una voladura de 70 barrenos con iniciación simétrica; en el primer diseño la duración de la voladura es «T» segundos, mientras que el segundo es aproximadamente «4T».

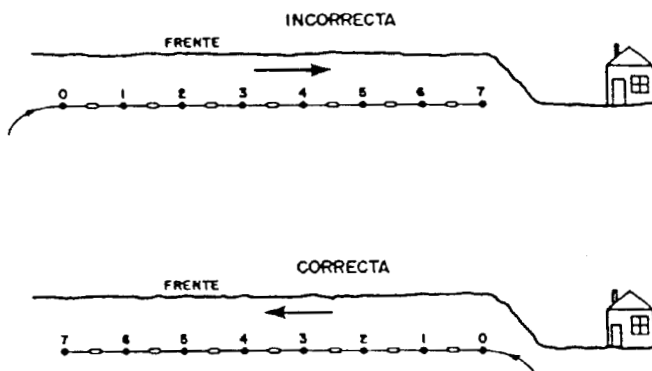


Figura 9.13. Voladuras de una fila con relés de microrretardo.

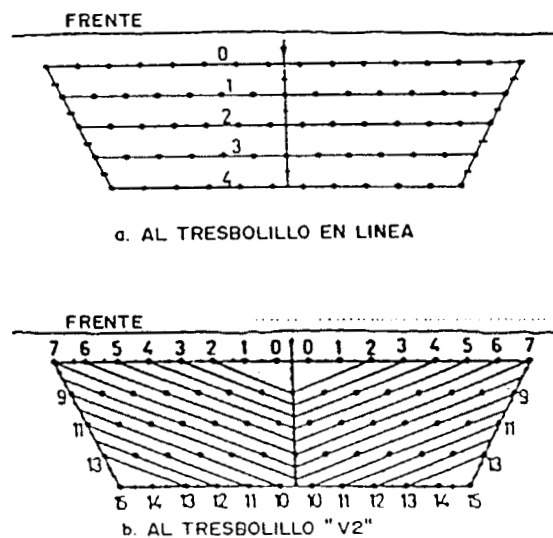


Figura 9.14. Voladuras de varias filas con secuencias de iniciación simétricas.

A pesar de las ventajas del último diseño, es aún más recomendable que la iniciación sea asimétrica, pues se disminuye el número de barrenos que se disparan en el mismo instante y aumenta la duración de la voladura

aproximadamente a «5T». Cuando las condiciones operativas lo permitan, el mejor diseño de la voladura será aquel que presente dos frentes libres.

Por último, en cuanto a los tiempos de retardo entre barrenos y filas deberán elegirse de manera que se evite la superposición de ondas y se favorezca el desplazamiento y fragmentación de la roca. Esto se consigue siguiendo los siguientes criterios:

RB = 7 - 11 ms./m de piedra.

RF = 2 - 3 TRB.

donde:

RB = Tiempo de retardo entre barrenos.

RF = Tiempo de retardo entre filas.

4. Cargas máximas recomendadas cuando no se dispone de instrumentación de registro

En la Tabla 9.II se indican las cargas máximas recomendadas por microrretardo para diferentes distancias a estructuras de calidad media construidas sobre macizos duros.

TABLA 9.II. CARGA MAXIMA POR MICRORRETARDO EN FUNCION DE LA DISTANCIA

DISTANCIA A LA ESTRUCTURA (m)	CARGA MAXIMA POR MICRORRETARDO (kg)
1	0,05
2	0,2
3	0,4
4	0,7
5	0,9
6	1,2
7	1,5
8	1,9
9	2,2
10	2,5
16	4,5
20	7
25	10
30	13
35	17
40	21
45	25
50	30
60	39
70	49
80	60
90	71
100	83
125	116
160	150
175	190
200	240
250	330
300	430
400	670
500	930
1.000	2.640
1.500	4.800
2.000	7.400

Las cifras indicadas en esta tabla se ha comprobado por diferentes experiencias de compañías fabricantes de explosivos que generan niveles aceptables de vibración. Las anomalías geológicas pueden, sin embargo, ocasionar una concentración o una transmisión inadecuada de las vibraciones en el terreno, sobre todo si éste se encuentra saturado de agua. La tabla no debe considerarse como infalible, pero sí orientativa y práctica. Si se quiere establecer un límite enteramente seguro en todas las condiciones posibles, se podrá utilizar la fórmula propuesta por el U. S. Bureau of Mines de Estados Unidos; recomendada cuando no se dispone de instrumentación de registro:

$$Q = (D/31)^2$$

donde:

D = Distancia mínima a la voladura (m)

Q = Carga máxima por microrretardo

Según la expresión anterior, la distancia reducida será igual a $D/\sqrt{Q} = 31 \text{ m/kg}^{1/2}$.

Para una distancia D = 31 m se obtiene un valor $Q = (31/31)^2 = 1 \text{ kg}$. A esa misma distancia en la tabla se recomienda una carga máxima de 13 kg, con lo que puede verse de esta forma cuál sería el Factor de Seguridad probable. Se aconseja que cuando la distancia a las voladuras sean inferiores a 30 m se intente siempre efectuar un registro de las vibraciones.

4. ONDA AEREA

La detonación de una carga de explosivo dentro de un barreno desarrolla una alta presión debido a la expansión de los gases. Una vez que se produce la fracturación de la roca, los gases escapan hacia la atmósfera produciendo una perturbación conocida por onda aérea.

La onda aérea tiene dos componentes: el ruido, que es la parte del espectro comprendido entre 20.000 y 20 Hz y que es percibido por el oído humano, y la vibración restante, que es la parte del espectro comprendido por debajo de 20 Hz y que no es percibido por el oído.

Aunque la onda aérea normalmente disminuye con la distancia, debido a que las altas frecuencias se atenúan más rápidamente, es posible que a distancias apreciables de la voladura, se produzcan vibraciones con ruido mínimo.

El nivel de ruido se mide normalmente en decibelios (dB). También puede medirse como una sobrepresión, es decir, como la presión por encima de la presión atmosférica.

El decibelio se expresa en función de la sobrepresión. (Ver Capítulo 7).

Si las vibraciones terrestres van acompañadas por ruido en las voladuras, en la mayoría de los casos, la apreciación del ser humano es totalmente subjetiva. En la Fig. 9.15 Oriard ilustra este fenómeno y llega a indicar que un observador es tres veces más sensible a las vibraciones acompañadas de ruidos que sin ellos.

Las campañas de toma de datos y las expresiones de transmisibilidad de este fenómeno en el aire son similares a las seguidas en el caso de las vibraciones terrestres.

Las recomendaciones básicas a seguir para mitigar el nivel de la onda aérea son:

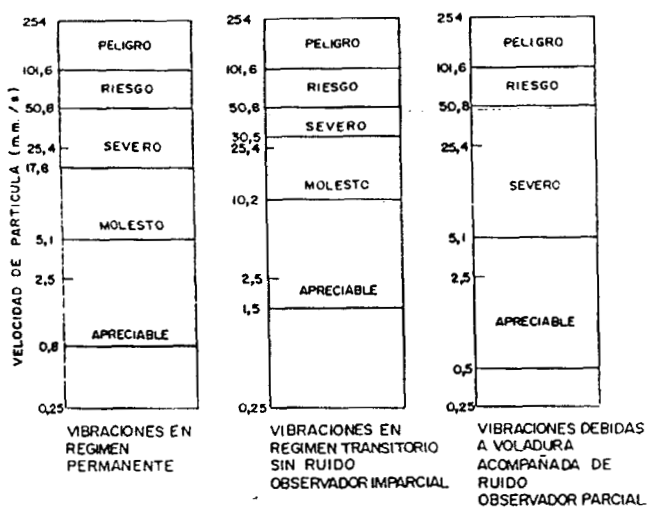


Figura 9.15. Niveles de percepción del ser humano frente a distintos tipos de vibraciones.

- Reducir las longitudes de cordón detonante descubierto o cubrirlo, cuando sea posible, con arena fina con un espesor máximo de 7 a 10 cm.
- Garantizar el confinamiento de las cargas de explosivo dentro de los barrenos con unas longitudes de retacado superiores a 25 veces el diámetro.
- Disminuir las cargas de explosivo por unidad de microrretardo, adoptándose medidas similares a las descritas para vibraciones terrestres.
- Inspeccionar el estado de los frentes antes de proceder a la perforación y efectuar las voladuras para que las cargas de explosivo en los barrenos dispongan de una dimensión de la piedra igual a la proyectada.
- Controlar el ascenso del explosivo a granel dentro de los barrenos en aquellos terrenos con coqueas, a fin de eliminar las concentraciones puntuales.

- Construir pantallas de tierra y vegetales entre el área de las voladuras y los puntos receptores para que la onda aérea se refleje en ellas.
- No disparar las voladuras cuando la dirección del viento coincida con la marcada por la propia pega y el área habitada.
- Seleccionar esquemas geométricos y secuencias de encendido que eviten el reforzamiento de las ondas.
- Elegir los tiempos de retardo de manera que la progresión de la voladura a lo largo del frente se efectúe a una velocidad inferior a la del sonido en el aire (340 m/s).

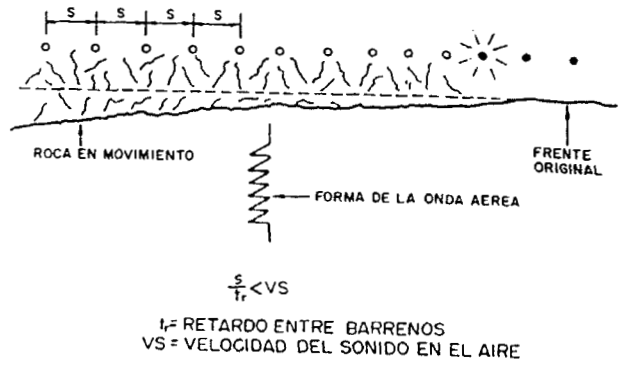


Figura 9.16. Progresión de una voladura a lo largo de un frente y simulación de la onda aérea. (Andrews, A. B.)

4.1. Criterios de daños

Aunque ocasionalmente la onda aérea puede producir daños a la estructura directamente, lo normal es que se manifieste como ruido de ventanas, puertas, vajillas, etc. Siskind y Summers (1974) recomiendan los valores que se indican en la Tabla 9.III.

TABLA 9.III

	LIMITES DEL NIVEL DE RUIDO		
	LINEAL PICO * dB(L)	C-PICO dB(C)	A-PICO dB(A)
NIVEL SEGURO	128	120	95
NIVEL DE PRECAUCION	128 a 136	120 a 130	95 a 115
NIVEL LIMITE	136	130	115

* Recomendado.

Especial atención debe ponerse en la comparación de los niveles de ruido, pues los dB(L) se refieren a una es-

cala logarítmica. Una sobrepresión de 120 dB(L) es un 78,6 % mayor que otra de 115 dB(L). Tabla 9.IV.

TABLA 9.IV

SOBREPRESION		EFECTO PROBABLE
180 dB(L)	20,0 KPa	<ul style="list-style-type: none"> — Daños importantes en estructuras convencionales. — Aparición de grietas en enlucidos. — Rotura de muchos cristales de ventanas. — Rotura de algunos cristales de ventanas. — Probable rotura de grandes cristales de ventanas. — Límite de onda aérea propuesto por el USBM. — Quejas. — < 6 % de la sobrepresión que puede causar la rotura de grandes cristales.
> 170	> 6,3	
170	6,3	
150	0,63	
140	0,2	
136	0,13	
120	0,02	
115	0,0112	

5. PROYECCIONES

Para controlar las proyecciones producidas en las voladuras se deberá proceder cuidadosamente a las siguientes medidas:

- Precisión en el replanteo del esquema de perforación, especialmente en la primera fila de la voladura.
- Control de la profundidad e inclinación de los barrenos una vez perforados.
- Control de la carga de explosivo y su distribución a lo largo del barreno.
- Realización cuidadosa del retacado, midiendo su longitud y empleando el material más idóneo.
- Elección de una buena secuencia de encendido.

BIBLIOGRAFIA

- ANDREWS, A. B.: «Air blast and ground vibration in open pit mining». E.I. DuPont de Nemours Co.
- HAGAN, T. N.: «The design of blasting procedures to ensure acceptable noise airblast and ground vibrations in surface coal

mining». Environmental Control in Coal Mining. November, 1980.

- KERULIS, F. J.: «Control of vibration and noise resulting from surface mine blasting». Minnesota, 1980.
- LINEHAN, P. and, WISS: «Vibration and air blast noise from surface coal mine blasting». Minnesota, 1980.
- LOPEZ JIMENO, C. y LOPEZ JIMENO, E.: «Manual de Perforación y Voladura de Rocas». IGME, 1987.
- LOPEZ JIMENO, E.: «Parámetros críticos en la fragmentación de rocas con explosivos». VI Jornadas Minerometalúrgica. Huelva, 1980.
- LOPEZ JIMENO, E.: «Voladuras de contorno en taludes de minas a cielo abierto». VII Simposio nacional. Obras de superficie en mecánica de rocas. Sociedad Española de Mecánica de Rocas, 1982.
- LOPEZ JIMENO, E.: «Influencia de las propiedades de las rocas y de los macizos rocosos en el diseño y resultado de las voladuras». Tecniterrae, 1982.
- LUNBORG, N.: «Keeping the lid on fly rock in open pit blasting». E/M.J, 1975.
- SISKING, D. E.: «Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting». U.S. Bureau of Mines, R.I. 8507.
- SISKING, D. E.: «Structure response and damage produced by airblast from surface mine blasting». U.S. Bureau of Mines. R.I. 8485.
- WALTER, E. J.: «Blasting Monitoring». Surface Mining Environmental Monitoring and Reclamation Handbook, 1983.

CONTROL DE HUNDIMIENTOS MINEROS

1. INTRODUCCION

La extracción de minerales y rocas de la corteza terrestre por labores subterráneas provoca potencialmente movimientos del terreno y deformaciones de la superficie. Los factores que influyen en los hundimientos son de muy diversa índole:

- La geometría y tipo de yacimiento de mineral. Masivo o estratificado, potente o estrecho, inclinado o tumbado, etc.
- El método minero. Con o sin relleno, recuperación parcial o total, con hundimiento o sin hundimiento, etc.
- La naturaleza del depósito y del recubrimiento de estéril. Características geomecánicas, hidrogeológicas, geológicas y otras propiedades que influyen en el comportamiento del terreno.

En las últimas décadas se han conseguido grandes avances en el campo de la predicción y control de los hundimientos mineros, en base a un mejor conocimiento de las propiedades de los macizos rocosos y a unas técnicas más completas de modelización para el cálculo de las tensiones y deformaciones inducidas.

Desde el punto de vista ambiental, la importancia de los hundimientos está ligada a tres factores principales:

- La extensión de la superficie afectada.
- El uso actual y futuro del terreno en el área afectada, y
- El tipo y magnitud del movimiento del terreno.

La clase de hundimientos que más se ha estudiado son los que se producen en yacimientos estratificados, fundamentalmente de carbón, ya que es en éstos donde el área minada es mayor por tonelada extraída. En depósitos masivos donde el método de extracción implica movimientos del terreno, por lo general, las deformaciones son más importantes y se asume que en la zona superficial afectada no se construirá ninguna instalación y que será abandonada posteriormente. Para estos casos, son pocas las investigaciones realizadas por lo que este capítulo está más orientado hacia depósitos estratificados.

2. METODOS DE PREDICION DE HUNDIMIENTOS

Cuando se explota una o varias capas se produce normalmente una deformación superficial continua que puede medirse en términos de desplazamientos verticales y horizontales. Hasta el momento actual, son varios los métodos empleados para estimar esos desplazamientos, destacando entre todos ellos los métodos empíricos, los teórico-experimentales, los analíticos y los modelos físicos. Para mayor conocimiento se recomienda la lectura de la publicación del IGME titulada «Hundimientos Mineros-Métodos de Cálculo» 1986.

Cuando se extrae una determinada zona de una capa o estrato se observa que los efectos sobre la superficie se manifiestan por: desplazamientos verticales de numerosos puntos de ésta, que se producen normalmente en un área mayor que la explotada, por desplazamientos horizontales que ocurren con magnitudes y direcciones aproximadamente proporcionales a los taludes de los perfiles de hundimiento y por la distribución de desplazamientos verticales y horizontales, que es simétrica con respecto al centro si el área minada tiene una forma geométricamente regular.

En los métodos empíricos existen dos conceptos fundamentales, el primero es que el desplazamiento máximo vertical « $S_{m\acute{a}x}$ », para una excavación particular, viene dado por:

$$S_{m\acute{a}x} = a \cdot m$$

siendo « m » la potencia de la capa y « a » el «Factor de Hundimiento»; el segundo es que el hundimiento total solamente se produce si la superficie minada es lo suficientemente grande con respecto al recubrimiento.

Algunas definiciones importantes son las siguientes:

- **Area crítica.** Es el área de extracción que produce el hundimiento máximo solamente en un punto de la superficie.
- **Area subcrítica.** Es aquella para la cual no se produce ningún hundimiento máximo.
- **Area supercrítica.** Corresponde a unas dimensiones de la excavación con las que el hundimiento máximo se manifiesta en más de un punto.

En la Fig. 10.1 se representa para una explotación en tajo largo, un perfil de hundimiento con las curvas de desplazamientos horizontales, verticales y de tensiones de los puntos de la superficie.

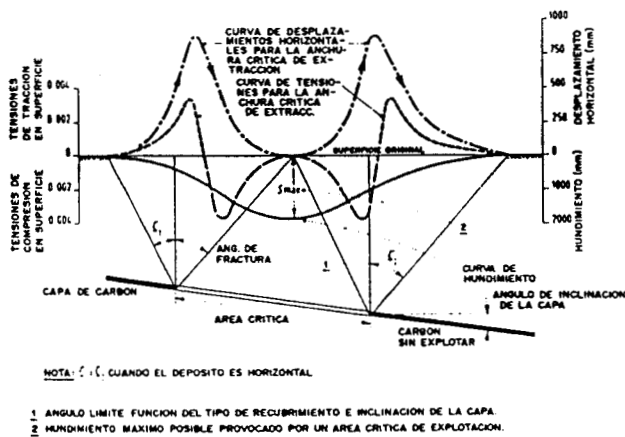


Figura 10.1. Sección típica de un perfil de hundimiento (NCB, 1975).

El ángulo de fractura (ángulo límite ζ) es el ángulo medido entre la vertical, en el extremo del área explotada, y la recta que pasa por este punto y el primero de la superficie sin hundimiento. Estos ángulos dependen de la inclinación de las capas y de la estructura geológica de los macizos rocosos; en minas de carbón suelen variar entre los 25° y 35°.

El hundimiento máximo sobre un área subcrítica depende sobre todo de las dimensiones del área explotada con relación a la profundidad: en la práctica cuando la longitud del panel es al menos 1,4 veces la anchura, se ha

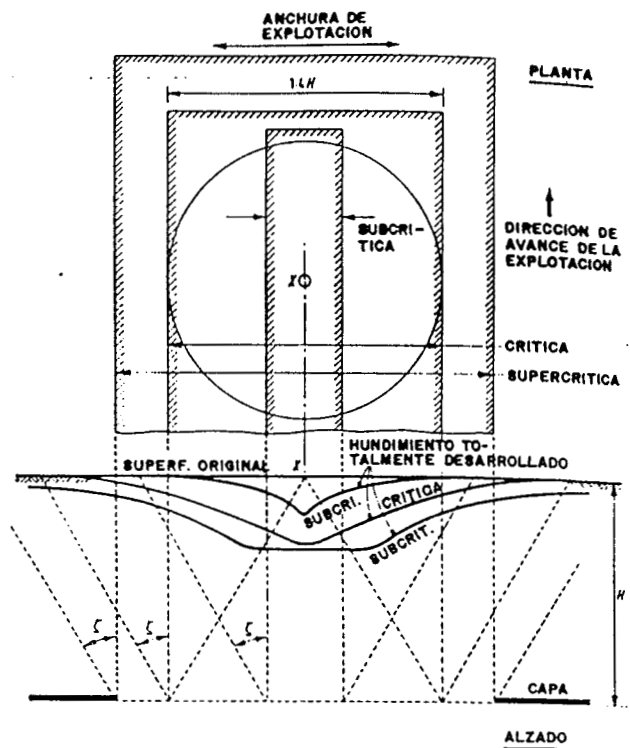


Figura 10.2. Relación entre las formas del hundimiento y las anchuras de explotación (Institution of Civil Engineers, 1977).

comprobado que el modelo bidimensional es adecuado. En estos casos, para anchuras subcríticas, las áreas de extracción tienen la misma relación anchura-profundidad que las que producen los máximos hundimientos, siendo iguales el resto de los parámetros. La Fig. 10.3 muestra un gráfico de la National Coal Board basado en el principio anterior.

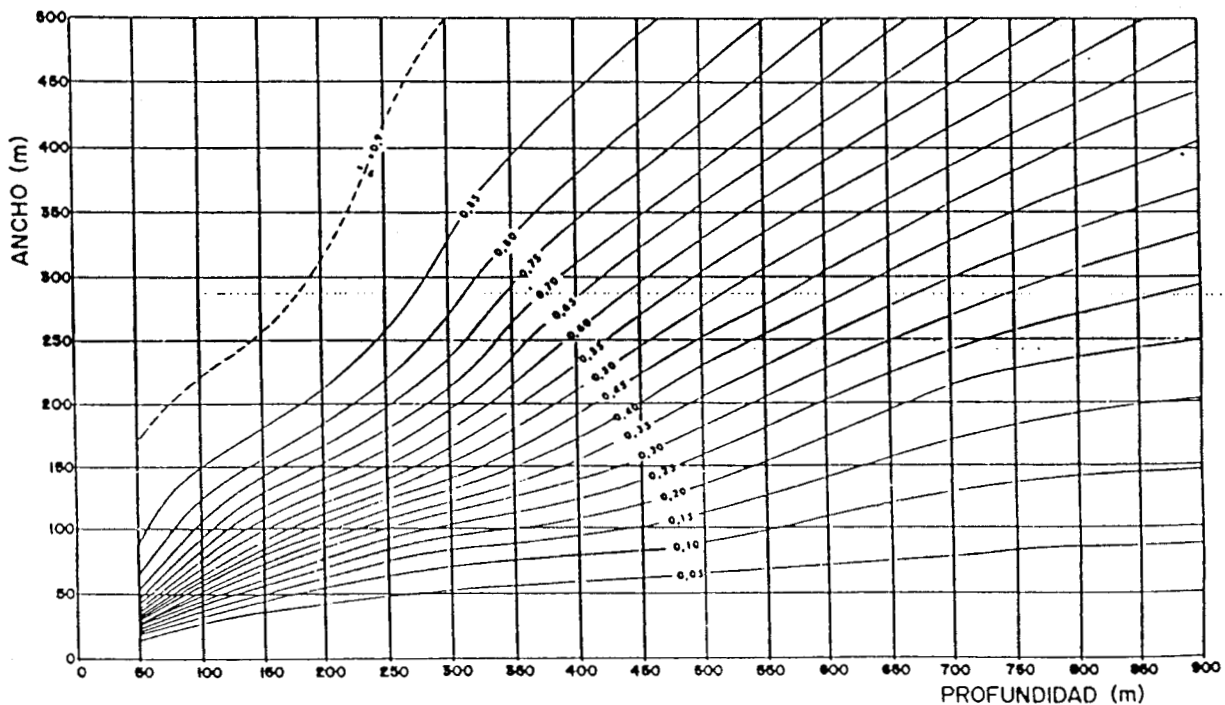


Figura 10.3. Relaciones de los hundimientos con anchuras y profundidades. (NCB, 1975).

Así, cuando un tajo no se desarrolla lo suficiente para causar un hundimiento máximo, es decir, si la longitud del tajo es menor de 1,4 veces la profundidad «H», el hundimiento previsto por el método expuesto debe ser reducido en proporción a la limitación del avance del frente. El gráfico supone que no hay zonas de sostenimiento especial y que la anchura media del panel se utiliza cuando los lados de éste no son paralelos.

El hundimiento máximo posible « $S_{m\acute{a}x}$ » se encuentra para relaciones anchura-profundidad mayores de 1,2, cuando el factor de hundimiento «a» es aproximadamente 0,9 para hundimiento total. Rellenos parciales de los huecos hacen que el valor de «a» se reduzca hasta 0,4 y 0,5.

El tiempo transcurrido hasta que se produce el hundimiento máximo depende de diversos factores, siendo los principales los siguientes:

- El tiempo de extracción del área crítica.
- La naturaleza de los estratos.
- La profundidad del nivel explotado.
- El sistema de sostenimiento empleado y
- La actividad minera anterior.

2.1. Estabilidad superficial en áreas minadas

Las diversas formas de llevar a cabo las explotaciones mineras dan lugar a efectos distintos sobre los estratos que yacen sobre las labores y la superficie del terreno. En particular los minados antiguos situados a menos de 50 m de profundidad pueden tener implicaciones importantes sobre la estabilidad superficial. Excepcionalmente, los trabajos ubicados a más de 150 m de profundidad pueden producir hundimientos, causando daños a las estructuras superficiales. La naturaleza y propiedades de las rocas de recubrimiento tienen una gran influencia sobre los efectos finales en el terreno.

Los pozos y chimeneas abandonadas suelen provocar, cuando colapsan los hastiales o revestimientos, grandes cráteres en la superficie, cuyas dimensiones varían en función del diámetro de dichas labores y de la naturaleza del material de recubrimiento.

En cuanto a las excavaciones subterráneas del tipo de cámaras y pilares, su colapso se produce de manera impredecible. En condiciones límites, el peso de las nuevas construcciones superficiales y el propio deterioro de los pilares pueden afectar a la estabilidad. Cuando se explota más de un nivel Fig. 10.4, el colapso de uno de ellos es probable que provoque la inestabilidad de los otros. Las dimensiones de las áreas hundidas no suelen ser grandes ya que se restringen a las zonas afectadas por un pequeño número de pilares.

Los mecanismos principales de deterioro y colapso de estos trabajos subterráneos son tres:

1. Hinchamiento del piso.
2. Trituración de pilares, y
3. Colapso del techo.

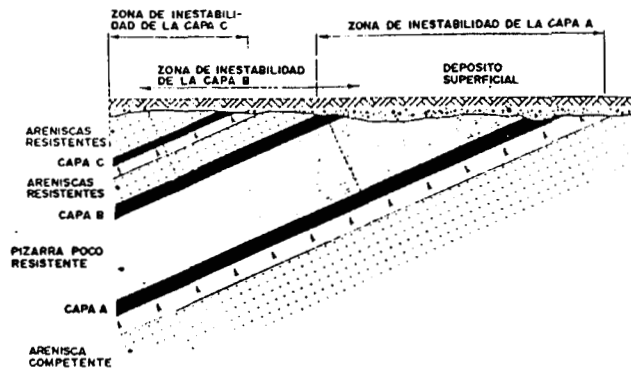


Figura 10.4. Solape de las zonas de inestabilidad superficial con la explotación de yacimientos multicapa.

Cada uno de estos procesos contribuye a rellenar y estabilizar eventualmente los huecos de excavación.

Por lo general, el hinchamiento del piso es el primer sistema de deterioro de los trabajos abandonados, particularmente cuando la presencia de agua es significativa. Los hinchamientos continuos pueden llegar a equilibrar el empuje que los estratos suprayacentes ejercen a través de los pilares, habiéndose observado en algún caso que las propiedades reológicas de las rocas en los yacimientos de carbón eran tales que los huecos acababan por desaparecer por ese fenómeno.

El segundo mecanismo, que es de trituración de los pilares, se produce cuando la concentración de tensiones desarrolladas son tales que causan su rotura por descostamiento, este proceso será tanto más intenso cuanto más diaclasado y meteorizado se encuentre el mineral.

Si en un momento determinado tiene lugar el colapso de un pilar, se producirá una redistribución de las cargas y tensiones, que puede desembocar en la rotura de otros próximos. Estos problemas se ven acentuados en aquellos casos en los que existen minados de diferentes épocas en niveles adyacentes.

La estabilidad de los pilares depende no solamente del tipo de roca y dimensiones del mismo, sino incluso de la profundidad de los trabajos, altura del hueco, resistencia de los materiales de techo y condiciones locales.

En general, cuanto mayor sea la relación anchura/altura de un pilar mayor será la capacidad de resistencia del mismo. Orchard sugiere como una primera aproximación pilares con una relación anchura/profundidad de la capa superior a 0,1.

La existencia del agua subterránea acelera en muchos casos el deterioro de los pilares.

El tercer mecanismo de rotura, que es el más importante en yacimientos superficiales, supone la desintegración y deformación de los materiales del techo, y representa el mayor problema en la práctica actual. Los estratos que descansan sobre los minados pueden continuar adaptándose muchos años después de cesar la actividad minera.

Se han postulado una gran variedad de formas geométricas de colapso, entre las que se incluye la rectangular, la prismática triangular y la cónica. Fig. 5.10.

Las discontinuidades de los estratos de techo afectan a su comportamiento y a las formas de colapso que se producen. Fig. 10.6.

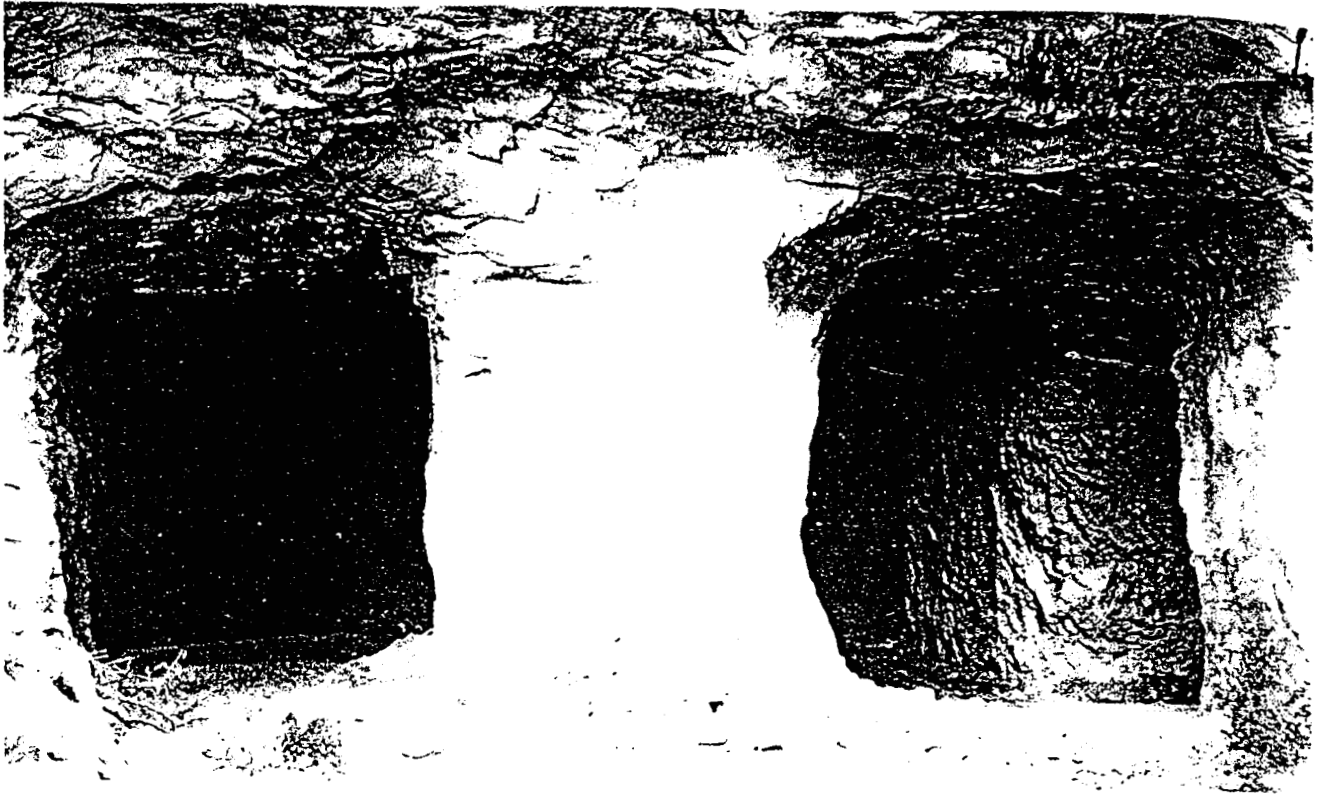


Foto 10.1. Acceso a una explotación de mármol subterránea.

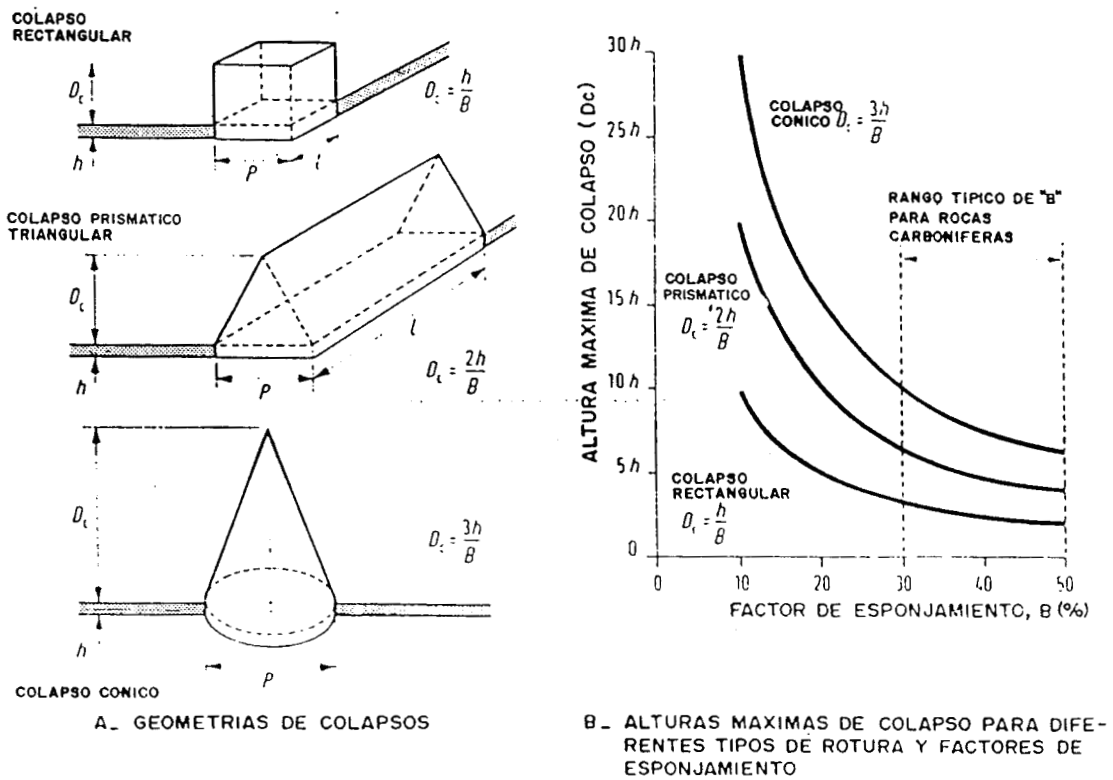
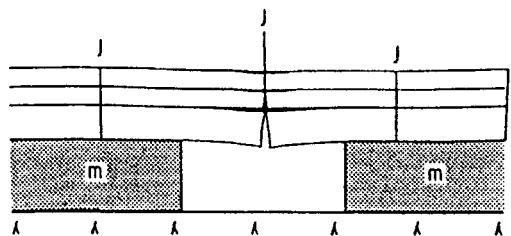
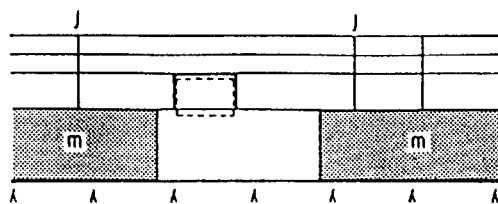


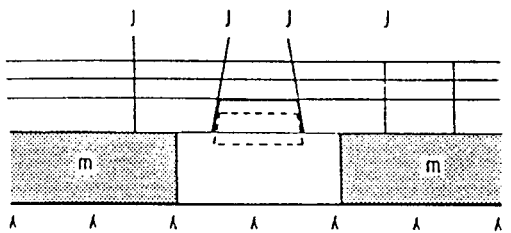
Figura 10.5. Tipo de colapso y magnitudes de migración de los huecos. (Piggott, R. J., 1977)



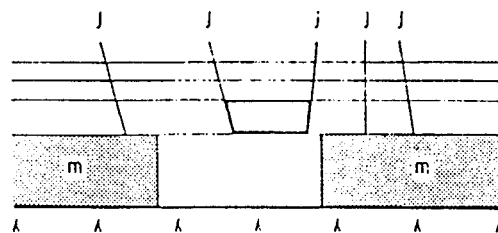
FLEXION Y SEPARACION DE ESTRATOS POR EXISTENCIA DE UNA JUNTA CENTRAL



CAIDA DE BLOQUE FORMADO POR DOS JUNTAS Y FRENADO SOLO POR LA FRICCIÓN DE LOS LADOS



CAIDA DE BLOQUE FORMADO POR JUNTAS DIVERGENTES



SOSTENIMIENTO NATURAL DE BLOQUE FORMADO POR DOS JUNTAS CONVERGENTES

Figura 10.6. Efecto de las discontinuidades sobre la estabilidad de los huecos mineros. (Price, D. G., 1968)

A lo largo de las discontinuidades se puede producir una separación de los estratos sin llegar a su rotura, lo que denotaría una deformación elástica o plástica de dichas formaciones hacia los huecos. Si por el contrario, esas deformaciones avanzan y llegan a la rotura de la roca tendrá lugar una caída de los materiales de techo en el hueco y una migración del hueco residual hacia la superficie. El factor de esponjamiento es un parámetro clave en estos mecanismos, así como la existencia de paquetes de estratos resistentes encima de los minados que pueden llegar a impedir la propagación del fenómeno. Las chimeneas de hundimiento no suelen producirse cuando las la-

bres se encuentran a más de 70 m, ya que a partir de esas profundidades lo que se manifiesta en superficie es un hundimiento general.

Un sistema muy simple de estimación del hundimiento del terreno es el que se basa en la teoría del prisma. Thorburn y Reid proponen evaluar dicho movimiento «S», a partir de la potencia de la capa explotada «h», espesor del recubrimiento de estéril «R» y porosidad «n» del material colapsado.

$$S = 2h - R \frac{n}{1-n}$$

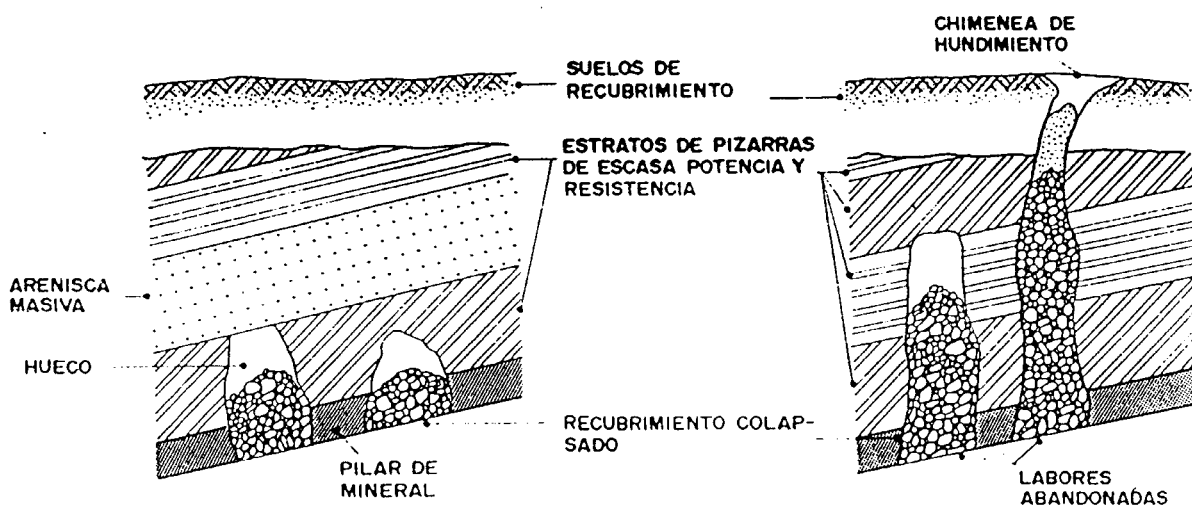


Figura 10.7. Formas de migración de huecos.

La relación anterior supone que los pilares no sufren un proceso de destrucción y se considera sólo un elemento prismático de estratos con los lados verticales. La representación gráfica de la expresión anterior es la que se refleja en la Fig. 10.8.

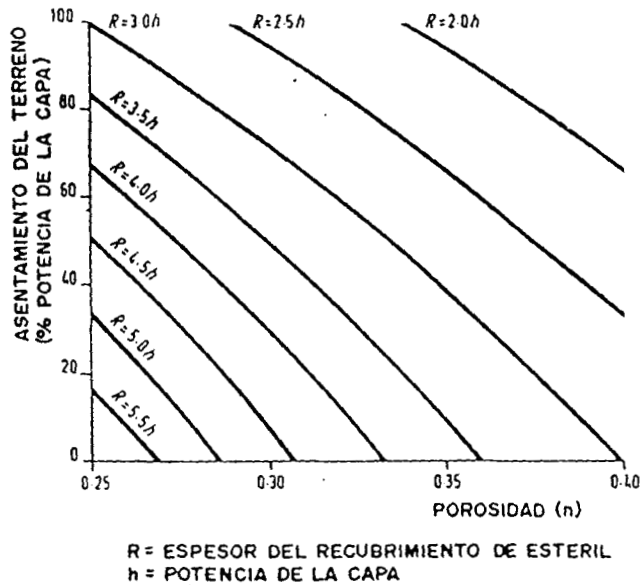


Figura 10.8. Estimación del movimiento del terreno usando la teoría del prisma.

Por último, cuando el método minero empleado es el del tajo largo los movimientos del terreno que resultan no son normalmente tan catastróficos y los edificios y estructuras pueden diseñarse para irse acomodando a los asentamientos esperados por trabajos futuros. Los métodos de predicción en este tipo de minería han sido bien estudiados y permiten obtener evaluaciones con una alta precisión. Se recomienda pues la consulta de algunas de las publicaciones específicas sobre dicho tema.

3. DAÑOS PRODUCIDOS POR HUNDIMIENTOS

Los movimientos del terreno asociados a los trabajos mineros y que ocasionan daños a los edificios construidos en superficie son del tipo diferencial.

Los límites de distorsión angular, «β», para las estructuras de edificios y muros de carga reforzados sometidos a asentamientos diferenciales del suelo se muestran en la Tabla 10.I. La distorsión angular comprende a la rota-

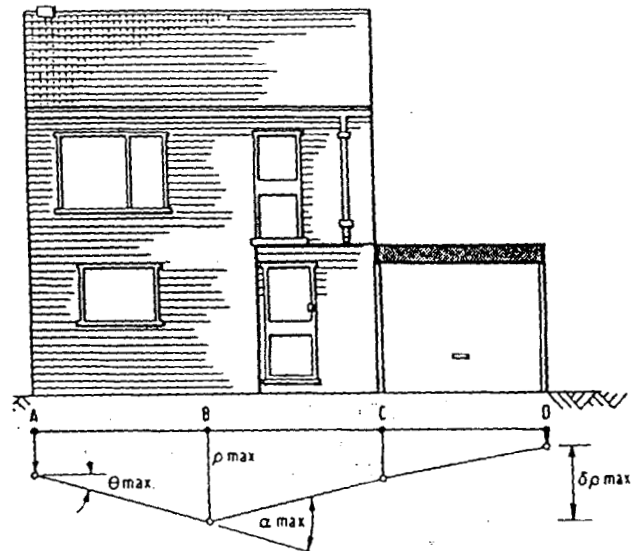
TABLA 10.I. VALORES LIMITES DE LA ROTACION RELATIVA (DISTORSION ANGULAR) PARA ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS Y MUROS DE CARGA ARMADOS (Tomlinson, 1980)

ESTADO	SKEMPTON Y MACDONALD	MEYERHOF	POLSHIN Y TOKAR	BJERRUM
Daños estructurales	1/150	1/250	1/200	1/150
Agrietamiento en paredes y roturas	1/300 (pero 1/500 recomendado)	1/500	1/500	1/500

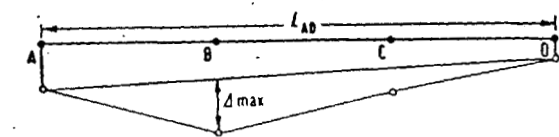
ción de la línea recta que une dos puntos de referencia relativos al inclinarse una estructura. Fig. 10.9. Los valores límites de los ratios de flexión $\Delta : L$ de los muros de carga no reforzados se recogen en la Tabla 10.II « Δ » es la máxima flexión relativa entre dos puntos de referencia situados a una distancia «L», de la unidad estructural que se considera.

TABLA 10.II. VALORES LIMITE DEL RATIO DE FLEXION A PARTIR DE LOS CUALES SE PRODUCE AGRIETAMIENTO EN MUROS DE CARGA NO REFORZADOS (Tomlinson, 1980)

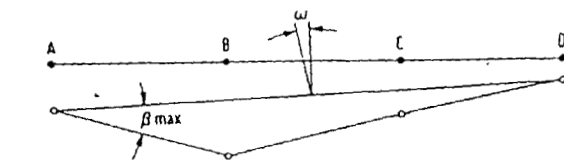
ESTADO	MEYERHOF	POLSHIN Y TOKAR	BURLAND Y WROTH (depende de L/H)
Desplome	$0,4 \times 10^{-3}$	$0,3$ a $0,4 \times 10^{-3}$	$0,4 \times 10^{-3}$; L/H = 1 $0,8 \times 10^{-3}$; L/H = 5
Arqueo	—	—	$0,2 \times 10^{-3}$; L/H = 1 $0,4 \times 10^{-3}$; L/H = 5



A. DEFINICIONES DE ASENTAMIENTO ρ , ASENTAMIENTO RELATIVO $\delta\rho$, ROTACION θ Y TENSION ANGULAR α



B. DEFINICIONES DE FLEXION RELATIVA Δ Y RATIO DE FLEXION Δ/L



C. DEFINICIONES DE INCLINACION ω Y ROTACION RELATIVA (DISTORSION ANGULAR) β

Figura 10.9. Definiciones de los movimientos que pueden sufrir las cimentaciones de un edificio. (Burland, J. B., 1975)

Los efectos de los desplazamientos del terreno pueden ser desastrosos si las estructuras no poseen suficiente resistencia y rigidez. Así, las construcciones tradicionales de poca altura y muros portantes de ladrillos, soportados por cimientos de hormigón no reforzados, son dañadas rápidamente por la subsidencia local y las deformaciones de tales edificios se producen conforme al perfil de desplazamientos.

En la Tabla 10.III se recogen los cinco grados de daños provocados por hundimientos, de acuerdo a la clasificación propuesta por la National Coal Board. Complementariamente, la Fig. 10.10 relaciona las deformaciones

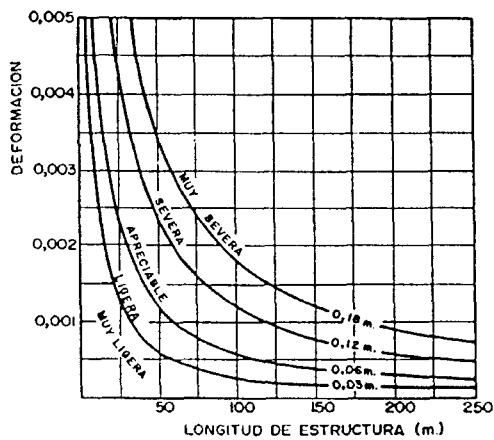


Figura 10.10. Relación de los daños con las deformaciones y longitudes de las estructuras (NCB, 1975).

con las dimensiones de las estructuras para diferentes intensidades de daños.

4. TECNICAS DE LOCALIZACION DE LABORES SUBTERRANEAS

Durante la etapa de investigación geológico-minera pueden llevarse a cabo trabajos de exploración del subsuelo mediante métodos directos e indirectos. Estos últimos son los más adecuados inicialmente, cuando no se conoce la localización exacta de los minados, y además resultan más económicos. Los métodos directos deben aplicarse para confirmar los resultados conseguidos en las primeras investigaciones y, sobre todo, para obtener información complementaria sobre parámetros que pueden afectar al diseño y a la construcción de estructuras previstas sobre los terrenos bajo los que se encuentran las labores subterráneas.

4.1. Métodos indirectos

Se basan en la utilización de técnicas geofísicas y geoquímicas que permiten detectar anomalías que pueden estar relacionadas con la existencia de huecos. En algunas situaciones estos métodos no son aplicables y por lo general requieren la participación de especialistas para la planificación y supervisión de los trabajos, así como la interpretación de los resultados.

TABLA 10.III. CLASIFICACION DE LA NATIONAL COAL BOARD (1975) DE DAÑOS POR HUNDIMIENTOS

VARIACION EN LA LONGITUD DE LA ESTRUCTURA (m)	CLASE DE DAÑOS	DESCRIPCION DE DAÑOS TÍPICOS
Menos de 0,03	1. Muy ligeros o despreciables	Fisuras muy finas en la escayola. Posibles grietas pequeñas y aisladas en el edificio, no visibles por fuera.
0,03-0,06	2. Ligeros.	Varias grietas pequeñas visibles dentro del edificio. Las puertas y ventanas pueden trabarse ligeramente. Probablemente sean necesarias reparaciones en la ornamentación.
0,06-0,12	3. Apreciables.	Ligero agrietamiento visible en el exterior del edificio (o una grieta principal). Puertas y ventanas se traban; las tuberías de servicios pueden agrietarse.
0,12-0,18	4. Severos	Tuberías de servicios rotas. Grietas abiertas requiriendo recomposición y comunicando la estructura con el ambiente exterior. Marcos de puertas y ventanas deformados; suelos sensiblemente desnivelados; paredes sensiblemente inclinadas o abombadas. Cierta pérdida de portancia en las vigas. Si hay daños por compresión, solape de las juntas de techo y levantamiento de la obra de ladrillo con grietas horizontales abiertas.
Más de 0,18	5. Muy severos.	Como el caso anterior, pero peor, y requiriendo reconstrucción parcial o total. Las vigas de techo y suelo pierden la portancia y precisan apuntalarse. Rotura de ventanas con deformación. Fuertes inclinaciones en los suelos. Si hay daños por compresión, fuerte combamiento y abombamiento de techo y paredes.

4.1.1. METODOS GEOFISICOS

Estos métodos son inadecuados para detectar excavaciones a una profundidad mayor de 1 a 1,5 veces las dimensiones de las mismas. Tampoco son aplicables cuando existen en las proximidades líneas eléctricas o vías de comunicación que puedan causar interferencias.

Antes de aplicar tales métodos, debe recopilarse toda la información existente de tipo geológico y minero, que facilite la demarcación de la zona explotada y el probable contraste físico con el terreno circundante. Siempre que sea posible, se recomienda aplicar conjuntamente dos métodos geofísicos, con el fin de cubrir un amplio rango de variaciones en el área y desechar anomalías extrañas.

Los principales métodos geofísicos son:

1. **Resistividad eléctrica.** Utiliza la diferencia de resistencias eléctricas o conductividades entre un suelo o roca y otros medios. La resolución es mala cuando el diámetro o la anchura de la anomalía es menor que la profundidad a la que se encuentra bajo el terreno. Este método es por esto adecuado sólo para detectar pozos o chimeneas. La existencia de calicatas o zanjas en superficie hacen impracticable la utilización de este sistema.
2. **Método magnético.** Detecta las variaciones de intensidad en los campos geomagnéticos o en uno de sus vectores componentes. Las variaciones son provocadas por el contraste en la magnetización del terreno y sobre todo de la presencia de materiales ferromagnéticos como la magnetita. La existencia de restos metálicos, tuberías, carriles, cuadros de sostenimiento, etc., pueden dar señales de anomalías y llegar a enmascarar las producidas por los minados, en tales situaciones el método no es aplicable.
3. **Método electromagnético.** Mide la respuesta del terreno cuando se aplica un campo magnético variable. Es muy útil para registrar las variaciones en la conductividad de suelos, y sólo se ha aplicado de forma efectiva la detección de minados en yacimientos estratiformes horizontales.
4. **Métodos gravimétricos.** Puede aplicarse cuando los materiales que constituyen el terreno presentan diferentes densidades. Las zonas minadas, aunque estén rellenas, pueden llegar a detectarse claramente por microgravimetría de alta precisión, Fig. 10.11. Presenta otra ventaja que es la de poder aplicarse a zonas urbanas.
5. **Métodos sísmicos.** Se registran las velocidades de propagación de las ondas sísmicas a través del terreno. Estas velocidades dependen de las constantes elásticas de los materiales atravesados, que lógicamente se ven afectadas por la existencia de huecos, hundimientos, agua, etc. Los métodos en uso son la sísmica de refracción y la de reflexión, pero es éste último el que se aplica a la localización de áreas explotadas. El avance logrado en los últimos años en la técnica de reflexión de alta resolución ha permitido detectar con éxito, sobre todo en depósitos sedimentarios, la existencia de minados.
6. **Método radar.** Se imparten al terreno impulsos de alta frecuencia y se registran con un sensor. Esta técnica

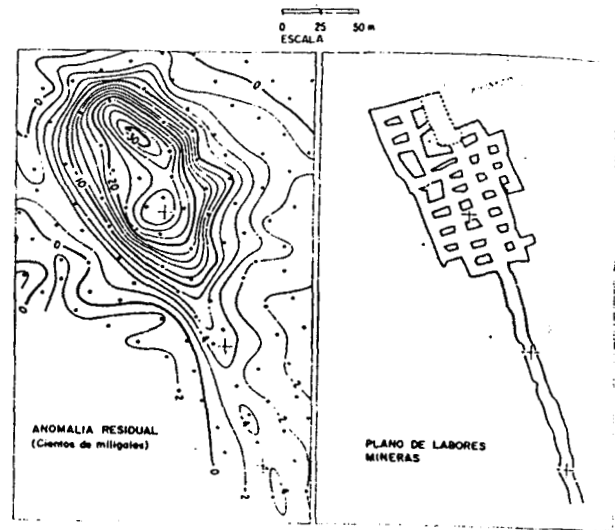


Figura 10.11. Ejemplo de anomalía registrada por microgravimetría (Clement).

nica puede ser usada cuando las labores son superficiales y se encuentran por encima del nivel freático. Aún se encuentra en fase de desarrollo.

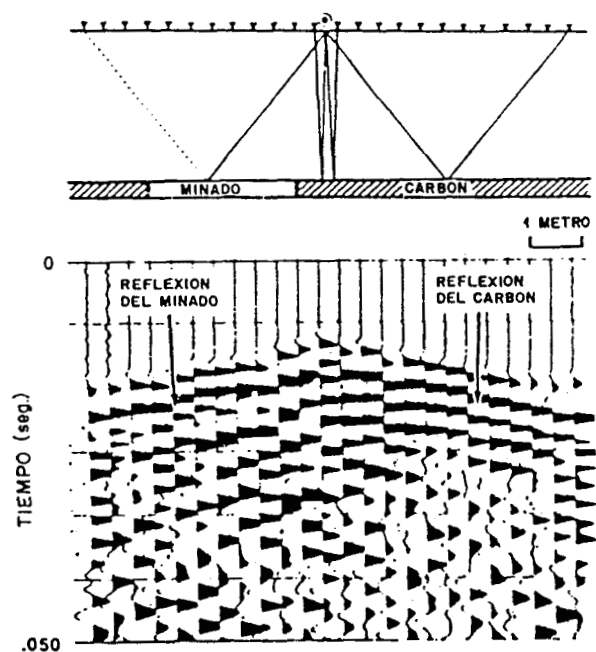


Figura 10.12. Ejemplo de detección de minados con sísmica de reflexión. (Branham, K. L., et al., 1988)

4.1.2. METODOS GEOQUIMICOS

Se utilizan para detectar cambios químicos en el suelo o la atmósfera que pueden ser asociados con los trabajos mineros. Un método efectivo en los yacimientos de carbón explotados es la detección del metano.

Normalmente, anomalías entre 10 y 100 ppm (0,001 y 0,01 %) indican la presencia de minados o labores de infraestructura (una mezcla del 3 % de metano y aire es

combustible y entre el 5 y el 15 % de metano pasa a ser explosiva).

4.2. Métodos directos

La investigación minera se planifica para obtener información precisa y completa de las condiciones del terreno, y para evaluar donde se han llevado a cabo los trabajos de explotación, la ubicación de pozos y galerías, el método minero, el porcentaje de extracción y la estabilidad de los macizos residuales. Los métodos aplicados son los clásicos de las investigaciones geológicas y geotécnicas que se realizan *in situ*, así como los ensayos de laboratorio. El método elegido dependerá de la uniformidad geológica del yacimiento explotado y de las dimensiones y complejidad del área minada.

Inicialmente, la investigación estará planteada para obtener un conocimiento aproximado del estado de consolidación de los trabajos. Si las condiciones del terreno son distintas a las previstas se revisarán periódicamente las etapas y tareas planificadas.

4.2.1. CALICATAS Y EXCAVACIONES PILOTO

Constituyen un método rápido y barato de examen de los materiales más superficiales. Alcanzan unas profundidades no superiores a los 8 ó 10 m y la información que suministran se centra en el grado de fracturación y consolidación de las rocas bajo efecto de los hundimientos, localización de labores muy superficiales y características geomecánicas.

4.2.2. POZOS DE INVESTIGACION

Se realizan para llevar a cabo investigaciones en profundidad. Deben entibarse convenientemente, así como prever las necesidades de desagüe.

Con el fin de obtener el máximo de información estas labores se ubicarán cuidadosamente. Un examen detallado del estado de los macizos puede aportar datos sobre la subsidencia e información de los huecos y, complementariamente, sobre otras áreas a las que puede accederse desde los niveles más profundos de los pozos.

Los pozos se usan raramente, debido al tiempo que se precisa para la excavación, coste de los mismos y medidas de seguridad que deben cumplirse.

4.2.3. SONDEOS Y BARRENOS

Estos sistemas son iguales a los que se aplican en la investigación geológica. El espaciamiento varía considerablemente en función de la complejidad geológica, dificultad de interpretación y ubicación de las labores mineras, etc. El espaciamiento debe ser irregular con el fin de evitar el solape geométrico con los pilares existentes.

La profundidad de los barrenos dependerá de las condiciones del terreno y desarrollo de los trabajos de explotación. Littlejohn sugiere, cuando se van a construir edificios sobre el terreno minado, llegar a profundidades de más de 60 m. Por otro lado, si la estratificación buza con

un determinado ángulo los sondeos se realizarán inclinados.

La información registrada comenzará desde la propia perforación, anotando las velocidades de penetración, las necesidades de entubación, tipos de bocas empleadas, etc. Los principales datos geotécnicos que se obtendrán serán: descripción detallada de la litología, índices de fracturación, niveles piezométricos, extensión de los huecos, etc., y mediante la obtención de muestras y probetas se podrán evaluar las propiedades geomecánicas de las rocas y calidad de las aguas subterráneas.

Si existe un relleno de recubrimiento, los barrenos verticales constituyen un método eficaz para la localización de los pozos antiguos, frente al de las zanjas o calicatas superficiales. En la Fig. 10.13 se representa un esquema de investigación en espiral para la localización de un pozo de ciertas dimensiones.

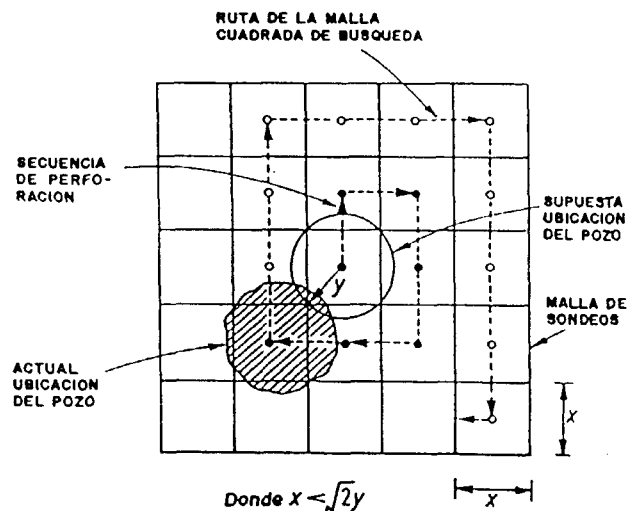


Figura 10.13. Esquema y secuencia de perforación para la localización de un pozo.

5. CONTROL Y CONSOLIDACION DE HUECOS MINEROS POCO PROFUNDOS. ABANDONO DE LABORES SUBTERRANEAS

Cuando los terrenos superficiales bajo los cuales se hallan los minados van a destinarse a un uso que exige unas garantías de estabilidad se deberá proceder a la consolidación de los huecos y macizos afectados, así como a la clausura de todos los accesos.

Los objetivos que persiguen los tratamientos de consolidación son básicamente dos: mejorar las características portantes de los terrenos y reducir el riesgo de migración de los huecos.

Si durante la explotación no se ha procedido al relleno de los huecos, en la mayoría de los casos, los antiguos minados son inaccesibles, por lo que la consolidación debe efectuarse mediante inyección, a través de barrenos perforados.

El método de consolidación elegido dependerá de la naturaleza de los estratos y de las condiciones subterráneas si la migración de los huecos ha sido interrumpida en su ascenso por la presencia de algún estrato potente. La con-

solidación consistirá en el bombeo de grandes cantidades de material utilizando una malla de barrenos muy espaciada. Al contrario se procederá si los estratos son de poca potencia, como suele suceder con las pizarras, que se ven muy afectadas por el colapso de los huecos.

Los trabajos de consolidación deben cubrir tres etapas básicas, que son:

- 1.º Exploración del área mediante perforaciones y preparación del lugar.
- 2.º Programa de relleno y cementación.
- 3.º Control de la efectividad del relleno.

La extensión del área a consolidar dependerá de la naturaleza y condiciones del depósito superficial, así como de la influencia del agua subterránea. Se han sugerido algunas reglas empíricas entre las que caben destacar las siguientes: en macizos rocosos donde los niveles explotados son horizontales se utilizarán unos ángulos de fractura de 15 a 20° con respecto a la vertical; en recubrimientos saturados o terrenos sin consolidar se recomienda un ángulo de $(90^\circ - \varnothing/2)$, donde « \varnothing » es el ángulo de rozamiento interno. Para yacimientos inclinados, se aconseja incrementar los ángulos anteriores en 5° por cada 10° de inclinación del nivel mineralizado.

La profundidad a la que la consolidación es económicamente viable depende de la altura a la que los huecos pueden migrar y la intensidad potencial de subsidencia. Muchos tratamientos se llevan a cabo en profundidades que no superan los 20 m y rara vez se alcanza los 50 m.

5.1. Minados abiertos

Los minados abiertos cerca de la superficie se presentan cuando los materiales de techo son competentes, por ejemplo bancos de areniscas que yacen sobre capas de carbón.

Cuando los huecos de excavación están interconectados es preciso crear una barrera alrededor del perímetro del área que se pretende recuperar con el fin de proceder a su consolidación. Esa barrera deberá tener forma de «U» en aquellos casos donde existan macizos de protección, como sucede en yacimientos inclinados con los macizos de afloramiento.

Las barreras perimetrales se forman generalmente perforando barrenos alineados con un espaciado entre sí de 1,5 a 3 m. El diámetro de esos barrenos es de 75 a 100 mm, o incluso mayores si se desea introducir grava. En el tramo de suelos hasta llegar a roca sana se necesitará entubación.

A través de esos barrenos se inyectará una mezcla viscosa de cemento, cenizas volantes, arena y grava para conseguir la interconexión de los conos. Una vez que éstos se hayan formado se interrumpirá el flujo de materiales para evitar el hundimiento de los conos. Un método alternativo consiste en introducir primero grava y arena para formar el cono y después una lechada de cemento. Para reducir la circulación y pérdida de esa lechada a través de la grava puede añadirse bentonita para ayudar a estabilizar e incrementar el ángulo de reposo de los conos, que normalmente oscila entre los 35° y los 45°. Una vez endurecido ese material se procede a rellenar el hueco de

los barrenos con una mezcla más fluida de cemento, arena y cenizas volantes a través de un tubo dejado a tal fin.

En algunas ocasiones los conos de las barreras se han formado con inyecciones sucesivas de lechada de cemento o áridos finos, formando capas más tendidas que se dejan endurecer hasta la inyección siguiente.

Una vez creada la barrera perimetral se procede a la consolidación de un área, perforando una malla de barrenos con un espaciado adecuado entre 3 y 6 m. Esta malla se cerrará si la pendiente de material de relleno es grande o si se atraviesan zonas colapsadas, llegando a esquemas de 1,5 ó 2,5 m. Los barrenos se perforarán preferiblemente al trespelillo para reducir la probabilidad de coincidencia con los esquemas de minados. El relleno se hace por filas comenzando por la parte más profunda de la estructura minada con dirección hacia el afloramiento y con no más de dos barrenos adyacentes al mismo tiempo.

Los tubos de relleno pueden ser flexibles o rígidos y se descienden hasta la base de los taladros para asegurarse que el material alcanza el lugar adecuado. En la cabeza de la entubación es posible colocar un elemento de cierre y disponer de una válvula para medida de la presión.

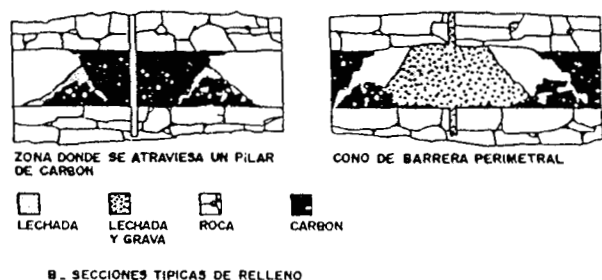
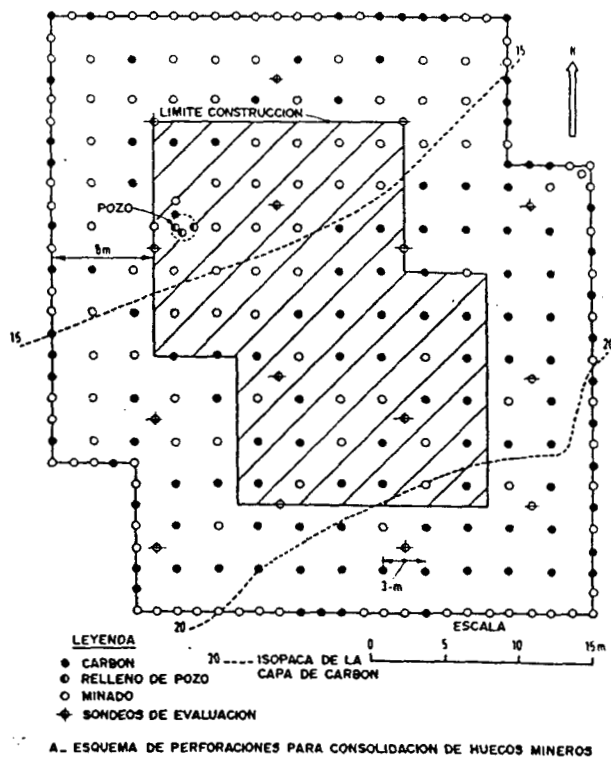


Figura 10.14. Construcción de barreras perimetrales para consolidación posterior. (Littlejohn, G. S.)

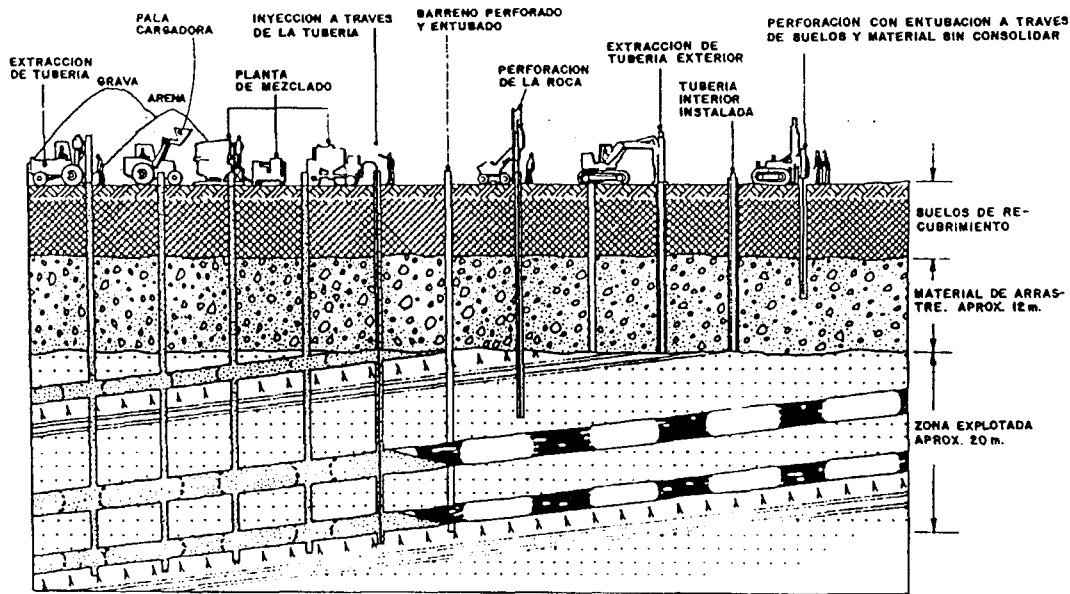


Figura 10.15. Secuencia de operaciones para la consolidación de los huecos en una mina de carbón. (Patey, D. R., 1977)

La lechada de cenizas volantes o arena y cemento que se introduce se prepara normalmente con unas proporciones de esos materiales que varían de 12:1 a 20:1. A veces, se añaden otros áridos más gruesos. La inyección se realiza hasta que la lechada emerge por el extremo de los barrenos o hasta que se alcanza la presión prevista. Para minados superficiales se recomiendan presiones bajas, del orden de 12 KN/m² por m de recubrimiento, hasta un máximo de 200 KN/m², ya que de lo contrario podrá producirse una fracturación hidráulica de los terrenos y el riesgo de colapso de los materiales del techo.

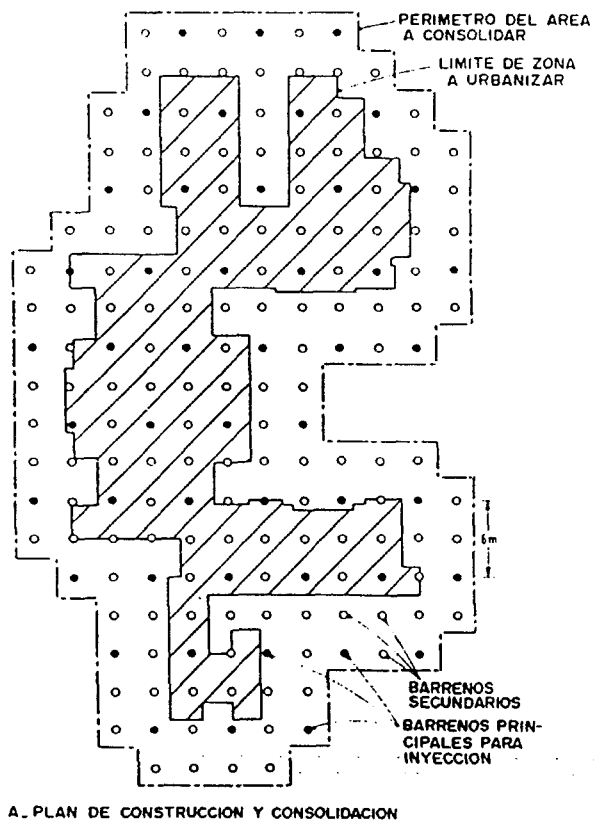
En la Fig. 10.15 se muestra la secuencia de operaciones seguida en la consolidación de los huecos de una mina de carbón.

Siempre que sea posible los barrenos serán inyectados de forma continua. Si las presiones límites no se alcanzan después de introducir una gran cantidad de mezcla, se abandonará durante 24 h para proceder después a un nuevo tratamiento. Puede ser aconsejable el empleo de acelerantes para reducir los tiempos de endurecimiento. Si tras varios tratamientos los resultados son insatisfactorios se reducirá el espaciamiento entre barrenos en esas áreas.

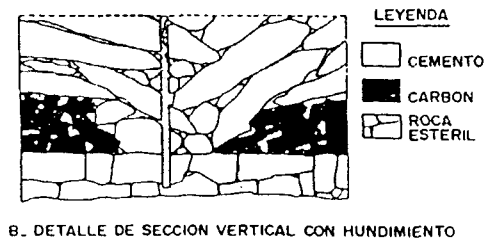
Cuando el volumen de los huecos intersectados es aparentemente grande pueden estos corresponder a cámaras de producción o a galerías de acceso, y en caso contrario a zonas hundidas o próximas a pilares. Esta información puede utilizarse para elaborar esquemas de las labores mineras.

5.2. Minados hundidos

Cuando las labores antiguas se encuentran colapsadas, los huecos, por lo general, no se encuentran interconectados. En tales situaciones no es preciso crear una barrera perimetral y el tratamiento debe comenzar por los barrenos maestros o principales, esto es los que distan entre líneas unos 6 m. Fig. 10.16. Si se precisara, se perforarían los barrenos secundarios distantes unos 3 m, según una malla cuadrada.



A. PLAN DE CONSTRUCCIÓN Y CONSOLIDACION



B. DETALLE DE SECCION VERTICAL CON HUNDIMIENTO

Figura 10.16. Esquema de consolidación en labores mineras hundidas. (Littlejohn, G. S.)

En aquellas situaciones en las que los hundimientos han originado una intensa fracturación del macizo y apertura de las discontinuidades preexistentes el tratamiento consistirá en la inyección de una lechada de cemento a través de barrenos, que se perforarán verticales o inclinados con el fin de cortar al mayor número de grietas. Esas lechadas de cemento pueden prepararse sólo con ese componente o con un aditivo como son las cenizas volantes.

5.3. Situaciones especiales de consolidación

Son muchas las situaciones que se presentan en la práctica donde los trabajos de consolidación pueden diferir de los comentados. Por un lado, es frecuente que los niveles explotados presenten una fuerte inclinación que obligue a la construcción de barreras perimetrales, pues de otro modo los conos de relleno al formarse y deslizar darían lugar a una pérdida de material, perdiéndose toda su efectividad.

Otro caso lo constituyen los yacimientos multicapa, donde se ha visto que lo más aconsejable es practicar una consolidación descendente, que si bien es algo más costosa, permite un mayor control.

Cuando las excavaciones están accesibles desde el exterior y presentan condiciones de seguridad se recomienda un relleno con estériles utilizando los métodos clásicos.

Un sistema que se aconseja cuando los hundimientos tardan un tiempo en producirse es el adoptado en Estados Unidos, y que consiste en la formación de columnas o conos a intervalos regulares que sirven de soporte de los estratos suprayacentes. Las mezclas que se utilizan van desde una simple lechada, si sólo se pretende sellar alguna discontinuidad abierta en la parte alta, hasta un mortero de hormigón a base de arena, grava y cemento para la formación del cono inferior.

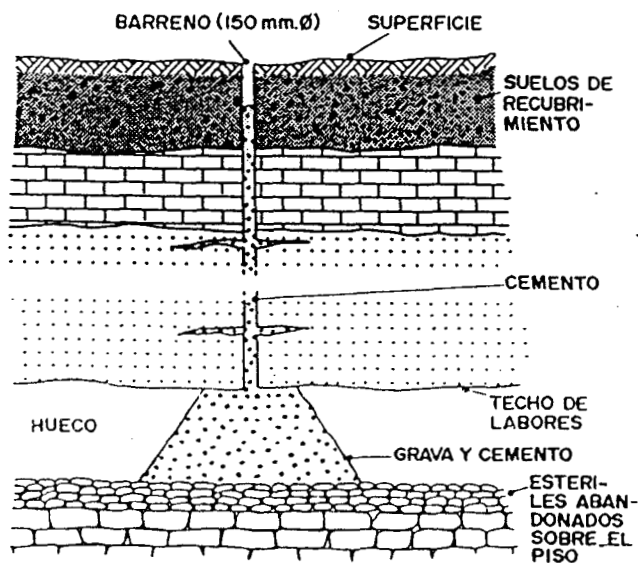
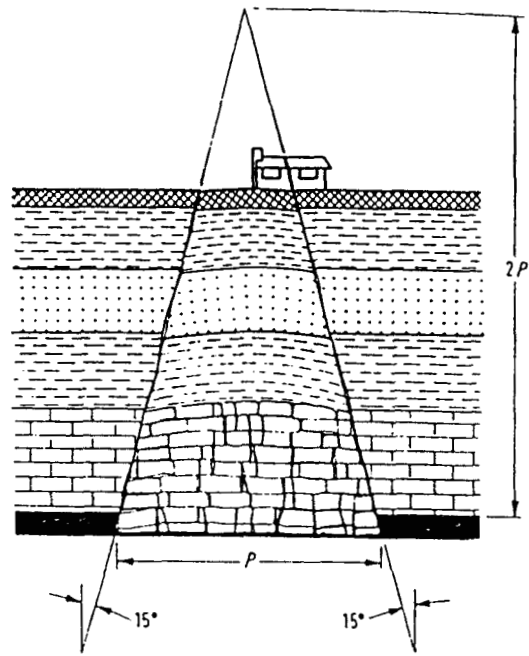
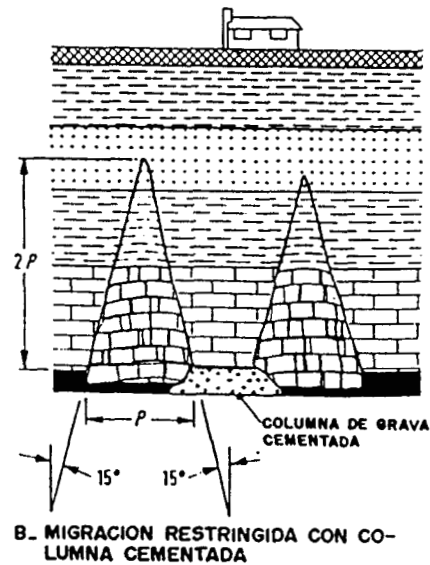


Figura 10.17. Formación de una columna para la consolidación parcial.

Este método es muy efectivo para restringir la migración de los hundimientos hacia la superficie por la existencia de huecos. Fig 10.18, y resulta, cuando es aplicable, mucho más económico que la consolidación total.



A. MIGRACION NO RESTRINGIDA



B. MIGRACION RESTRINGIDA CON COLUMNA CEMENTADA

Figura 10.18. Método de consolidación parcial con reducción de los efectos de la migración de los huecos. (Ackenheil, A. C., 1970)

Otro procedimiento que se está empezando a emplear, cuando las labores están localizadas y aún no se han hundido, es el del relleno neumático con lanzadera interior, tal como se muestra en la Fig. 10.19. Se aplica en vía seca, añadiéndose una pequeña cantidad de agua para suprimir el polvo. Para inspeccionar el estado de los minados antes y después del relleno se utiliza una cámara de televisión de pequeñas dimensiones.

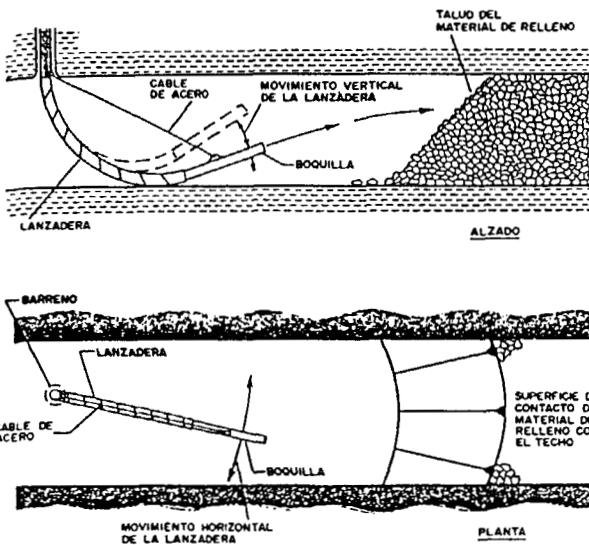


Figura 10.19. Sistema de relleno neumático con lanzadera (Roberts y Holbrook, 1986).

5.4. Abandono de labores subterráneas

Las labores de infraestructura más frecuentemente encontradas en la superficie son los pozos, las galerías de montaña y los planos inclinados. Con respecto a las primeras, si el objetivo de la recuperación de los terrenos es la construcción de algún edificio se recomiendan unas distancias mínimas de seguridad, que según los diversos autores son las siguientes: Price et al aconsejan una distancia igual a la del espesor del material de recubrimiento no consolidado, hasta un máximo de 30 m; la NCB sugiere una zona de seguridad alrededor de los pozos correspondientes a un ángulo de 45° desde la intersección de dichas labores con los niveles de roca; por último, si el material de recubrimiento es muy flojo se recomienda una distancia igual al doble del espesor hasta una profundidad de 15 m.

Siempre que sea posible se llevará a cabo una investigación geotécnica de los suelos y rocas presentes, así como una inspección del estado del revestimiento o hastiales del pozo.

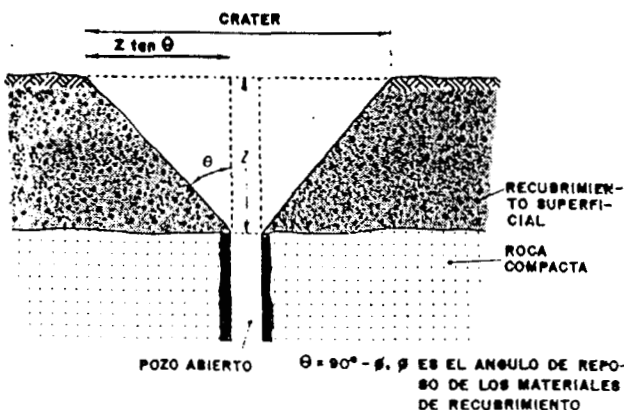


Figura 10.20. Diámetro del cráter que se produce alrededor de un pozo cuando existe material de recubrimiento.

Los métodos comúnmente utilizados para clausurar los pozos son:

1. Empleo de tapas de cierre prefabricadas.
2. Consolidación de los pozos mediante relleno y cementación.
3. Consolidación y empleo de unas tapas de cierre.
4. Relleno y taponado con material cementado.

Si la técnica elegida contempla el llenado del pozo con estériles, se deberán seguir las siguientes pautas: en la parte inferior, a lo largo de una altura de unas cinco veces el diámetro del pozo, se evitará la introducción de bloques mayores de 30 cm o de bloques de roca degradable, este material permitirá que el agua subterránea percole sin interrupción y que se evite al mismo tiempo la pérdida del relleno con estériles limpios o similares a un material granular sin materia orgánica. La curva granulométrica que se recomienda es la siguiente:

TABLA 10.IV

TAMAÑO (mm)	PORCENTAJE EN PESO
> 300	—
300 a 20	> 80
20 a 2	< 15
< 1	< 5

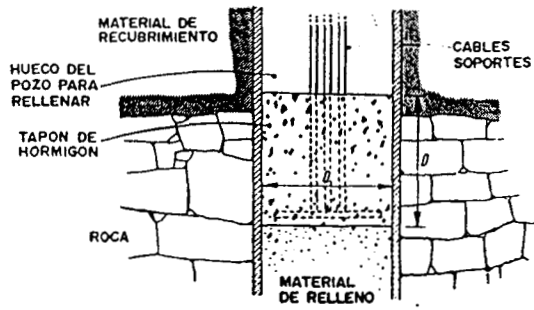
En los entronques de los pozos con las galerías en dirección se utilizarán los bloques de roca, como anteriormente se ha indicado, en unas alturas mínimas por encima de los mismos de 5 D.

En campos abiertos, los pozos una vez rellenados se cercarán con algún tipo de valla. Sin embargo, en las proximidades a áreas urbanas se colocará una cubierta de hormigón armado.

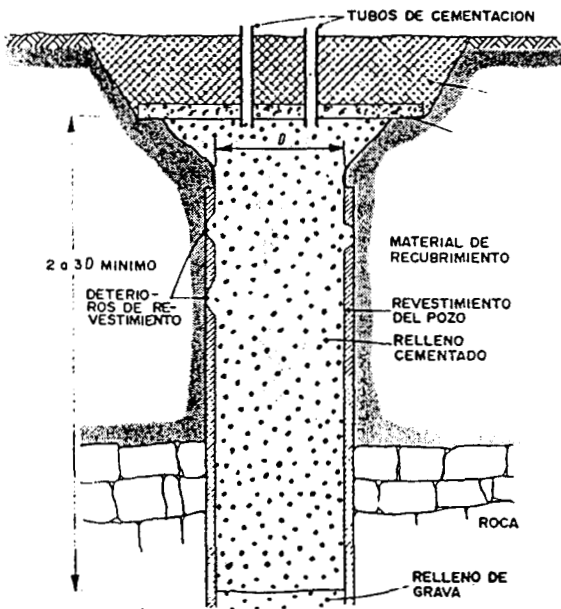
La técnica anterior puede complementarse con la cementación del relleno en aquellos casos en que se requieran unas condiciones de seguridad máximas. Para llevarlo a cabo se perforarán unos barrenos con tuberías de revestimiento exterior y se utilizarán otras perforadas más pequeñas a través de cuyos orificios y mediante el auxilio de un cierre de goma se inyectará la lechada de cemento y arena fina conforme se extraiga la primera. El número de barrenos dependerá del diámetro del pozo, aconsejándose uno solo si la citada dimensión es de unos 2,5 m y hasta cuatro si es de 4 ó 5 m. Cuando se utilice más de un barreno es necesario efectuar las inyecciones sucesivas casi simultáneamente, de forma tal que se evite que existan áreas donde queden atrapados aire o agua por debajo de los niveles tratados.

Los taponos de hormigón se utilizan para evitar la pérdida del relleno, particularmente en pozos profundos. Aunque su construcción es frecuente en pozos aún en operación, cuando estos se encuentran abandonados será necesario tener en cuenta los riesgos de subsidencia del relleno, junto al colapso de las paredes, la emisión de gases y la irrupción de agua.

En la Fig. 10.21 se muestran dos diseños de taponos, uno suspendido y otro cementado.



A. TAPON SUSPENDIDO



B. TAPON CEMENTADO

Figura 10.21. Tipos de taponos utilizados en el cierre de pozos. (Willis, A. J., 1976)

Las tapas de cierre construidas de hormigón armado constituyen un método de clausura de pozos muy empleado, sobre todo cuando no se ha procedido al relleno total o a su taponamiento.

Las losas se colocan apoyándose en la roca firme, tal como se muestra en la Fig. 10.22, y deben tener un diámetro mínimo superior a dos veces el del pozo. El espesor de estas losas se recomienda que sea superior a los 45 cm.

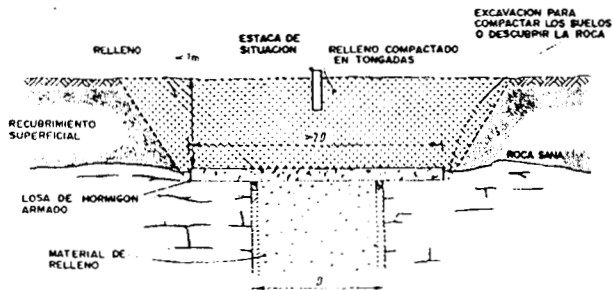


Figura 10.22. Cierre de un pozo con losa de hormigón. (Willis, A. J., 1976)

Si existe riesgo de acumulación de gases se dispondrá, hasta la superficie, de unos tubos para favorecer el escape de estos.

Otra clase de cierre que se utiliza con mucha frecuencia son aquellos con forma de pirámide o cono invertido. Se construyen fabricando una estructura metálica de chapa, colocando en su interior un entramado de redondos de acero, para después verter sobre ellas el hormigón y conseguir un elemento de cierre resistente.

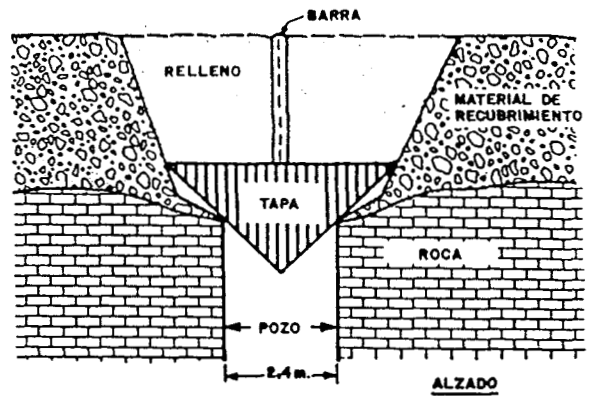
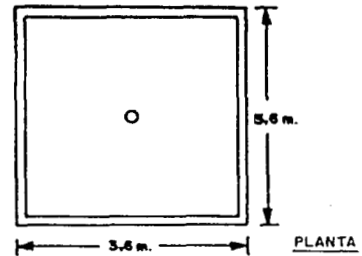


Figura 10.23. Tapa en forma de pirámide invertida.

Este sistema es ideal para el cierre de pequeños pozos o chimeneas con diámetros inferiores a los 2,5 m.

La clausura de socavones y pozos inclinados se debe realizar, una vez localizados estos en superficie, mediante el relleno en un tramo desde la boca de, al menos, 10 veces la altura de la excavación. Si la labor es inclinada se levantará un tabique de hormigón en el extremo más profundo, capaz de retener y soportar el empuje del relleno o del agua que pudiera acumularse. La introducción del relleno, que podrá cementarse o no, se hará en diversas fases y tras su terminación se sellará la entrada con otro tabique de hormigón o de mampostería de un espesor mínimo de 30 cm Fig. 10.24.

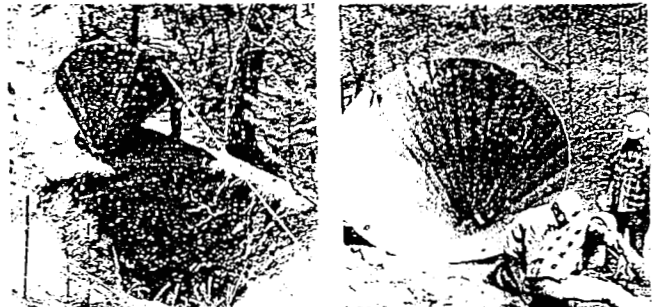


Foto 10.2. Colocación de una tapa cónica en un hundimiento.

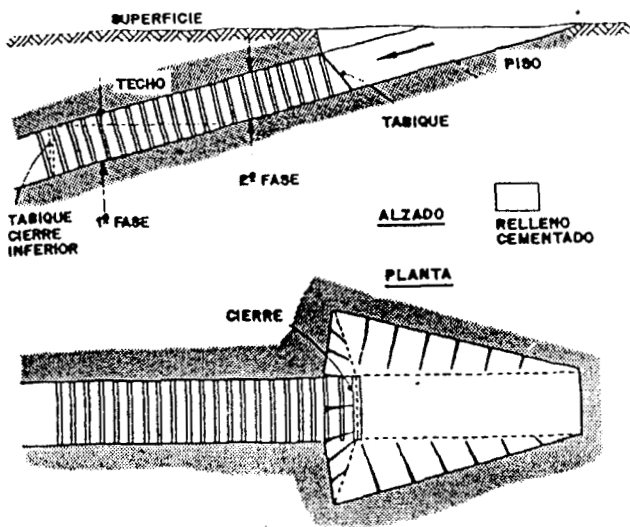


Figura 10.24. Clausura de un plano inclinado.

En la superficie, donde se habrá realizado una pequeña excavación de saneo y limpieza, se procederá al extendido, compactación y nivelación del material vertido.

Si esas labores subterráneas actúan como canales de drenaje de las minas se dispondrán unas obras auxiliares para garantizar la salida de las aguas.

6. RECOMENDACIONES DE CONSTRUCCION SOBRE AREAS MINADAS SIN CONSOLIDAR

Siempre que haya trabajos subterráneos abandonados existe un riesgo de hundimiento que puede llegar a afec-

tar, si no se han tomado una serie de precauciones, a las estructuras construidas en la superficie.

Los fenómenos de subsidencia raramente se paralizan, pudiendo manifestarse mucho después de la explotación, con un carácter impredecible y de fuerte magnitud.

Los problemas de inestabilidad solamente se presentan cuando se produce un proceso de colapso natural que se extiende hacia la superficie, hasta intersectar con la cimentación o estructura prevista como consecuencia de los asentamientos, los colapsos de los pilares o movimientos de los estratos suprayacentes a los minados.

Cuando esas excavaciones se encuentran a profundidades superiores a los 60 m, no afectan normalmente a las estructuras de superficie. En caso contrario, sí, por lo que será necesario, si se desea construir sobre los terrenos, evaluar la capacidad portante de los materiales por encima de la zona colapsada en relación con las cargas de las estructuras previstas.

Si las labores son muy superficiales una solución puede ser la excavación y relleno del área sobre la cual se pretende construir.

Otras alternativas cuando los minados son más profundos consiste en recurrir a un diseño especial de las cimentaciones. Si los edificios son de reducida altura pueden emplearse cimentaciones del tipo de losa corrida Fig. 10.25, con las que se consigue un buen reparto de las cargas sobre los terrenos de baja capacidad portante.

Cuando se precisen pilotes para transferir la carga estructural a los materiales del subsuelo, la profundidad de los mismos dependerá de la existencia o no de unos estratos competentes entre los minados y las superficie Fig. 10.26.

Este tipo de cimentaciones sólo se suele utilizar en profundidades inferiores a los 30 m, pues sino resulta económicamente prohibitiva.

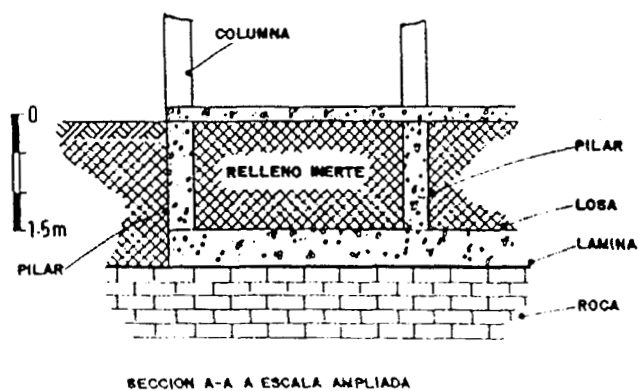
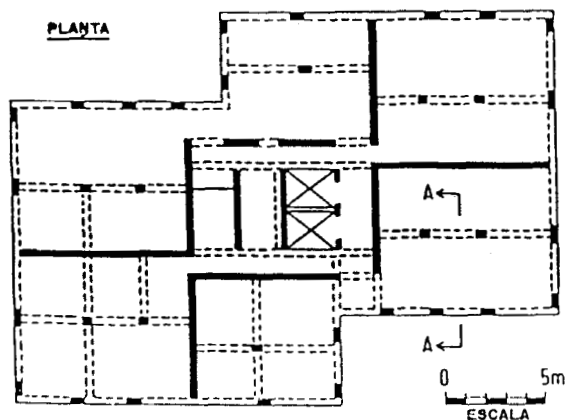


Figura 10.25. Tipo de cimentación de losa corrida. (Tomlinson, M. J., 1980)

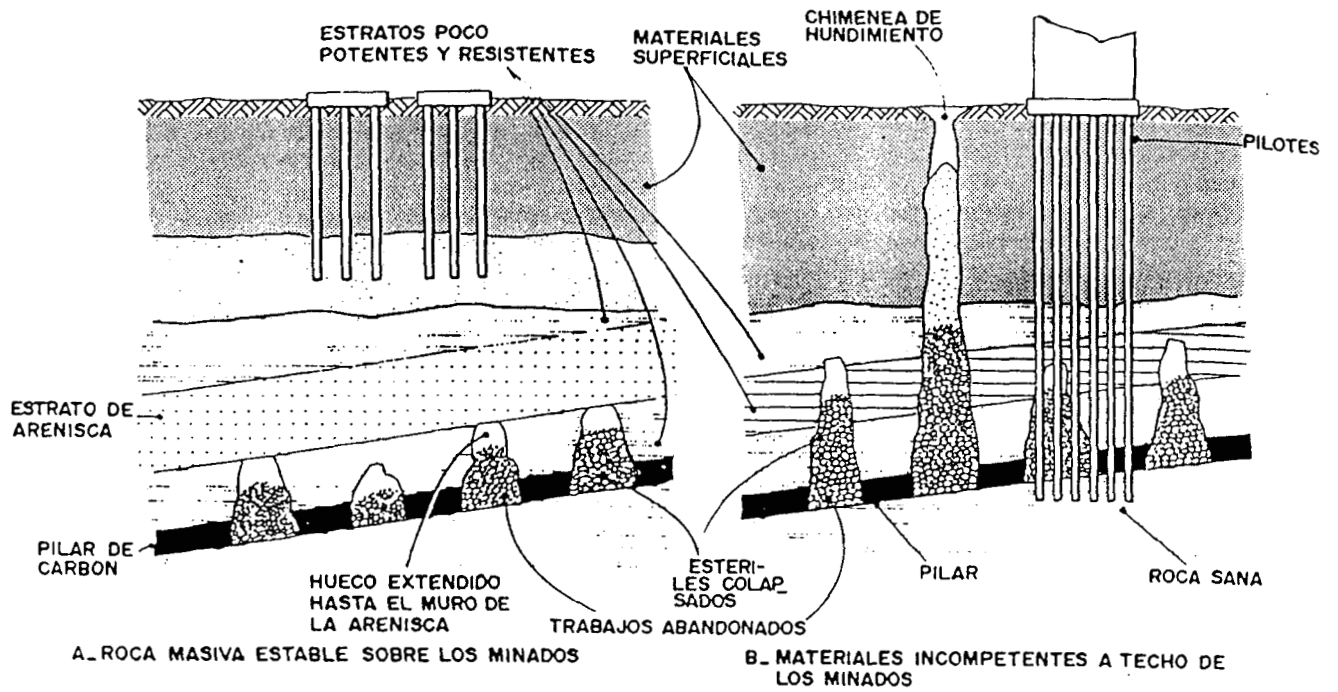


Figura 10.26. Empleo de pilotes para la cimentación de estructuras. (Tomlinson, M. J., 1980)

BIBLIOGRAFIA

- BRANHAM, K. L. y STEEPLES, D. W.: «Cavity Detection Using High Resolution Seismic Reflection Methods». Mining Engineerin. February 1988.
- BURDICK, R. G.: «A Method for Locating Abandoned Mines» U.S. Bureau of Mines. R.I. 9050, 1986.
- CLEMENT, G.: «Geophysical Reconnaissance of the Soils».
- COLLAZZI, G. J.: «Pumped Slurry Backfilling of Abandoned Coal Mine Workings for Subsidence Control at Rock Springs Wyo.». U.S. Bureau of Mines I.C. 8846, 1981.
- DOWN, C. G. and STOCKS, J.: «Environmental Impact of Mining». Applied Science Publishers Ltd. London. 1978.
- DRESSEL, N. W. and VOLDSIN, J. S.: «Inverted Pyramid-Shaped Plugs for Closing Abandoned Mine Shafts - Galena, K.S.». U.S. Bureau of Mines, I.C. 8998, 1985.
- HEALY, P. K. and HEAD, J. M.: «Construction over Abandoned Mine Workings». 1984.
- MAGNUSON, M. O.: «Control of Fires in Abandoned Mines in the Eastern Bituminous Region of the United States». U.S. Bureau of Mines. I.C. 8620, 1974.
- RAMBAUD, C. et al.: «Hundimientos Mineros - Métodos de Cálculo». IGME 1986.
- ROBERTS, J. M. et al.: «Remote Pneumatic Stowing in Abandoned Room and Pillar Mines» Proceeding of the 8th Annual National Abandoned Mine Lands Conference, 1986.
- TOMLINSON, M. J.: «Foundation Design and Construction». Pitman Press. 1980.

CONTROL DE LA EROSION Y SEDIMENTACION. OBRAS ESTRUCTURALES

1. INTRODUCCION

La explotación de un yacimiento lleva consigo una serie de operaciones, generalmente de alcance considerable, que producen importantes cambios en la morfología local. Se hacen excavaciones, se construyen vías de acceso, se hacen zanjas, se interrumpe o se modifica el cauce de un río, se mueven grandes volúmenes de tierra, se forman terraplenes y escombreras, etc. Todo ello favorece el fenómeno de la erosión y trae consigo problemas de carácter ambiental. Dicho fenómeno se ve acentuado ante la ausencia de cobertura vegetal, así como por la formación de taludes de fuerte pendiente.

La erosión se define como el desgaste de la superficie terrestre por la acción de agentes externos como el viento o el agua.

La erosión eólica tiene importancia según las circunstancias de la explotación, pero se puede asociar al movimiento de partículas muy finas como consecuencia de corrientes de aire, unas de carácter natural «viento» y otras provocadas por el paso de maquinaria pesada o por acciones que disgregan los materiales, hasta triturarlos y convertirlos en «finos», y luego los mueven y los dejan en suspensión en el ambiente, de manera que el viento traslada a estos finos de un lado a otro hasta que se depositan.

En el caso de las actividades mineras es la erosión hídrica la más importante y la de efectos más perjudiciales, se produce, cuando se disgregan las partículas de los materiales superficiales y son arrastrados de dichas superficies por la acción del agua.

El impacto de las gotas de lluvia sobre las superficies desnudas de los nuevos «suelos» de las áreas excavadas y de las construidas con los estériles, provoca, por un lado, una destrucción de los agregados de esos materiales produciendo una liberación de partículas finas y, por otro, una disminución de la velocidad de infiltración como resultado de la formación de una costra más impermeable debido a la compactación.

Si cae más lluvia de la que puede infiltrarse en el suelo, se producen entonces las escorrentías.

Según la forma de manifestarse, la erosión hídrica puede clasificarse en: laminar, en regueros o surcos, y en barrancos o cárcavas.

La erosión laminar resulta de la disgregación de los

agregados del suelo por la acción combinada de los impactos de las gotas de lluvia y de la escorrentía. Se manifiesta por la remoción más o menos uniforme de delgadas capas de suelo en áreas bastante grandes. Al degradarse el suelo por capas sucesivas este tipo de erosión es más peligrosa que otras, detectándose, por lo general, grandes cantidades de material removido que se deposita en los cursos de agua: la erosión laminar es más importante sobre los suelos naturales que sobre los suelos mineros, pues en los primeros se pierde más materia orgánica y nutrientes al estar estos en la parte más superficial, mientras que en los mineros los materiales superficiales con mayor espesor suelen ser una mezcla de los diferentes horizontes.

La erosión por regueros o surcos se produce al arrastrar el agua elementos terrosos, cuando ésta circula por la superficie, formando pequeños canales con una orientación sensiblemente normal a las curvas de nivel. Esos surcos se forman cuando el agua no discurre uniformemente por la superficie, sino que lo hace concentrada en corrientes de una potencia erosiva capaz de abrir pequeñas incisiones en el suelo que con el tiempo pueden llegar a ser importantes. Si los surcos son pequeños pueden eliminarse mediante escarificados superficiales.

La erosión en barrancos o cárcavas se manifiesta por las profundas incisiones en el terreno que el agua de escorrentía genera cuando existe una alta concentración de ésta. En las paredes laterales se pueden producir, además, desprendimientos de los agregados de los suelos, debido a la falta de cohesión de los mismos por el exceso de humedad.

Este capítulo trata de abordar el tema de la erosión desde dos puntos de vista diferentes, en los cuales se contempla, por un lado, la estimación de la cantidad de erosión originada y, por otro, las distintas maneras de controlar dicha erosión.

El objetivo final es la búsqueda de medidas o soluciones que disminuyan el riesgo de erosión, y la erosión en sí, en las áreas afectadas y la integración de las obras realizadas en el entorno.

Para ello habrá de tenerse en cuenta una serie de factores que van a influir en la erosionabilidad de los suelos y por tanto en los procesos de restauración. Fig. 11.1.

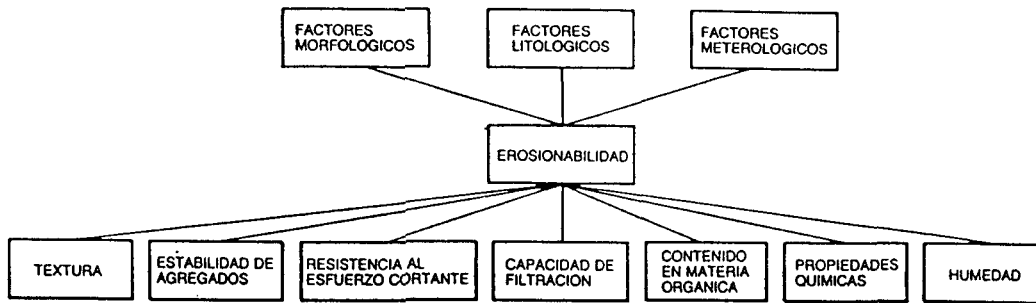


Figura 11.1. Factores que influyen en la erosionabilidad de los suelos.

2. EVALUACION DE LA EROSION HIDRICA

A finales de los años cuarenta se empezaron a estudiar una serie de modelos de erosión encaminados a predecir, estimar y cuantificar las pérdidas de suelo, debidas a la erosión superficial, que se produce en una zona determinada. Fruto de esas investigaciones es la «Ecuación Universal de Pérdida de Suelo» (Wischmeier y Smith, 1958).

$$A = 2,24 \cdot R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

siendo:

- A = Pérdida media anual de suelo (t/ha).
- R = Factor de Lluvia.
- K = Factor de Erosionabilidad del Suelo.
- L = Factor de Longitud de Declive del Talud.
- S = Factor de Pendiente de Talud.
- C = Factor de Cubierta Vegetal y Uso del Suelo.
- P = Factor de Control de la Erosión.

El Factor de Lluvia «R», se define como el producto de dos características de la lluvia: la energía cinética «E» y la intensidad máxima durante 30 minutos «I₃₀». El valor de «R» puede estimarse para un chubasco mediante la ecuación:

$$R = \frac{\left[\sum_{j=1}^n (1,213 + 0,890 \cdot \log_{10} \cdot I_j) \cdot (I_j T_j) \right] \cdot I_{30}}{173,6}$$

donde:

- I_j = Intensidad de precipitación para un incremento de intensidad (mm/h).
- T_j = Período del incremento del chubasco (h).
- I₃₀ = Intensidad máxima de precipitación en 30 minutos.
- j = Incremento del chubasco.
- n = Número de incrementos del chubasco.

Si se calcula «R» como producto de las dos variables citadas, los valores de «E» pueden estimarse con la Tabla 11.I conociendo la intensidad de precipitación en una hora.

TABLA 11.I. ENERGIA CINETICA DE LA LLUVIA NATURAL
(Kilogrametros/Hectárea-mm)
(Wischmeier y Smith, 1958)

INTENSIDAD (mm/h)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,000	3,265	9,937	7,499	8,606	9,470	10,171	10,765	11,281	11,734
1	12,142	12,509	12,845	13,253	13,439	13,705	13,945	14,188	14,488	14,616
2	14,814	15,002	15,182	15,353	15,717	15,674	15,826	15,971	16,111	16,247
3	16,377	16,504	16,626	16,745	16,860	16,972	17,080	17,196	17,289	17,389
4	17,486	17,582	17,614	17,765	17,854	17,940	18,025	18,108	18,189	18,269
5	18,347	18,425	18,498	18,571	18,643	18,714	18,852	18,852	18,919	18,958
6	19,050	19,113	19,176	19,238	19,298	19,385	19,417	19,475	19,532	19,588
7	19,644	19,699	19,752	19,806	19,858	19,920	19,961	20,011	20,061	20,110
8	20,159	20,207	20,554	20,301	20,347	20,392	20,437	20,482	20,526	20,570
9	20,613	20,654	20,694	20,435	20,775	20,816	20,857	20,897	20,938	20,978
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	21,029	21,386	21,722	22,030	22,316	22,582	22,830	23,065	23,285	23,493
20	23,642	23,879	24,059	24,230	24,294	24,551	24,703	23,065	24,988	25,194
30	25,254	25,321	25,503	25,622	25,737	25,894	25,957	26,063	26,116	26,265
40	25,363	26,459	26,551	26,642	26,732	26,817	26,902	26,965	27,066	27,146
50	27,224	27,300	27,375	27,443	27,520	27,591	27,651	27,723	27,796	27,862

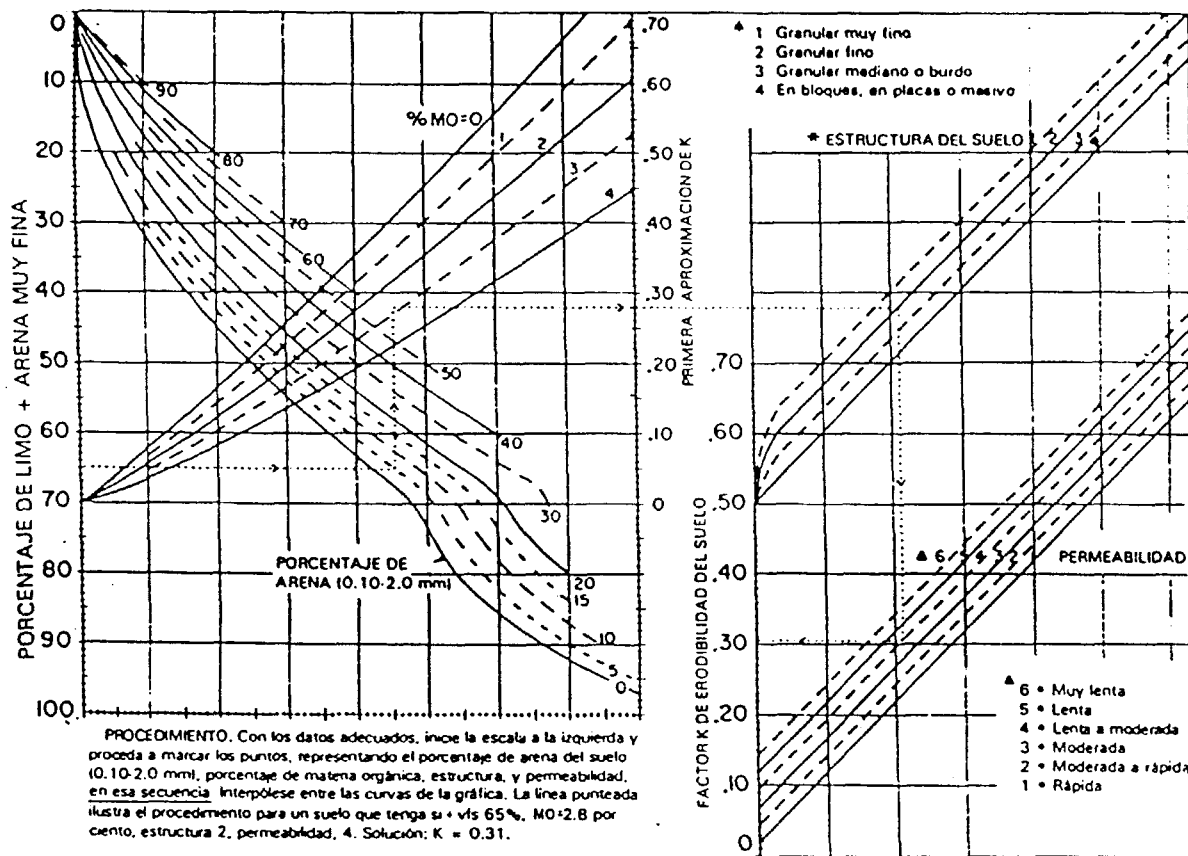
A partir de la precipitación máxima del mes en 24 horas, es posible calcular la intensidad de lluvia en 1 hora. Como la precipitación se reparte desigualmente a lo largo del día, el valor correspondiente a 24 horas se divide por 6, 2 ó 4, según que la zona geográfica de estudio se encuentre en un área muy lluviosa del Norte de España, en el Levante o Suroeste o en una zona intermedia.

El Factor de Erosionabilidad «K» varía entre 0,3 y 0,7 y depende de las propiedades del suelo, especialmente del contenido en materia orgánica, la textura, la estructura y la permeabilidad. El cálculo de «K» puede hacerse a partir del nomograma de Wischmeier Fig. 11.2.

donde:

- x = Longitud de declive del talud (m).
- m = 0,5 si la pendiente es $\geq 5\%$.
- 0,4 si la pendiente es $< 5\%$ y $> 3\%$.
- 0,3 si la pendiente es $\leq 3\%$ y $\geq 1\%$.
- 0,2 si la pendiente es $< 1\%$.
- S = Pendiente del talud (%).

Existen gráficos preparados para calcular «LS» como el que se muestra en la Fig. 11.3.



Permeabilidad

- 1. Rápida: + de 250 mm/h.
- 2. Moderada o rápida: 65 a 125 mm/h.
- 3. Moderada: 20 a 65 mm/h.
- 4. Lenta a moderada: 5 a 20 mm/h.
- 5. Lenta: 1,25 a 5 mm/h.
- 6. Muy lenta: menos de 1,25 mm/h.

Figura 11.2. Abaco para el cálculo del Factor «K».

El Factor de Longitud de declive de talud «L» y el de Pendiente de talud «S» se suelen evaluar conjuntamente y se denomina Factor Topográfico «LS». Estos dos factores afectan a la capacidad de la escorrentía para desmenunder y transportar los materiales del suelo al aumentar la velocidad y, por consiguiente, al potencial erosivo del agua. El valor de «LS» puede estimarse con la expresión:

$$LS = \left[\frac{x}{22,13} \right]^m (0,065 + 0,045 S + 0,0065 S^2)$$

Cuando las superficies en los taludes no son regulares el valor de «LS» viene dado por la siguiente ecuación:

$$LS = \frac{\sum_{j=1}^n [S_j x_j^{m+1} - S_j x_{j-1}^{m+1}]}{x_e (22,13)^m}$$

n = Número de segmentos en que se divide el talud. Cada una de ellos debe ser regular en pendiente y tipo de suelo.

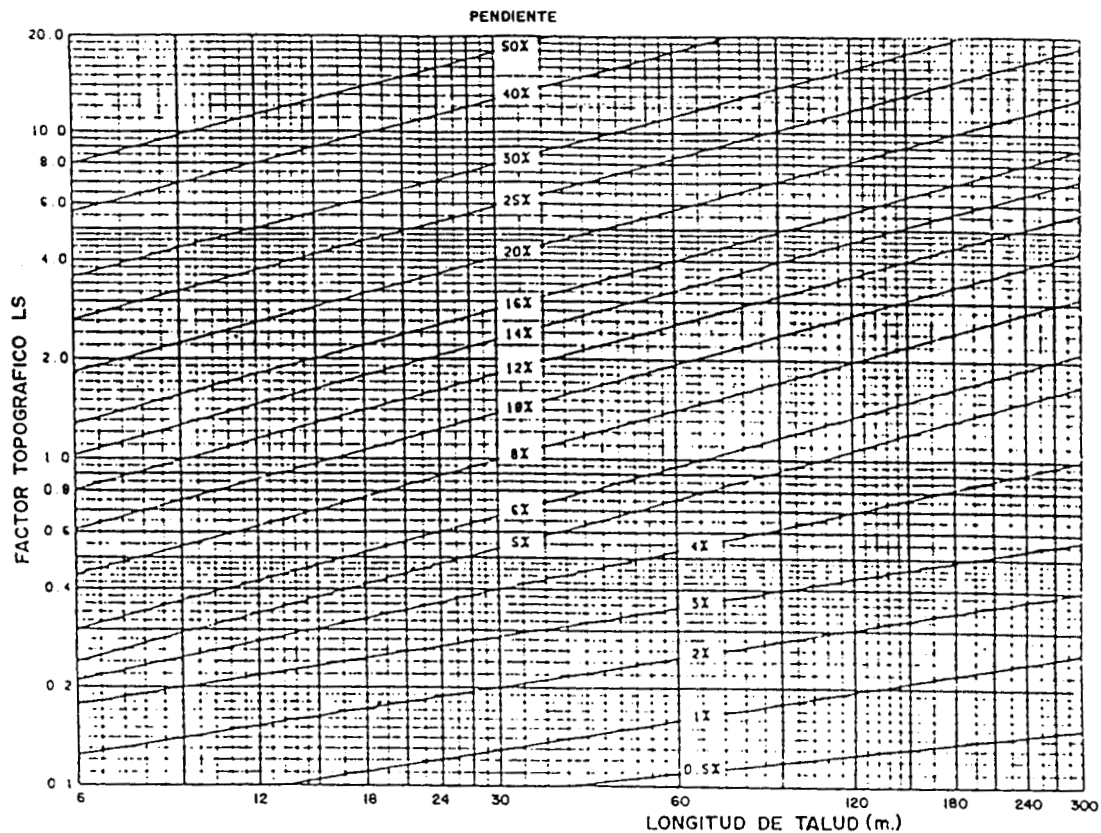


Figura 11.3. Abaco de cálculo del Factor Topográfico «LS».

- x_j = Distancia desde la parte superior del talud hasta el extremo superior del segmento j (m).
- x_e = Longitud total del talud (m).
- s_j = Valor del factor de pendiente para el segmento j .

El Factor «C» de Cubierta Vegetal y Uso del Suelo incluye los efectos interrelacionados del tipo de cubierta vegetal, la secuencia de la misma en el caso de cultivos, la distribución de la precipitación, etc. En los terrenos recuperados en minería, cuando los «suelos» son depositados sobre los estériles, no existe inicialmente ninguna protección vegetal, y el factor «C» es igual a 1. Sin embargo,

con la aplicación de un mulch se puede reducir inmediatamente su valor hasta niveles aceptables. En la Fig. 11.4 pueden observarse los grados de cubrición esperados para diferentes cantidades de mulch de paja o heno.

En la Fig. 11.5 se muestran los valores de «C» en función del grado de cubrición de suelo obtenido con el mulch.

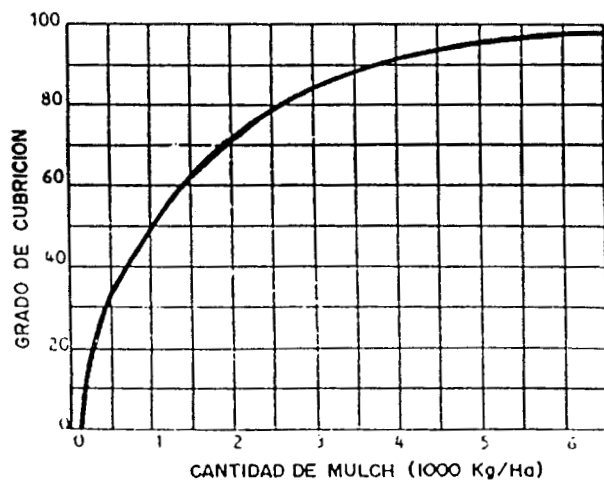


Figura 11.4. Relación entre la cantidad de mulch por unidad de superficie y el grado de cubrición alcanzado (Wischmeier y Smith, 1978).

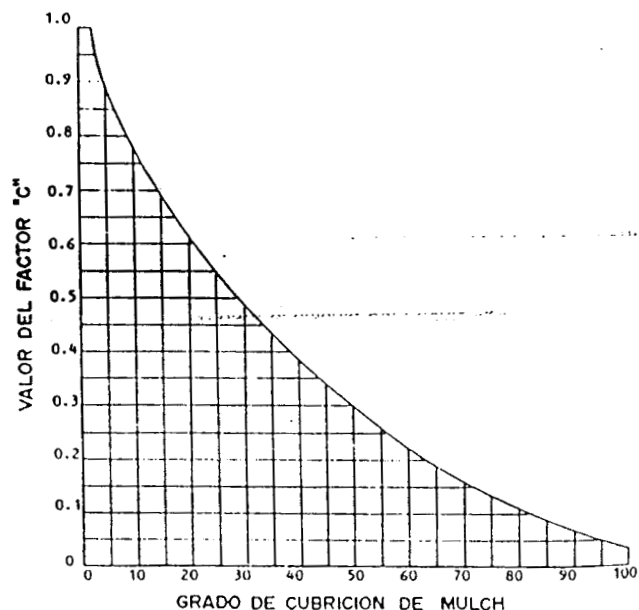


Figura 11.5. Efecto del mulch sobre el Factor «C» (Wischmeier y Smith, 1978).

En las Tablas 11.II y 11.III se indican los valores de «C» para diferentes tipos de cubierta existente.

Por último, el Factor de Prácticas de Conservación «P» refleja la efectividad de medidas protectoras, tales como el establecimiento de terrazas o bermas, diques o cana-

les para la desviación de las aguas, etc. Si tales obras no se realizan el factor «P» tendrá un valor de 1. En la Tabla 11.IV se recogen los valores de este factor en función de la pendiente de los taludes cuando se dispone de terrazas o diques de desvío.

TABLA 11.II. VALORES DE «C» PARA LAS ZONAS CON CAPA DE MATERIA ORGÁNICA Y SEMBRADAS (Smith y Ports, 1976, SCSA)

TRATAMIENTO	PROPORCIÓN DE CAPA DE MATERIA ORGÁNICA, EN kg/m ²	PORCENTAJE DE PENDIENTE	VALOR C, EN PORCENTAJE ^a	
			Periodo 1	Periodo 2
Sin capa de materia orgánica y sin sembrar Granos o pastos de crecimiento rápido Capa de materia orgánica procedente de paja ^b	Ninguno	Todo	100	—
	0,22	Todo	70	10
	0,34	≤ 10	20	7
	0,45	≤ 10	12	5
		≤ 10	6	5
		11-15	7	5
		16-20	11	5
		21-25	14	5
		26-33	17	5
		34-50	20	5
Grava	30,2	≤ 15	5	5
	53,8	≤ 20	2	2
Astillas de madera	1,6	≤ 15	8	5
	2,7	≤ 15	5	2
	5,6	≤ 15	2	2
Siembra permanente, segundo año		Todo	—	1
		Todo	1	1

^a Período 1: las primeras seis semanas del período de crecimiento; Período 2: después de las seis semanas del período de crecimiento.

^b Capa de materia orgánica creada con paja o heno.

TABLA 11.III. FACTOR DE CUBIERTA VEGETAL Y USO DEL SUELO «C» (U. S. Soil Conservation Service, 1975)

TIPO DE CUBIERTA Y PROMEDIO DE ALTURA DE CAIDA DEL GOTEJO DE AGUA	CUBIERTA ARBOREA Y ARBUSTIVA (%)	CUBIERTA HERBACEA Y RESTOS VEGETALES	PORCENTAJE DE CUBIERTA HERBACEA Y DE RESTOS VEGETALES					
			0	20	40	60	80	95-100
Cubierta no apreciable		G	0,45	0,20	0,10	0,042	0,013	0,003
		W	0,45	0,24	0,15	0,090	0,043	0,011
Cubierta de maleza alta o arbustos bajos (0,5 m altura de caída)	25	G	0,36	0,17	0,09	0,038	0,012	0,003
		W	0,36	0,20	0,13	0,082	0,041	0,011
	50	G	0,26	0,13	0,07	0,035	0,012	0,003
		W	0,26	0,16	0,11	0,075	0,039	0,011
	75	G	0,17	0,10	0,06	0,031	0,011	0,003
Arbustos (2 m altura de caída)	25	G	0,40	0,18	0,09	0,040	0,013	0,003
		W	0,40	0,22	0,14	0,085	0,042	0,011
	50	G	0,34	0,16	0,085	0,038	0,012	0,003
		W	0,34	0,19	0,13	0,081	0,041	0,011
	75	G	0,28	0,14	0,08	0,036	0,012	0,003
		W	0,28	0,17	0,12	0,007	0,040	0,011

TABLA 11.III. (Continuación)

TIPO DE CUBIERTA Y PROMEDIO DE ALTURA DE CAIDA DEL GOTEO DE AGUA	CUBIERTA ARBOREA Y ARBUSTIVA (%)	CUBIERTA HERBACEA Y RESTOS VEGETALES	PORCENTAJE DE CUBIERTA HERBACEA Y DE RESTOS VEGETALES					
			0	20	40	60	80	95-100
Arbobes, sin sotobosque de arbustos bajos (4 m altura de caída)	25	G	0,42	0,19	0,10	0,041	0,013	0,003
		W	0,42	0,23	0,14	0,087	0,042	0,011
	50	G	0,39	0,18	0,09	0,040	0,013	0,003
		W	0,39	0,21	0,14	0,085	0,042	0,011
		G	0,36	0,17	0,09	0,039	0,012	0,003
		W	0,36	0,20	0,13	0,083	0,041	0,011

G = La cubierta de la superficie es césped o plantas similares, con restos vegetales compactados y 5 cm de profundidad.
 W = La cubierta de la superficie consiste principalmente en plantas herbáceas de hoja ancha (por ejemplo, de malas hierbas con un reticulado de raíces superficial y sin restos vegetales).

TABLA II.IV

PENDIENTE DEL TALUD (%)	VALOR DE «P»
1-2	0,12
3-8	0,10
9-12	0,12
13-16	0,14
17-20	0,16
21-25	0,18

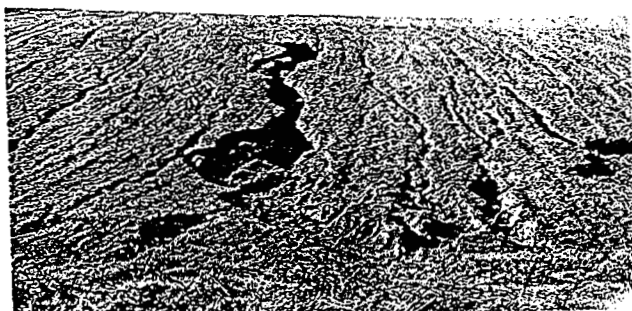


Foto 11.1. Erosión en el talud remodelado de una escombrera sin cubierta vegetal protectora.

3. CONTROL DE LA EROSION Y SEDIMENTACION

Las acciones encaminadas a reducir las pérdidas de suelo por erosión hídrica en una superficie afectada por la actividad minera, se centran en el modelado final y en el diseño y construcción de obras de drenaje y desagüe que,

a su vez, tienen como objetivos principales: conducir por los lugares adecuados los excesos de agua que se presentan durante las lluvias y al cortar acuíferos, o la que discurre por cauces existentes, de manera que se impida su entrada a los huecos de explotación y su contaminación química, con determinadas sustancias, y física por la disgregación y arrastre de los materiales superficiales por la acción erosiva del agua. Además se evitará la elevación de los niveles freáticos para: no afectar a la estabilidad de los taludes de las excavaciones y escombreras; para aumentar el rendimiento y eficacia de las diferentes operaciones mineras al mejorar las condiciones de rodadura y reducir los costes de mantenimiento y bombeo; para facilitar el empleo de explosivos más baratos no resistentes al agua; para disminuir los atascos en trituradoras y cribas; para reducir el volumen de agua tratada en las plantas depuradoras, y para ayudar también al establecimiento de la cubierta vegetal.

A continuación, se exponen diversos métodos de cálculo hidrológicos e hidráulicos, así como los tipos de obras o estructuras más empleadas en explotaciones mineras.

La necesidad de estas obras no es, pues, exclusiva de la etapa de restauración, ya que son elementos imprescindibles para la buena marcha de las operaciones.

3.1. Cálculo de los caudales a desaguar

Una etapa básica en cualquier proyecto de restauración es la determinación del caudal máximo a desaguar dentro de las zonas recuperadas y que servirán de punto de partida para el dimensionamiento de las obras de drenaje.

En cuanto a las precipitaciones, dado que en la mayoría de los lugares el número de datos utilizable es relativamente escaso, no parece razonable extrapolar a tiempos de recurrencia superiores a 100 años; y en cualquier caso, no debería pasarse de dos a tres veces la extensión media de las series utilizadas, para ser representativas deben tener un mínimo del orden de 20 años. Algunos de los tiempos de recurrencia más utilizados para diferentes tipos de estructuras son los recogidos en la Tabla 11.V.

TABLA 11.V

PERIODO DE RETORNO	TIPO DE ESTRUCTURA
2 años-24 horas 10 años-24 horas	<ul style="list-style-type: none"> • Canalizaciones temporales. • Canalizaciones permanentes. • Canalizaciones temporales de cursos de agua. • Balsas de decantación (volúmenes y aliviadero principal). • Tubos de desagüe con una sección menor de 3 m².
20 años-24 horas	<ul style="list-style-type: none"> • Tubos de desagüe con sección mayor de 3 m².
25 años-24 horas	<ul style="list-style-type: none"> • Aliviaderos de emergencia de las balsas de decantación.
100 años-24 horas	<ul style="list-style-type: none"> • Cursos de agua reconstruidos *. • Canalizaciones permanentes de cursos de agua *. • Aliviadero de emergencia de una balsa de decantación grande. • Puentes con longitudes mayores de 10 m.

* O la capacidad original del curso de agua si corresponde a un período de retorno superior a 100 años y 24 horas.

Las áreas a restaurar forman parte de las cuencas o subcuencas de drenaje que son las que se deben tener en cuenta para el cálculo de los caudales a evacuar. Esos caudales se determinan para cuencas pequeñas, como suelen ser las que se recuperan de los terrenos

afectados por las actividades extractivas, a partir de fórmulas teóricas como son la de Richards y la Racional:

— Richards:

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{c \cdot i \cdot s}{360}$$

— Racional:

$$Q = \frac{c \cdot i \cdot s}{360} \cdot K$$

En esas expresiones «Q» es el caudal (m³/s); «c» el coeficiente de escorrentía y «s» el área (ha).

Ambas fórmulas difieren en los términos «K» e «i». El término «K» es un factor corrector, que en cuencas pequeñas (tiempo de concentración menor a 6 horas) puede considerarse constante e igual a 1,2.

El término «i» en la fórmula de Richards corresponde a la intensidad de la precipitación (mm/h), para una duración igual al tiempo de concentración. En la fórmula Racional es un factor adimensional.

El tiempo de concentración, que se calcula más adelante, es el período necesario para que la escorrentía de una tormenta fluya desde el punto más alejado de la cuenca de drenaje a la salida de la misma.

En la fórmula de Richards la intensidad máxima de lluvia puede estimarse dando los siguientes pasos:

- Se calcula el tiempo de concentración «T_c» del aguacero por métodos teóricos.
- La precipitación en 24 horas, recogida en pluviómetros, se denomina P₂₄.
- Se determina el porcentaje P_c (precipitación en el tiempo de concentración) respecto a P₂₄, y se obtiene la familia de curvas indicadas en la Fig. 11.6, en don-

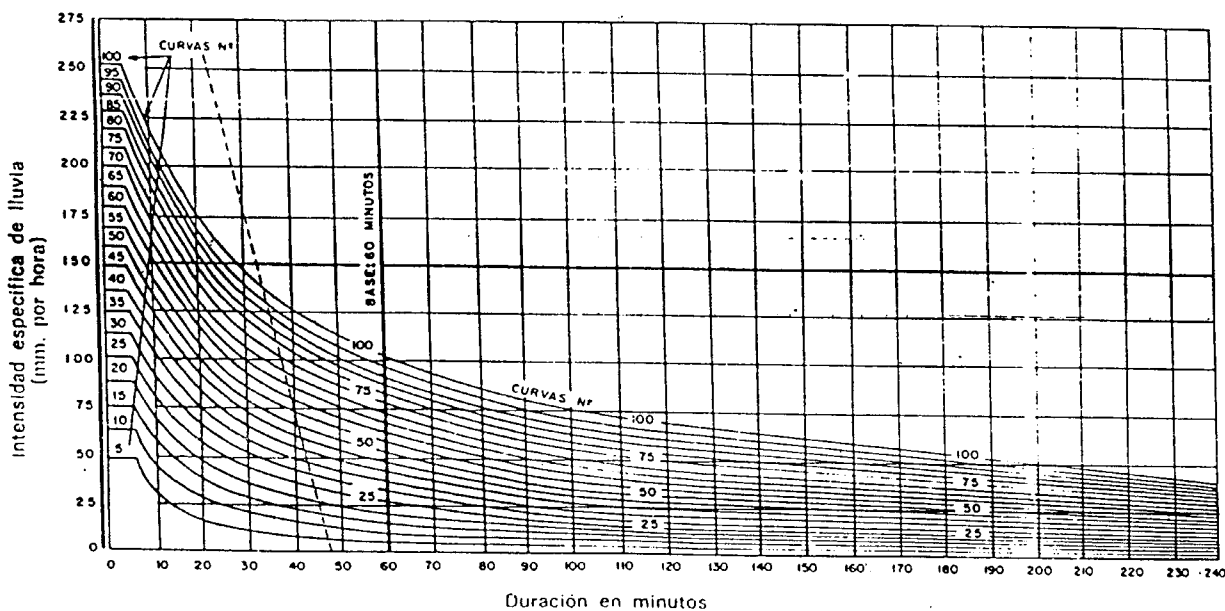


Figura 11.6. Abaco de cálculo de las intensidades específicas de lluvias en distintos tiempos (Base: 1 hora).

de las abscisas representan el tiempo de concentración « T_c » calculado en minutos, y en ordenadas, se obtiene para cada curva, las intensidades « i » a utilizar en la fórmula de Richards.

Así por ejemplo, para una cuenca pequeña situada en el sur de España, la curva a utilizar es la equivalente al 25 % de la precipitación « P_c » del tiempo de concentración respecto a la de 24 horas « P_{24} ».

En la fórmula Racional, la intensidad de lluvia « i » se expresa, adimensionalmente, como una función del tiempo de concentración « T_c » y del cociente « I_1/I_d », en donde « I_1 » es la máxima intensidad de precipitación media para distintos períodos de tiempo, e « I_d » la intensidad media diaria. Basándose en los datos de diferentes pluviógrafos se han esbozado para España las isólineas « I_1/I_d ».

Estos valores « I_1/I_d » decrecen en función de la duración del tiempo de concentración, según la siguiente ley que da el valor de « i » a utilizar en la fórmula Racional:

$$i = \frac{I}{I_d} = \left(\frac{I_1}{I_d} \right) \frac{28^{0,1} - T_c^{0,1}}{0,4}$$

La representación se indica en la Fig. 11.7.

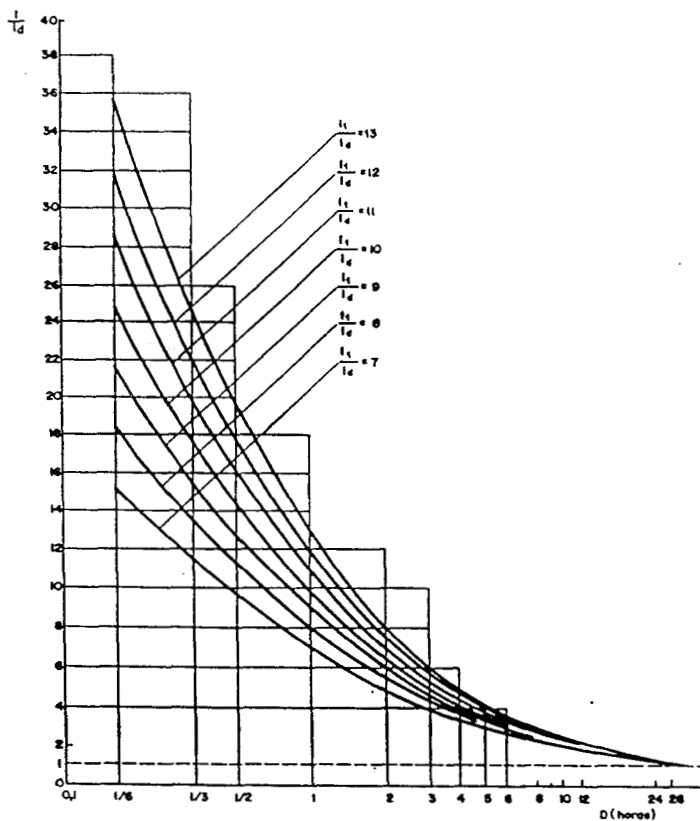


Figura 11.7. Familia de curvas I_1/I_d .

El coeficiente de escorrentía « C » depende de las pendientes del terreno, textura del suelo, cubierta vegetal y prácticas de cultivo. A cada factor, se asigna un valor específico y el coeficiente de escorrentía viene dado por la expresión propuesta por Frevert:

$$C = 1 - (C_p + C_t + C_v + C_c)$$

Cada uno de estos conceptos viene tabulado según se indica a continuación:

TABLA 11.VI

PENDIENTE	C_p
< 3 %	0,30
3- 5 %	0,20
6-10 %	0,15
11-15 %	0,08
16-20 %	0,07
21-25 %	0,05
> 25 %	0,02

TABLA 11.VII

TEXTURA	C_t
Muy arenosa	0,50
Franco arenosa	0,40
Franca	0,20
Arcillosa	0,10

TABLA 11.VIII

CUBIERTA VEGETAL	C_v
Forestal cubierto	0,20
Prados y pastos	0,15
Cultivos	0,10
Eriales	0,05

TABLA 11.IX

PRACTICAS DE CONSERVACION	C_c
Alomado a nivel	0,20
A nivel	0,15
Mal cultivado	0,10
Sin cultivar	0,00

A partir de la Tabla 11.X, sumando los valores « K » puede también determinarse con suficiente aproximación los valores de « C », de acuerdo con los límites que en la misma se establece.

Para el cálculo del tiempo de concentración « T_c » se pueden utilizar diversos métodos, entre los que destacan el propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos y el Nadal.

El primer método viene dado por la expresión:

$$T_c(h) = 32,5 \cdot 10^{-5} \cdot K^{0,770}$$

en donde $K = 3 \frac{L}{\sqrt{I}}$, siendo « L » la longitud del cauce principal en m, e « I », adimensional, cociente entre la diferencia de cotas de la cuenca y la longitud del cauce principal.

El cálculo del tiempo de concentración según Nadal se efectúa con el ábaco de la Fig. 11.8 o bien, si por las dimensiones de la cuenca no se puede aplicar el mismo, se utiliza la fórmula:

$$T_c = \left[\frac{0,871 \cdot L^3}{H} \right]^{0,385}$$

T_c = Tiempo de concentración (h).

L = Longitud de recorrido (km).

H = Desnivel entre la cabecera de la cuenca y el punto de desagüe (m).

TABLA 11.X. COEFICIENTE DE ESCORRENTIA

VALORES DE K				
1. Relieve del terreno	40 Muy accidentado, pendientes superiores al 30 %	30 Accidentado, pendientes entre el 10 y el 30 %	20 Ondulado, pendientes entre el 5 y el 10 %	10 Llano, pendientes inferiores al 5 %
2. Permeabilidad del suelo	20 Muy impermeable Roca	15 Bastante impermeable Arcilla	10 Bastante permeable Normal	5 Muy permeable Arena
3. Vegetación	20 Ninguna	15 Poca, menos del 10 % de la superficie	10 Bastante, hasta el 50 % de la superficie	5 Mucha, hasta el 90 % de la superficie
4. Capacidad de almacenaje de agua	20 Ninguna	15 Poca	10 Bastante	5 Mucha
Valor de K comprendido entre	75-100	50-75	30-50	25-30
Valor de C	0,65-0,80	0,50-0,65	0,35-0,50	0,20-0,35

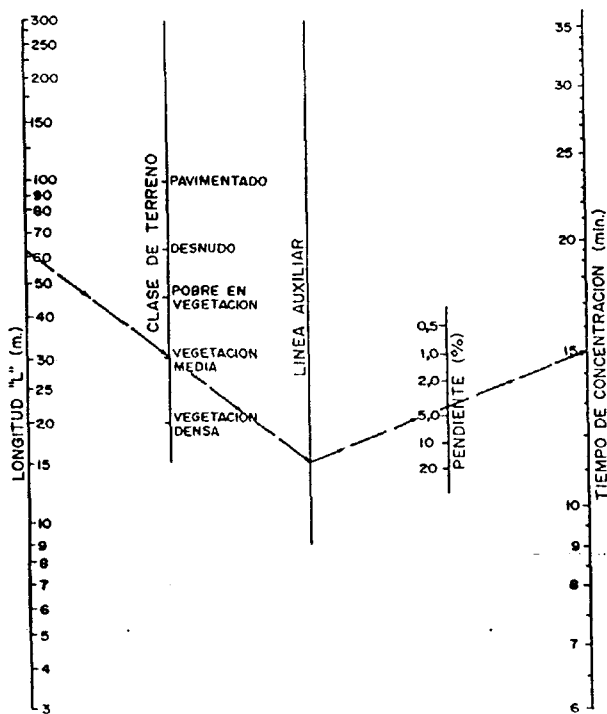


Figura 11.8. Nomograma para el cálculo del tiempo de concentración.

3.2. Canales y diques

El control y canalización de las aguas de escorrentía en las operaciones mineras es un problema resuelto, en par-

te, mediante diques y canales excavados. Las funciones de estas obras son:

- Evitar el paso de las aguas a áreas fuertemente erosionables, o en operación, y conducirlos de forma adecuada.
- Reducir la longitud de los taludes para complementar la resistencia a la erosión aportada por la vegetación.
- Impedir las acumulaciones de agua en superficies irregulares y/o cóncavas.
- Eliminar la llegada de las aguas a zonas con edificaciones o instalaciones mineras, y
- Proteger las tierras bajas frente a la deposición de sedimentos.

Previo al estudio hidráulico de estas obras, es preciso establecer su naturaleza, es decir los materiales de las paredes y lecho, así como su sección o forma geométrica en sentido perpendicular al flujo.

En cuanto a su naturaleza, los canales pueden ser contruidos sobre los propios estériles, en tierra, en pedregales, en piedra, hormigón, etc. En función de las características de esos materiales se define la velocidad máxima de circulación que garantiza, por un lado, la no existencia de problemas de erosión y, por otro, evita la deposición de sedimentos. La velocidad mínima aconsejable es de 0,25 m/s y las máximas admisibles se indican en la Tabla 11.XI.

TABLA 11.XI

TIPO DE REVESTIMIENTO	VELOCIDAD ADMISIBLE (m/s)	TIPO DE REVESTIMIENTO	VELOCIDAD ADMISIBLE (m/s)
Hierba bien cuidada en cualquier clase de terreno	1,80	Arcilla dura muy coloidal	1,20
Terreno parcialmente cubierto de vegetación	0,60-1,20	Arcilla con mezcla de grava	1,20
Arena fina o limo (poca o ninguna arcilla)	0,30-0,60	Grava gruesa	1,20
Arena arcillosa dura	0,60-0,90	Pizarra blanda	1,50
		Mampostería	4,50
		Hormigón	4,50

Si la pendiente de los canales da lugar a velocidades de circulación mayores que las admitidas, se recomienda el revestimiento vegetal de dichas obras con el fin de que

ésta actúe de retardador. En la Tabla 11.XII se indican las velocidades máximas para distintas pendientes y diferentes especies vegetales.

TABLA 11.XII

ESPECIES VEGETALES	PENDIENTE (%)	VELOCIDAD MAXIMA ADMISIBLE (m/s)	
		Suelo no erosionado	Suelo erosionado
• Cynodon dactylon: menor de 0,2 m	0-5	2,5	2,0
	5-10	2,2	1,7
	mayor de 10	2,0	1,5
• Cynodon dactylon: mayor de 0,2 m • Pennisetum clandestinum	0-5	2,2	1,7
	5-10	2,0	1,5
	mayor de 10	1,8	1,2
• Agropyron repens: mayores de 0,6 m	0-5	1,8	1,2
	5-10	1,5	0,9
	mayor de 10	1,2	0,6
• Phalaris arundinacea: menores de 0,6 m	0-5	1,7	1,1
	5-10	1,4	0,8
	mayor de 10	1,1	0,5
• Agropyron intermedium: mayores de 0,6 m	0-5	1,7	1,1
	0-10	1,4	0,8
	mayor de 10	1,1	0,5
• Agropyron smithii: menores de 0,6 m	0-5	1,6	1,0
	5-10	1,3	0,7
	mayor de 10	1,0	0,5
• Agropyron cristatum • Agropyron elongatum • Festuca elatior • Phalaris tuberosa	0-5	1,4	1,0
	5-10	1,2	0,8
• Eragrostis curvula • Oryzopsis holciformis	0-5	1,0	0,7

Además del criterio hidráulico, en la elección de las especies vegetales intervendrán otros criterios de tipo ecológico, climático y edáfico de la zona.

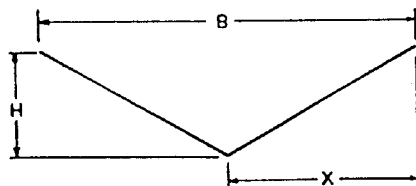
Las pendientes de los canales colectores, en casi todas las ocasiones, vendrán condicionadas por la propia topografía de la zona restaurada. No obstante, se debe intentar seguir las pautas recomendadas en la Tabla 11.XIII para terrazas de desagüe.

TABLA 11.XIII

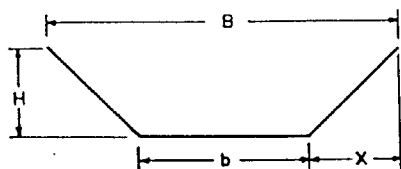
LONGITUD DE TERRAZA (m)	PENDIENTE MAXIMA (%)
30 o menos	2
31 a 60	1,2
61 a 150	0,5
151 a 365	0,35
366 o más	0,3

De acuerdo con la Instrucción de Carreteras, las pendientes mínimas para canales de desagüe general serán las siguientes:

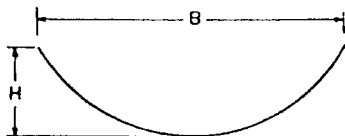
- Canales revestidos: 0,2 %
- Canales sin revestir: 0,5 %



$$\text{TALUD (S)} = \frac{X}{H}$$



$$\text{TALUD (S)} = \frac{X}{H}$$



Siempre que sea posible, se procurará llegar al 1 % de pendiente.

En lo referente a los tipos de sección transversal la elección dependerá del caudal, de la velocidad máxima de circulación de agua, e indirectamente de la maquinaria minera disponible para la construcción de los mismos. Las secciones más empleadas son:

- Triangulares.
- Trapezoidales.
- Parabólicas.

El cálculo hidráulico de la sección mínima del canal se basa en dos expresiones básicas que son, por un lado:

$$S_{\min} = \frac{Q}{V_{\max}}$$

S_{\min} = Sección mínima teórica (m²).

Q = Caudal máximo previsible en la sección de desagüe (m³/s).

V_{\max} = Velocidad máxima admitida (m/s).

$$\text{Area} = \frac{H \cdot B}{2}$$

$$\text{Perímetro mojado} = 2 \sqrt{H^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2}$$

$$\text{Radio hidráulico} = \frac{(H \cdot B)/2}{2 \sqrt{H^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2}}$$

$$\text{Anchura superior } B = 2 \cdot H \cdot S$$

$$\text{Area} = b \cdot H + SxH^2$$

$$\text{Perímetro mojado} = b + 2H \sqrt{1 + S^2}$$

$$\text{Radio hidráulico} = \frac{b \cdot H + S \cdot H^2}{b + 2H \sqrt{1 + S^2}}$$

$$\text{Anchura superior } B = b + 2 \cdot H \cdot S$$

$$\text{Area} = \frac{2}{3} B \cdot H$$

$$\text{Perímetro mojado} = B + \frac{8 \cdot H^2}{3 \cdot B}$$

$$\text{Radio hidráulico} = \frac{2 \cdot B^2 \cdot H}{3 \cdot B^2 + 8 \cdot H^2}$$

$$\text{Anchura superior} = \frac{3 (\text{área})}{2H}$$

Figura 11.9. Parámetros característicos de las diferentes secciones transversales.

y, por otro, la fórmula de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

donde:

- V = Velocidad del agua (m/s).
- i = Pendiente longitudinal del canal (m/m).
- n = Número de Manning.
- R = Radio hidráulico (m).

El radio hidráulico de un canal o dique es la relación existente entre el área mojada y el perímetro mojado.

El número de Manning, según el tipo de revestimiento se indica en la Tabla 11.XIV.

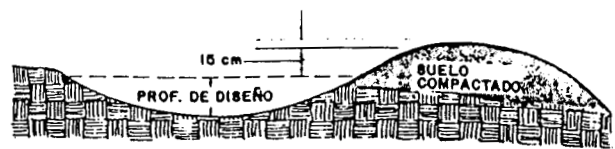
TABLA 11.XIV

TIPO DE REVESTIMIENTO	n
Tierra ordinaria con superficie uniforme	0,02
Hierba (altura de la lámina de agua superior a 15 cm)	0,04
Hierba (altura de la lámina de agua inferior a 15 cm)	0,06
Hierba espesa	0,10
Encachado de piedra, rugoso	0,04
Encachado de piedra, liso	0,02
Hormigón rugoso	0,024
Hormigón liso	0,012

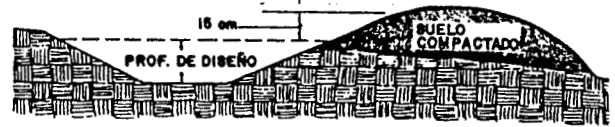
Independientemente de que debe efectuarse un cálculo hidráulico riguroso, algunos criterios generales que pueden seguirse en la construcción de los canales son los siguientes:

- Su localización debe determinarse considerando las condiciones de descarga, la topografía, los usos del terreno, los tipos de suelos, taludes y áreas de drenaje.
- Según la zona que se pretenda proteger, se utilizarán para el diseño períodos de recurrencia de 10 a 50 años.
- Los aliviaderos laterales se construirán situándolos al menos 15 cm por encima. Fig. 11.10.
- Las anchuras de los canales para el diseño máximo serán como mínimo de 1,2 m.
- Los taludes no serán inferiores de 2 H: 1 V.
- Tanto el cordón de material situado aguas abajo como el propio canal si está excavado en el terreno podrá revegetarse 15 días antes de la instalación.
- Periódicamente se revisarán y, si fuera preciso, se retirarán los sedimentos depositados.

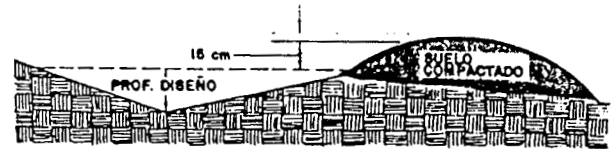
El segundo tipo de obras de desagüe son los diques. Se trata de estructuras construidas con los propios estériles de las minas con el objetivo básico de la canaliza-



SECCION PARABOLICA



SECCION TRAPEZOIDAL



SECCION TRIANGULAR

Figura 11.10. Construcción de canales excavados con diferentes secciones transversales.

ción de las aguas hasta las balsas de decantación. Los tres tipos principales de diques son los siguientes:

- Diques de desviación.
- Diques de interceptación.
- Diques perimetrales.

Algunos criterios generales de diseño de estas obras son los siguientes:

- Los diques con pendientes mayores del 2 % deben ser estabilizados.
- El área drenada por cada dique no debe ser superior a las 2 ha.
- El espaciamiento medio entre diques debe ser, al menos, el indicado en la Tabla 11.XV.

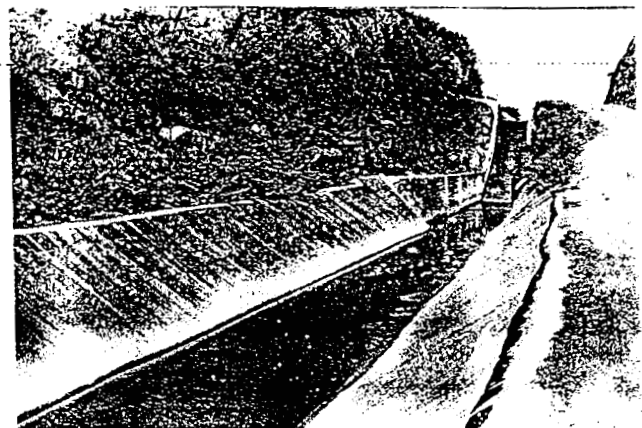


Foto 11.2. Canal de guarda de una mina de lignito pardo con sección trapezoidal.

TABLA 11.XV

TALUD POR ENCIMA DEL DIQUE (%)	DISTANCIA ENTRE DIQUES (m)
10	45
5-10	60
5	90

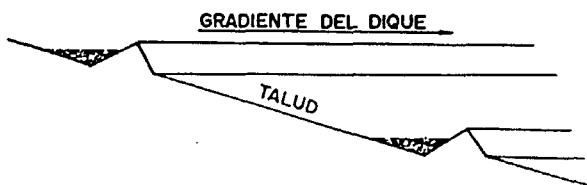
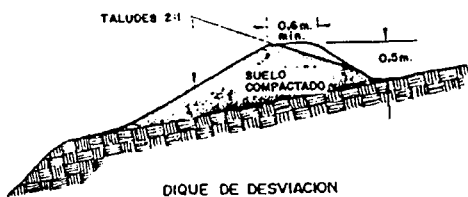
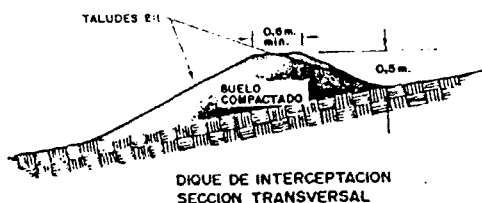


Figura 11.11. Disposición de diques sobre el talud general de drenaje.

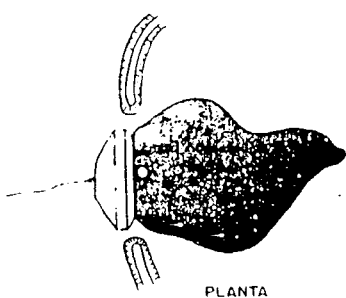
- La vida útil de los diques es limitada y, por lo general, no es superior a los 2 años.
- El material de construcción debe ser adecuadamente compactado formando taludes laterales 2H: 1V.
- Los diques pueden ser revegetados mediante siembra y utilizando mulches 15 días antes de su instalación.
- La altura mínima debe ser de 50 cm y la anchura de coronación al menos de 60 cm.



DIQUE DE DESVIACION



DIQUE DE INTERCEPCION SECCION TRANSVERSAL

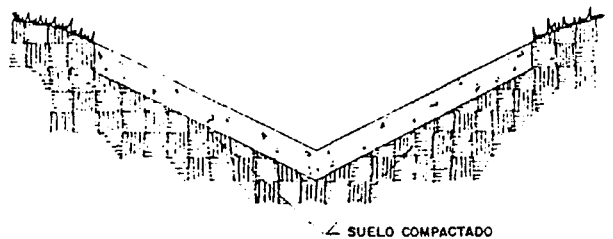


PLANTA

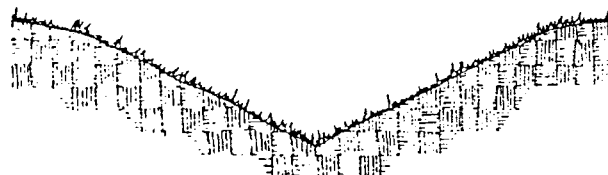
Figura 11.12. Tipos de diques.

3.2.1. PROTECCION DE CANALES

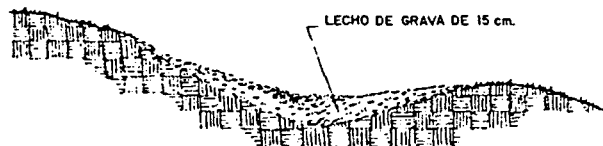
Como ya se han indicado, estas protecciones se emplean para preservar de la erosión el fondo y los cajeros de los canales cuando las velocidades que alcanza el agua son altas. Los tipos de revestimientos que más se utilizan son: la hierba, la grava, la escollera y el hormigón. Fig. 11.13. Los tres primeros sistemas son los más económicos, pero el de hormigón es el más efectivo. La reducción de la energía del agua se consigue en los canales con las irregularidades y rugosidades de las superficies que presentan los materiales empleados.



REVESTIMIENTO DE HORMIGON



REVESTIMIENTO DE HIERBA



REVESTIMIENTO DE GRAVA

Figura 11.13. Sistemas de protección de canales.

En el revestimiento de los canales deben observarse las siguientes recomendaciones:

- Si no se reviste de hierba, retirar todos los arbustos, raíces y materia orgánica de la traza de los canales.
- Mantener las pendientes y secciones calculadas en todos los tramos de los canales.
- Compactar los materiales en las zonas de relleno.

Algunas consideraciones específicas relativas a los distintos tipos de revestimiento son las siguientes:

A. Revestimiento de hierba. Fig. 11.14

La vegetación se establece normalmente por siembra o plantación de raíces o esquejes de especies seleccionadas. En aquellas ocasiones en que se necesite una pro-

tección inmediata se podrán transplantar tepes de cesped. También se emplean mulches, tales como redes de yute, mallas de plástico, mallas de papel, paja o heno que se colocan simultáneamente con la siembra o plantación.

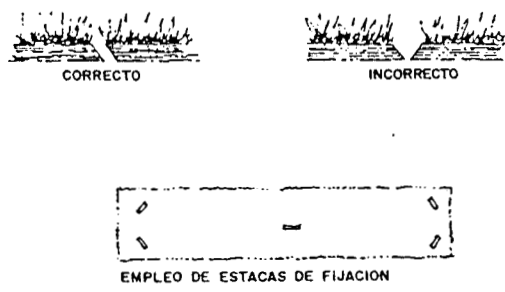
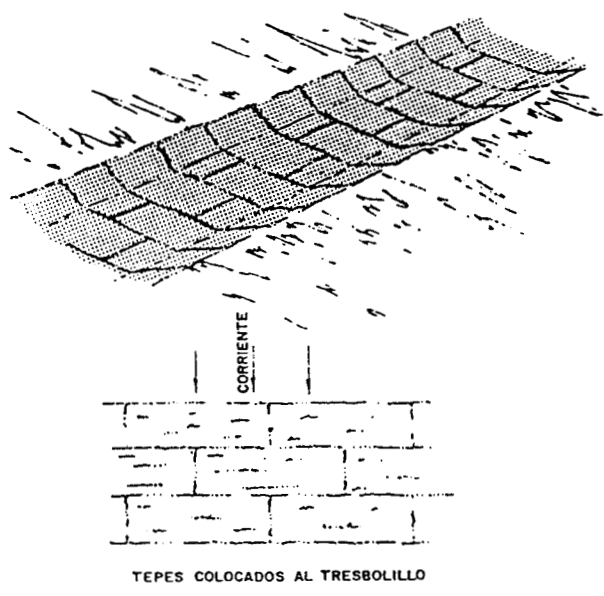


Figura 11.14. Canal revestido de hierba.

Este tipo de revestimiento requiere poco esfuerzo y capital para su construcción, pero precisa de inspecciones y cuidados continuos si se desea mantener su efectividad y evitar los daños por los sedimentos depositados.

Si se prevé que puede existir un pequeño flujo continuo de agua se dispondrá de un filtro de grava central que permita el drenaje y protección de la vegetación.

B. Revestimiento de grava

Muchos suelos se ven alterados cuando el agua circula a velocidades superiores a los 0,5 m/s. Las capas de grava pueden actuar en tales casos de protección, siempre que se mantengan para granulometrías finas unas velocidades inferiores a los 0,75 m/s y para las gruesas inferiores a 1,2 m/s, evitando así la removilización del material.

Así pues, cuando se prevea que el agua no va a circular con demasiada velocidad, podrá colocarse un recubrimiento de grava gruesa de unos 15 cm, que no requerirá posteriormente de muchos cuidados de mantenimiento.

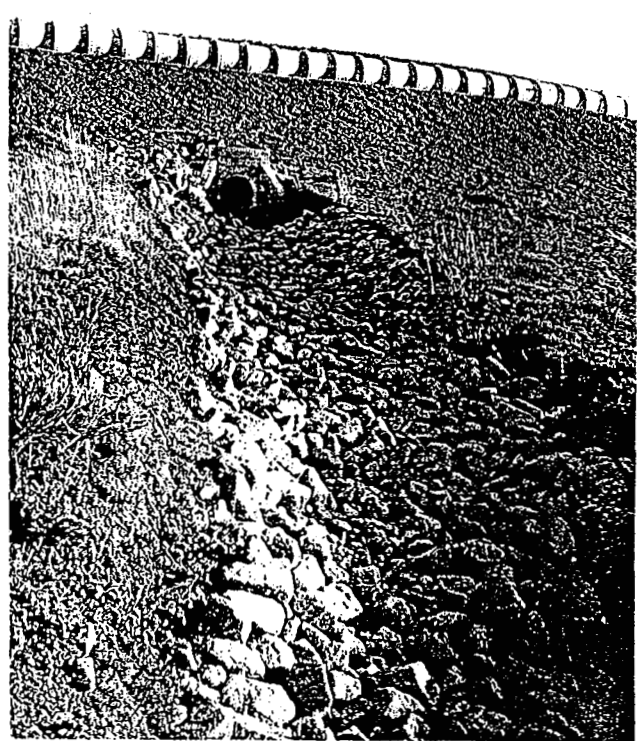


Foto 11.3. Canal revestido con grava gruesa.

C. Revestimiento de escollera. Fig. 11.15

Los canales profundos y con sección en V precisan mayor protección frente a la erosión que los superficiales, para la misma velocidad del agua. El material pétreo más grueso se dispondrá con un espesor de unos 35 cm sobre un lecho de grava de 15 cm que actuará como filtro.

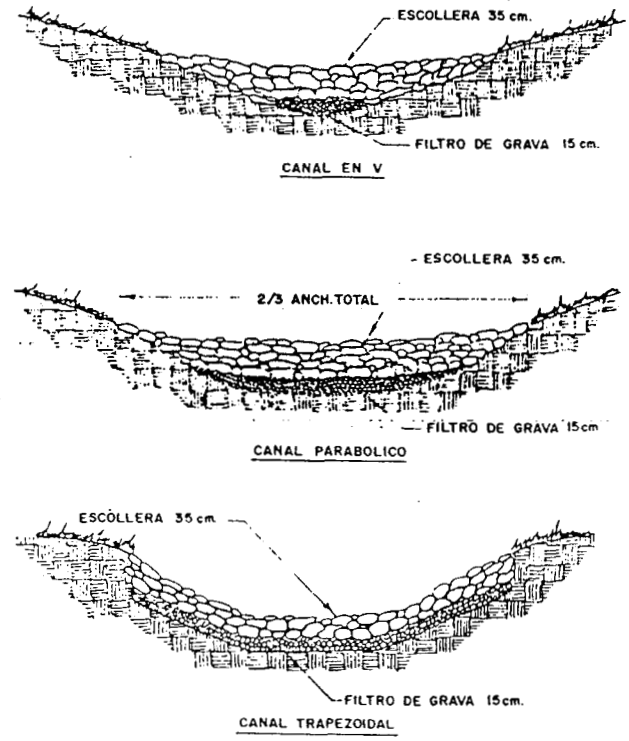


Figura 11.15. Canal revestido de escollera y grava.

D. Revestimiento de hormigón. Fig. 11.16

Los canales hormigonados se construirán siguiendo los criterios siguientes:

- El espesor mínimo debe ser de unos 10 cm.
- Antes de la colocación, el suelo sobre el que se vierte el revestimiento se compactará y humedecerá.
- Cada 6 m se dispondrán juntas ranuradas para el control de las grietas durante el período de fraguado. También se colocarán juntas de expansión cada 30 m, debidamente impermeabilizadas.
- En los extremos del canal las losas de hormigón se diseñarán con un borde vertical u orejeta para evitar el deslizamiento del canal sobre el terreno.

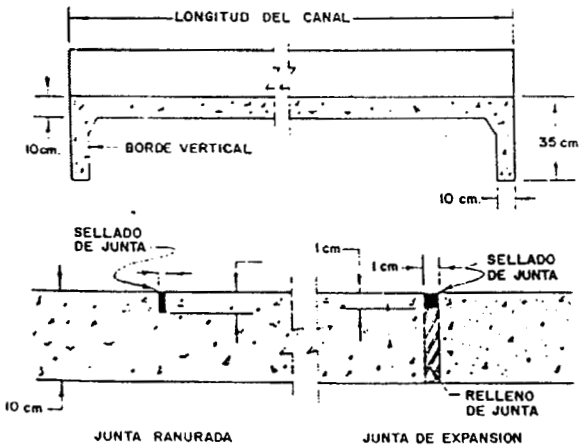
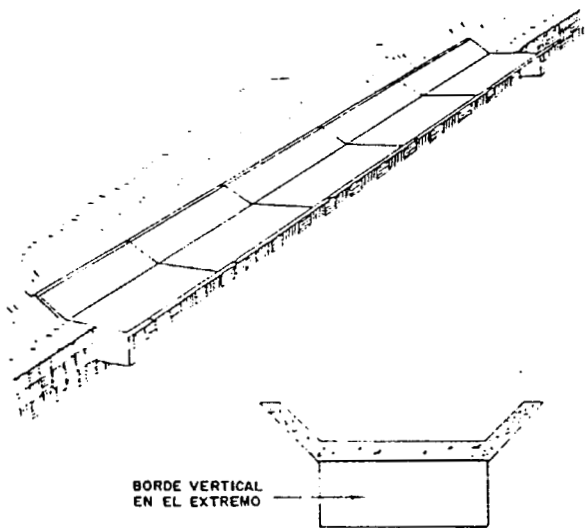


Figura 11.16. Canal revestido de hormigón.

3.3 Difusores laminares

Los difusores laminares son obras construidas en zonas sensiblemente horizontales, donde el agua recogida puede distribuirse a una velocidad inferior a la del umbral de erosión sobre un área no alterada y protegible con una cubierta vegetal. Fig. 11.17.

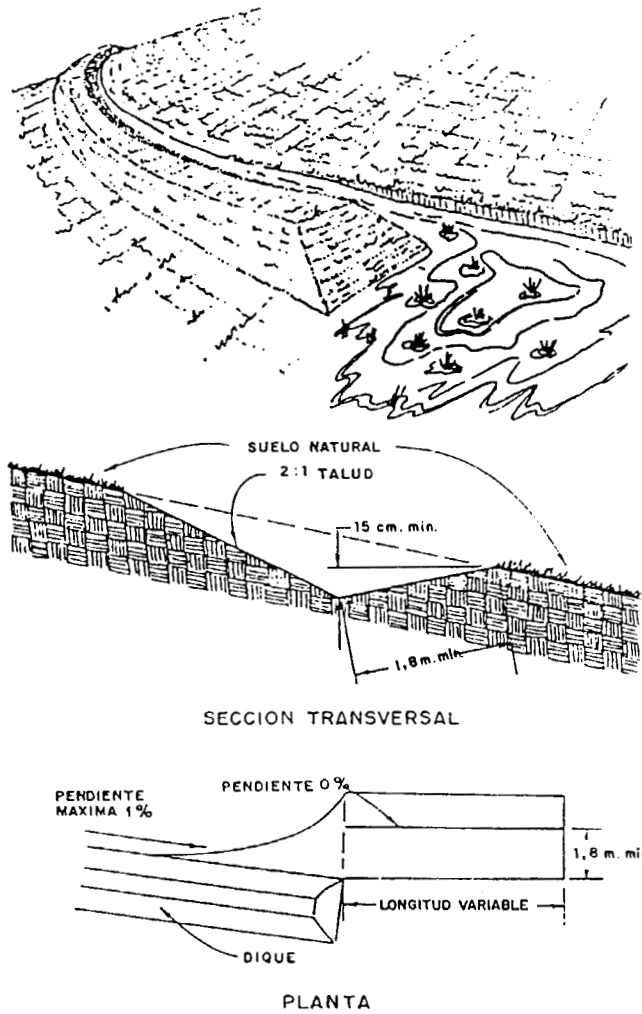


Figura 11.17. Difusor laminar.

Las longitudes de estos difusores dependen de los caudales de descarga, tal como se indica en la Tabla 11.XVI.

TABLA 11.XVI

CAUDAL DE DISEÑO (m ³ /s)	LONGITUD MINIMA DEL DIFUSOR (m)
Hasta 0,3	4
0,3-0,6	6
0,6-0,8	8
0,8-1,1	11
1,1-1,4	13

3.4. Protección de sumideros

Las protecciones de sumideros están constituidas por filtros o áreas de decantación excavadas alrededor de dichos puntos y tienen como objetivo evitar la entrada de sedimentos en las canalizaciones de desagüe, que pudieran producir la obstrucción de los mismos o reducir su capacidad. Fig. 11.18 y Fig. 11.19.

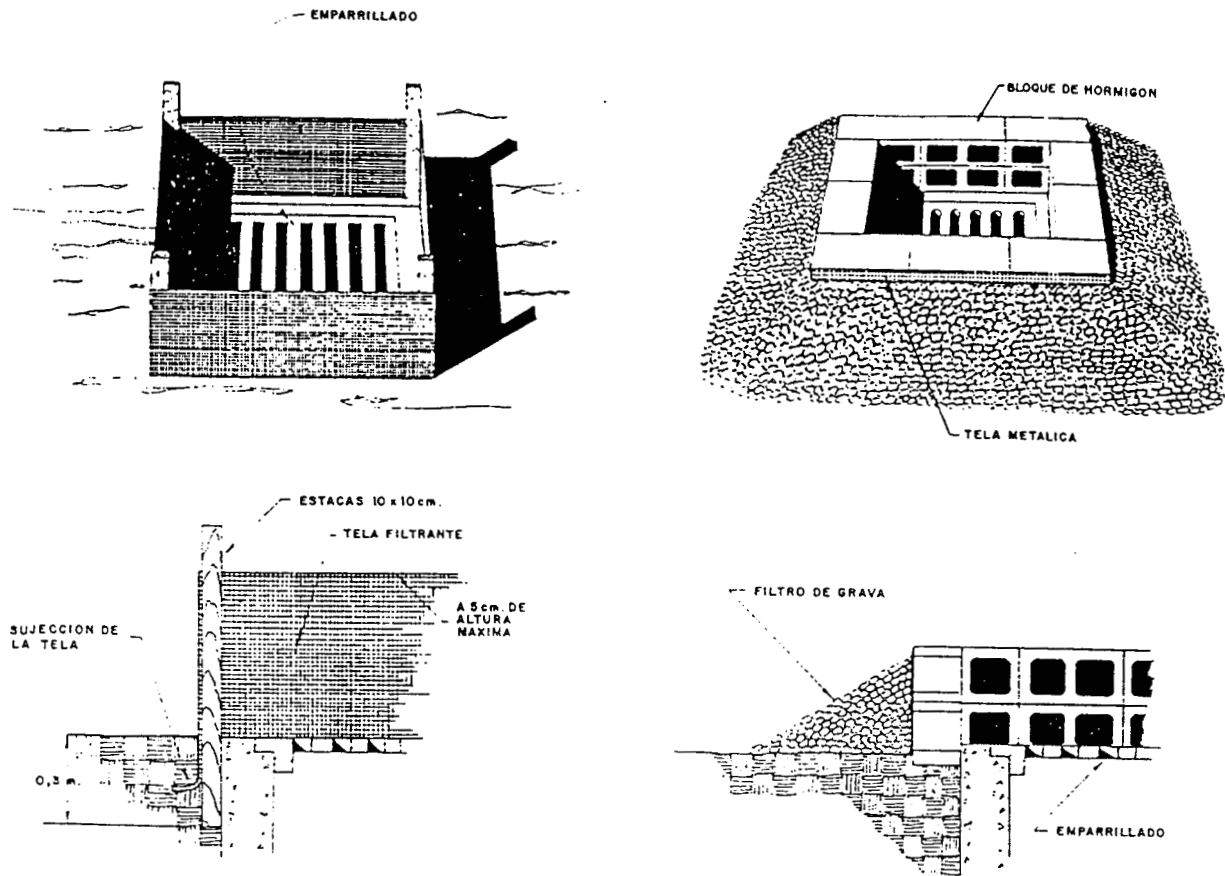


Figura 11.18. *Sistemas de protección de sumideros.*

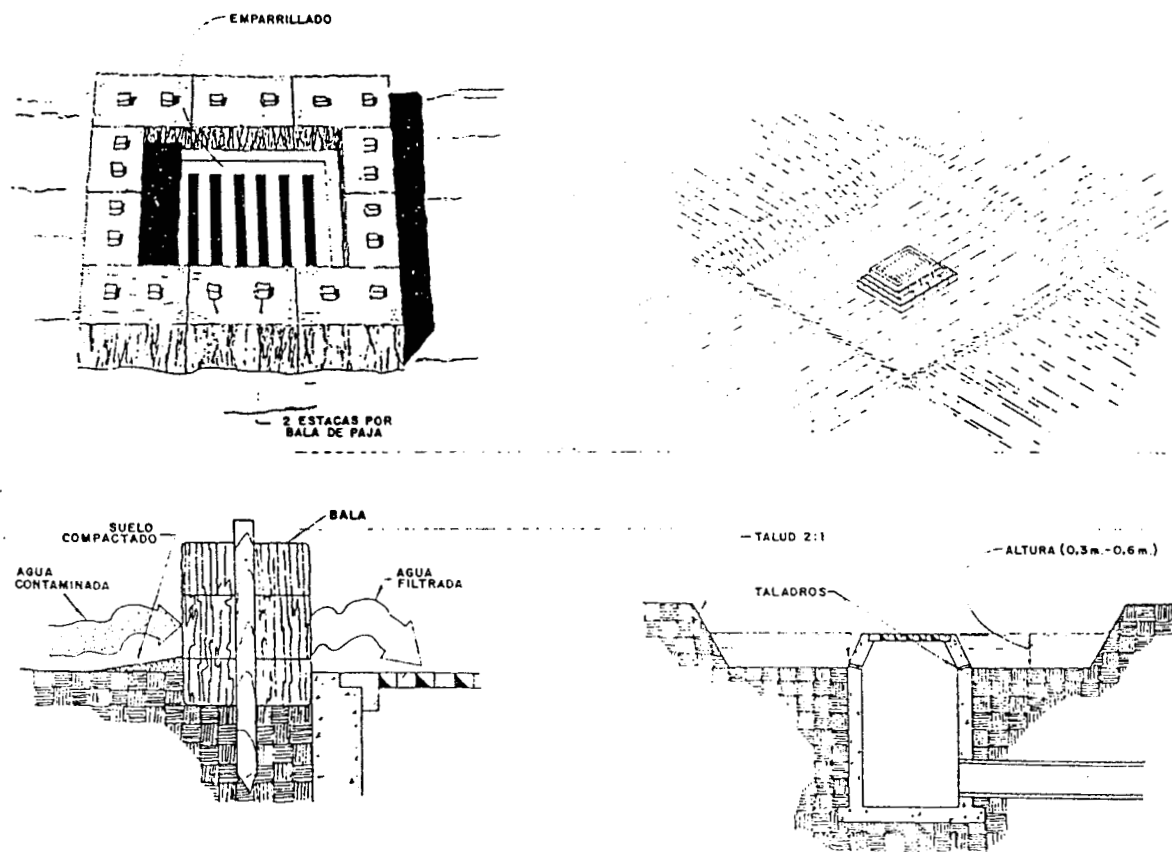


Figura 11.19. *Sistemas de protección de sumideros.*

Estas obras suelen construirse en la etapa final de recuperación de un terreno y los criterios generales de diseño que se siguen son los siguientes:

- El área receptora debe ser inferior a 0,5 ha.
- No deben interferir a la operación minera o uso futuro previsto para los terrenos.
- El sistema de protección debe ser efectivo frente al tipo de sólidos en suspensión arrastrados por el agua.
- El sistema debe permitir una fácil limpieza de los sólidos recogidos.
- Después de cada tormenta o aguacero de fuerte intensidad, o periódicamente con lluvias continuas débiles, debe realizarse una inspección y reparación si fuese necesario.

3.5. Protección de desagües

En los puntos de descarga de los distintos tipos de canalización se emplean protecciones, con la doble finalidad de disipar la energía del agua y evitar la erosión de las zonas entre los desagües y canales de aguas abajo. Las paredes y fondos de estos canales son cubiertas con un enchachado de piedra, revegetadas o revestidas de hormigón u otros materiales. Fig. 11.20.

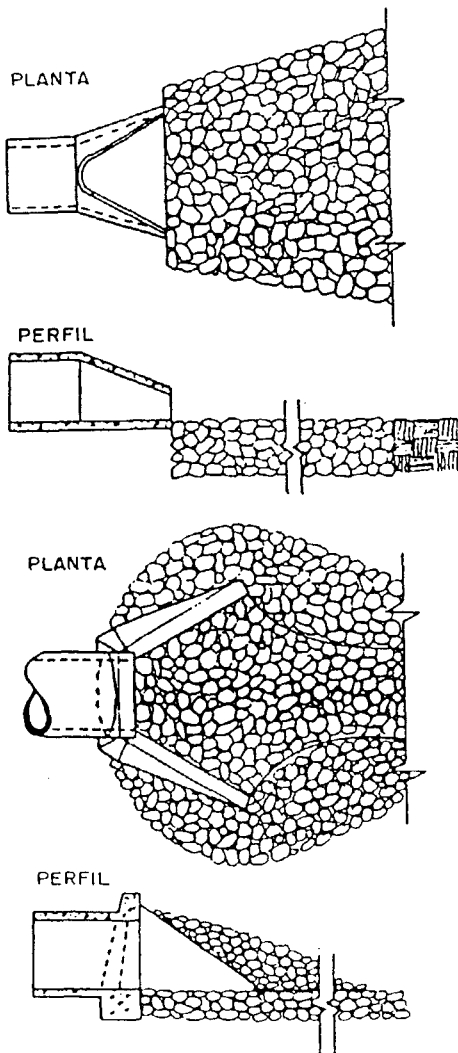


Figura 11.20. Protección de desagües.

Algunas recomendaciones generales de diseño son las siguientes:

- La longitud de protección debe ser de unas 6 veces el diámetro o anchura del canal.
- La pendiente de la estructura del canal receptor no debe exceder del 1 %.
- El extremo de la estructura de protección debe cubrir ligeramente el canal receptor.
- Periódicamente, o después de cada tormenta, deben inspeccionarse y repararse los daños.

3.6. Barreras de sedimentos

Las barreras de sedimentos son obras provisionales construidas de distintas formas y materiales, láminas filtrantes, sacos terreros, balas de paja, etc. Los objetivos de estas barreras son contener los sedimentos procedentes de la erosión, en lugares establecidos antes de que el agua pase a las vías de drenaje naturales o artificiales, y reducir la energía erosiva de las aguas de escorrentía que las atraviesan.

Se utilizan cuando las áreas desprotegidas son pequeñas y no producen una elevada cantidad de sedimentos.

Algunos factores a considerar en la instalación y diseño de los diversos tipos de barrera son los siguientes:

A. Barreras de láminas filtrantes. Fig. 11.21.

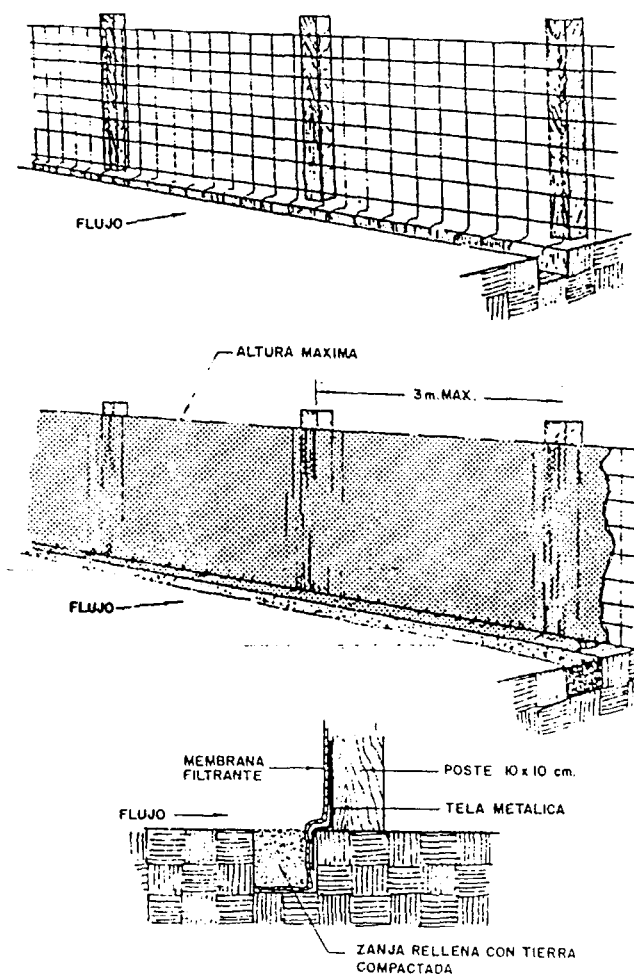


Figura 11.21. Barrera de lámina filtrante.

- Se construyen con postes, telas metálicas y geotextiles.
- Son estructuras temporales con una vida útil de unos 6 meses.
- El caudal límite de agua para estas barreras es de 30 l/s.
- Por cada 1.000 m² de superficie afectada debe dispo- nerse de unos 30 m de barrera.
- La longitud máxima de talud no debe exceder de 30 m.
- La pendiente de talud debe ser inferior al 50 % ó 2:1.
- La altura de la barrera no debe ser superior a 90 cm.

B. Barreras de balas de paja. Fig. 11.22.

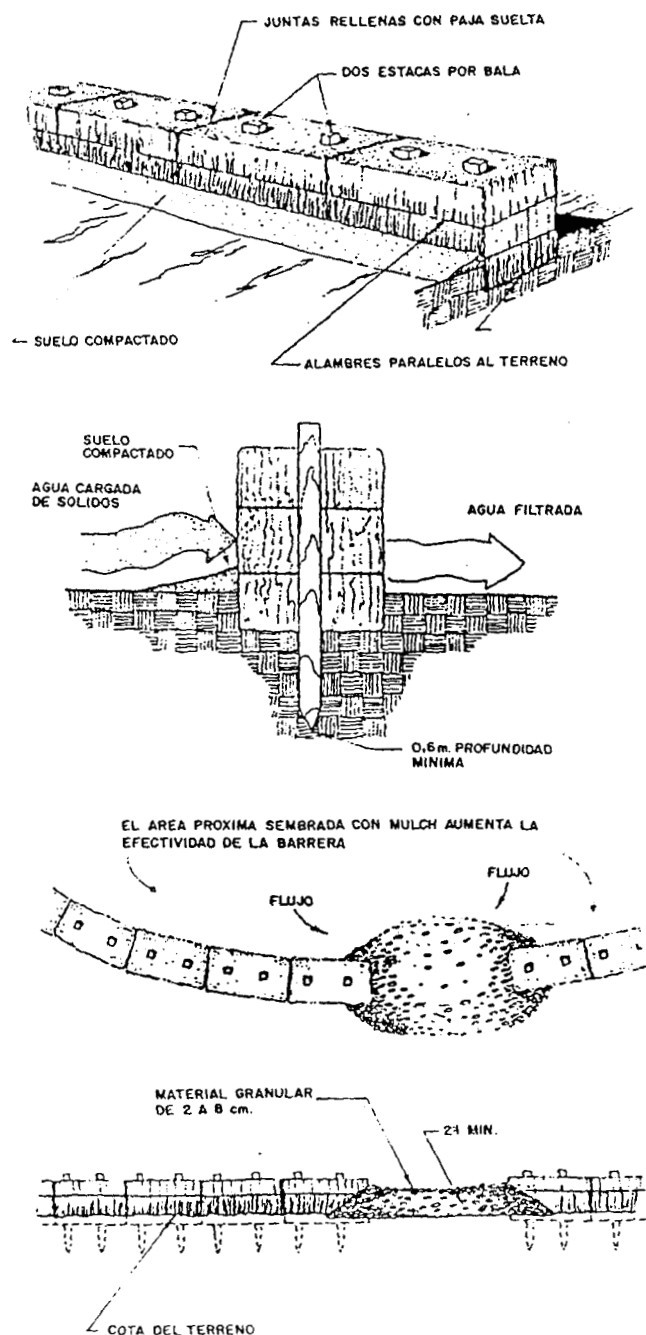


Figura 11.22. Barreras de balas de paja.

- Cada bala debe fijarse al terreno con dos estaca- madera.
- Las balas deben estar enterradas en una profun- d de 10 cm.
- La vida efectiva de estas barreras es inferior meses.
- Por cada 0,1 ha de terreno afectado deben emple- unos 30 m de longitud de barrera.
- La longitud máxima de talud no debe exceder de 30
- El talud máximo debe ser inferior del 50 % ó 2

C. Barreras de ramajes. Fig. 11.23.

- Se construyen con ramas y arbustos, procedentes de desbroce y limpieza de zonas a explotar, y láminas geotextiles o telas metálicas.
- La altura de las barreras debe ser, como mínimo, de 90 cm y la anchura de 1,5 m.
- Si se emplean láminas filtrantes, estas se fijarán al terreno mediante una pequeña zanja frontal de 10 x 10 cm y anclajes puntuales a ambos lados cada 90 cm

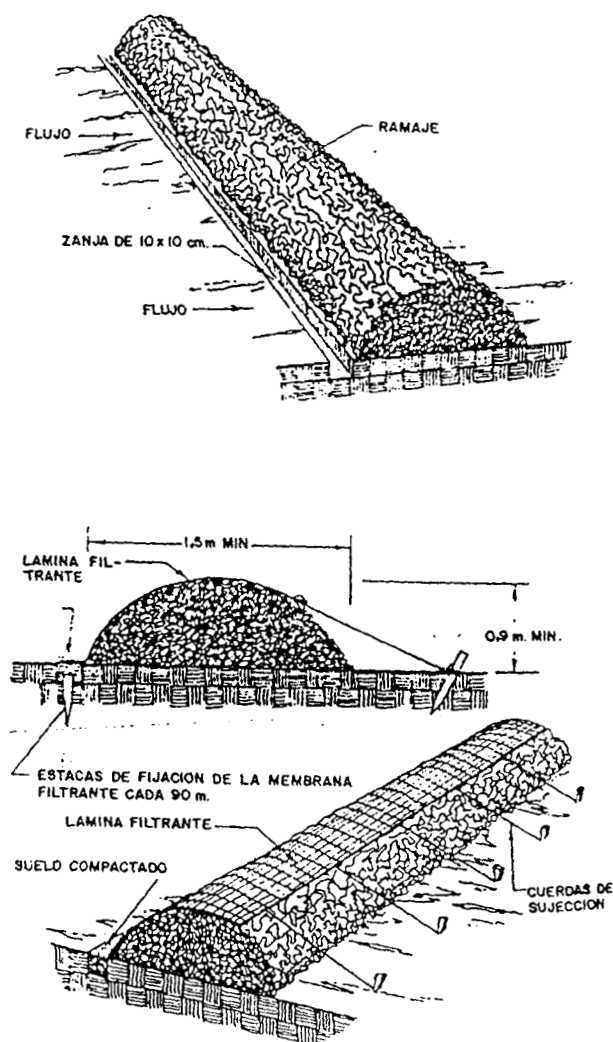


Figura 11.23. Barreras de ramajes.

D. Barreras de sacos terreros Fig. 11.24

- Se contruyen con una altura equivalente a la de dos sacos terreros.
- La fijación al suelo se realiza con estacas de madera o pies metálicos.

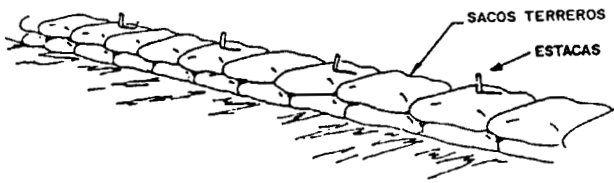


Figura 11.24. Barrera de sacos terreros.

En todos los casos después de cada aguacero debe efectuarse una inspección y reparación de daños, así como la limpieza de los sedimentos cuando estos alcanzan una altura equivalente a la mitad de la barrera.

3.7. Desagüe de taludes

El desagüe de taludes requiere también de obras provisionales y permanentes para prevenir la erosión de las superficies por el agua recogida sobre los mismos.

Las estructuras provisionales se emplean sólo durante el tiempo que se tarda en construir los sistemas definitivos de canalización de las aguas, tanto en taludes de desmonte como de terraplén.

Las bajantes, como también se conocen a estas obras, se utilizan en combinación con los diques de desvío que tienen las funciones de canalizar las aguas, tanto de lluvia como de drenaje, hasta puntos localizados en la cabecera de los taludes y evitar la erosión de las superficies expuestas de éstos. La altura mínima de los diques debe ser de 50 cm, y en los puntos de entrada a las bajantes se disponen también diques laterales para aminorar la energía del agua.

Como las bajantes de taludes pueden canalizar grandes volúmenes de agua y generar altas velocidades, debido a las pendientes de los taludes, en los puntos de descarga se deben construir disipadores de energía con escollera y hormigón; y revegetar además las zonas próximas.

A continuación, se indican los diferentes tipos de bajantes que más se utilizan en minería.

A. Bajante de tubería flexible. Fig. 11.25.

Es un sistema provisional de fácil instalación y montaje. En la Tabla 11.XVII se dan las dimensiones recomendadas de estas tuberías en función del área máxima a drenar para una pluviometría media.

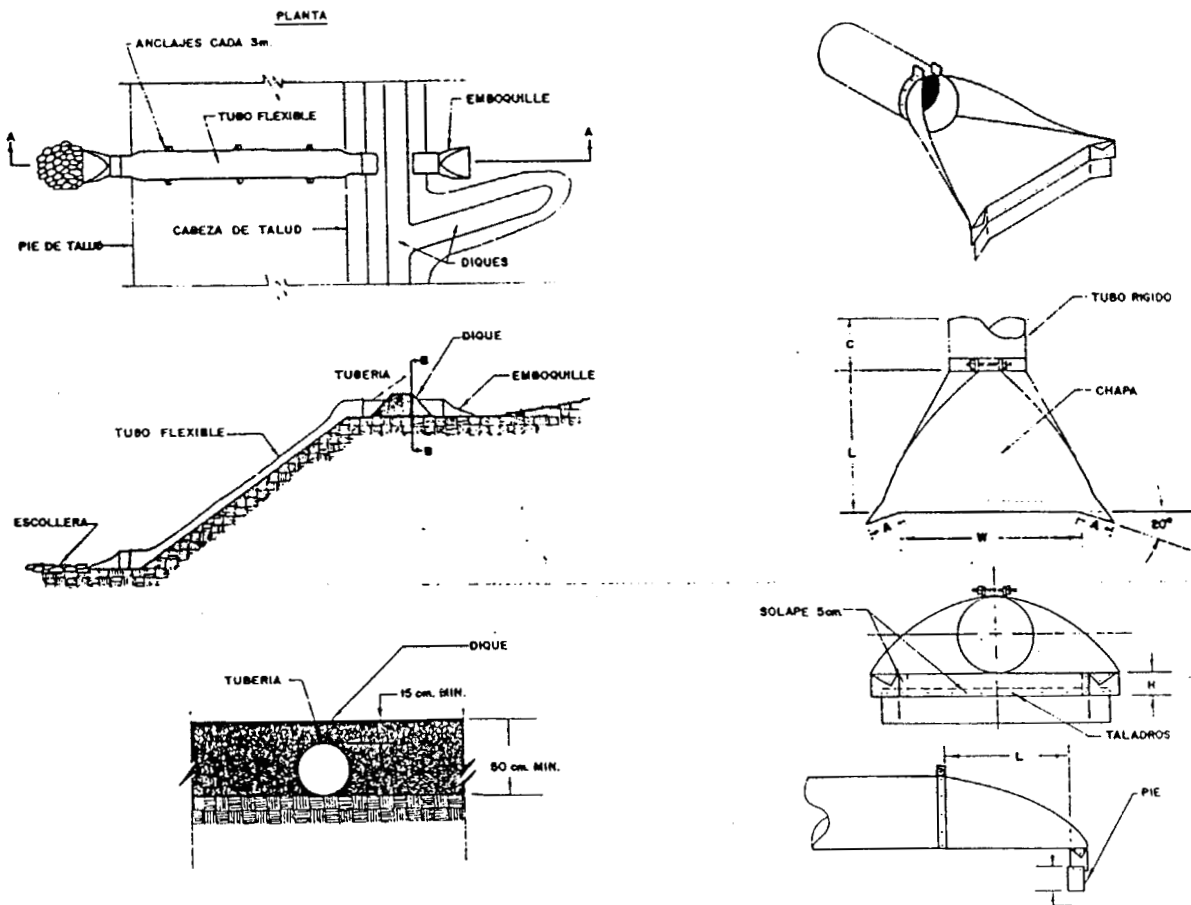


Figura 11.25. Bajante de tubería flexible.

TABLA 11.XVII

AREA MAXIMA A DRENAR (ha)	DIAMETRO DE LA TUBERIA (mm)
0,2	300
0,6	450
1,0	530
1,4	610
2,0	760

En los extremos de estas tuberías deben colocarse unos elementos encauzadores cuyas dimensiones, de acuerdo con la Fig. 11.25, son las indicadas en la Tabla 11.XVIII.

TABLA 11.XVIII

DIAMETRO DE LA TUBERIA	ESPESOR (mm)	DIMENSIONES (cm)				
		A	H	L	W	C
305	1,6	15	15	50	60	60
380	1,6	20	15	65	75	60
455	1,6	20	15	80	90	60
610	1,6	25	15	150	120	60
760	2,0	30	20	120	150	60
915	2,0	35	25	150	180	90
1.065	2,7	40	30	175	210	90
1.220	2,7	45	30	200	230	90
1.370	2,7	45	30	215	260	90
1.525	2,7	45	30	220	290	90

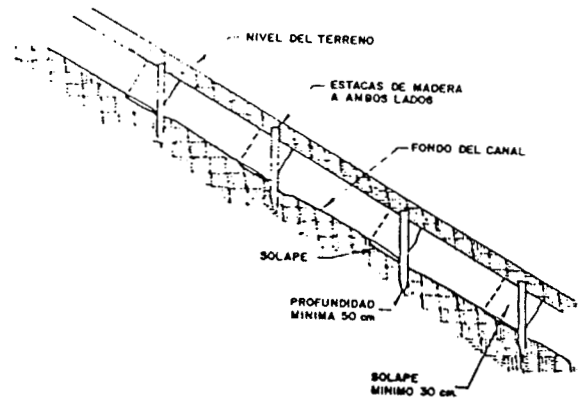
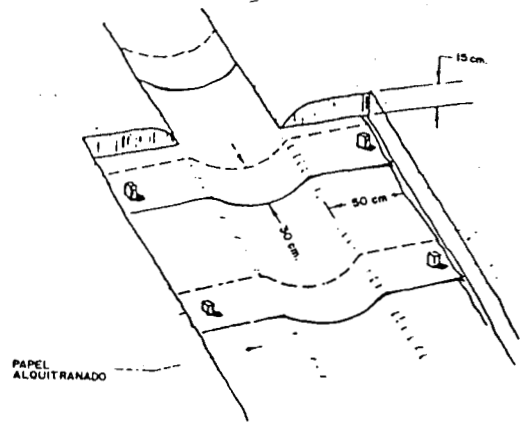


Figura 11.26. Bajante de papel alquitranado.

B. Bajante de papel alquitranado

Es un sistema barato y fácil de construir, pero con una vida útil de año y medio aproximadamente. Una vez excavado y perfilado el canal, se colocan los pliegos de papel especial de abajo hacia arriba, tal como se indica en la Fig. 11.26, solapándose entre sí y dejando en los bordes laterales unas franjas de unos 50 cm a cada lado, donde se irán colocando las estacas de anclaje y que, posteriormente, se recubrirán con unos 15 cm de material.

C. Bajante de lámina plástica

Es semejante al sistema anterior, con la única diferencia de que la lámina es de una sola pieza y no es necesario el solape de las prolongaciones. Fig. 11.27.

D. Bajante de tubos abiertos

Está construida por medios tubos metálicos u hormigón del mismo diámetro que se superponen en unas longitudes de unos 60 cm. Tanto el emboquille como el extremo de descarga se protegen, llegando incluso a hormigonarse en bajantes permanentes. Fig. 11.28.

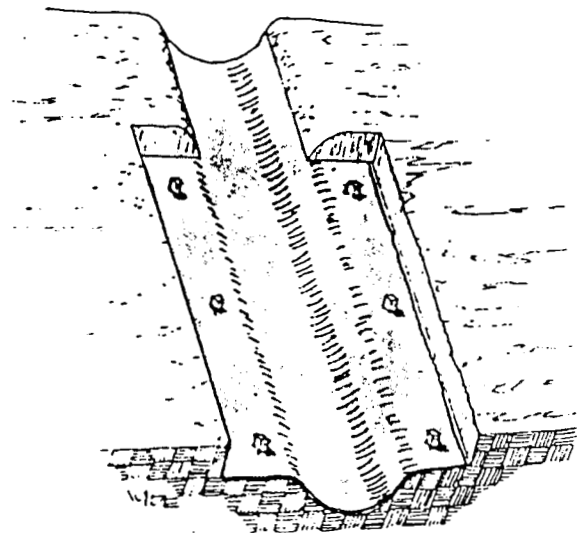


Figura 11.27. Bajante de lámina plástica.

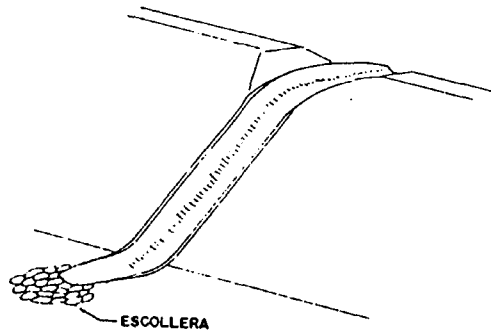
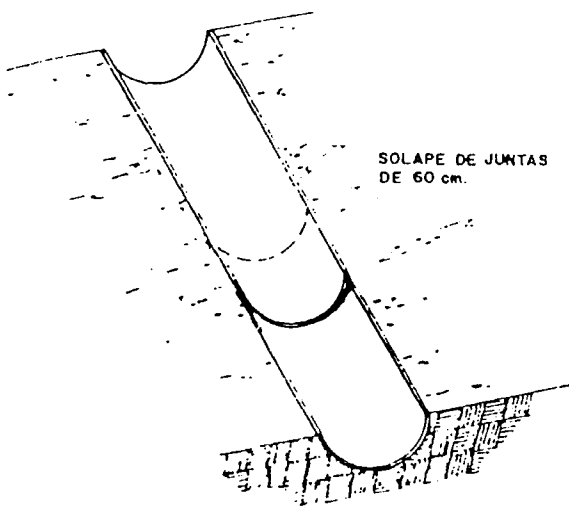
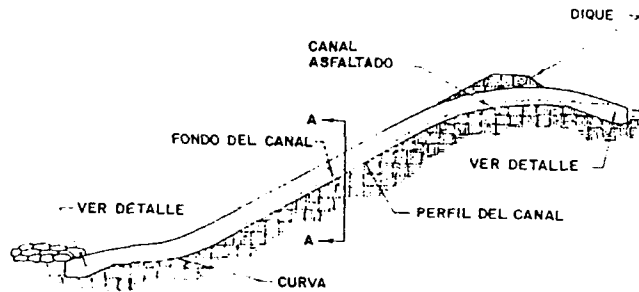


Figura 11.28. Bajante construida por medios tubos.



E. Desagüe de asfalto u hormigón. Fig. 11.29.

Estas son estructuras de tipo permanente que se construyen de la siguiente forma:

- Se excavan los canales sobre los taludes, con las dimensiones adecuadas, retirando toda la materia orgánica existente.
- Se aplican sustancias inhibidoras de la vegetación compuestas por clorato sódico, cloruro cálcico, boratos, arseniatos, etc.
- Una vez perfilado y compactado manualmente el canal, se coloca la mezcla de asfalto en frío compuesta por arena y alquitrán al 8 % o de hormigón en masa, distribuyéndolo y conformándolo manualmente con un espesor mínimo de unos 5 cm.

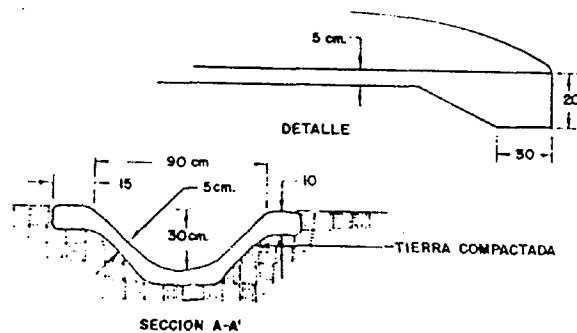


Figura 11.29. Bajante de asfalto.

F. Desagüe de hormigón encofrado

Estos canales son utilizados ampliamente en los terraplenes de las carreteras para dirigir las aguas desde la cabeza al pie de los taludes evitando la erosión. El procedimiento constructivo es semejante al anterior en lo relativo a la excavación y preparación del canal. Las piezas de hormigón se construyen con encofrados disponiendo de aletas y cortinas verticales de refuerzo cada 3 m que impiden el deslizamiento de las placas a lo largo del talud y la rotura de las mismas. Estas piezas pueden reforzarse con redondos de acero corrugado para obtener una mayor resistencia. El extremo inferior de descarga debe diseñarse de forma especial para evitar la erosión del agua y disminuir la energía de ésta. Fig. 11.30.



Foto 11.4. Bajante de hormigón en el talud de una escombrera.

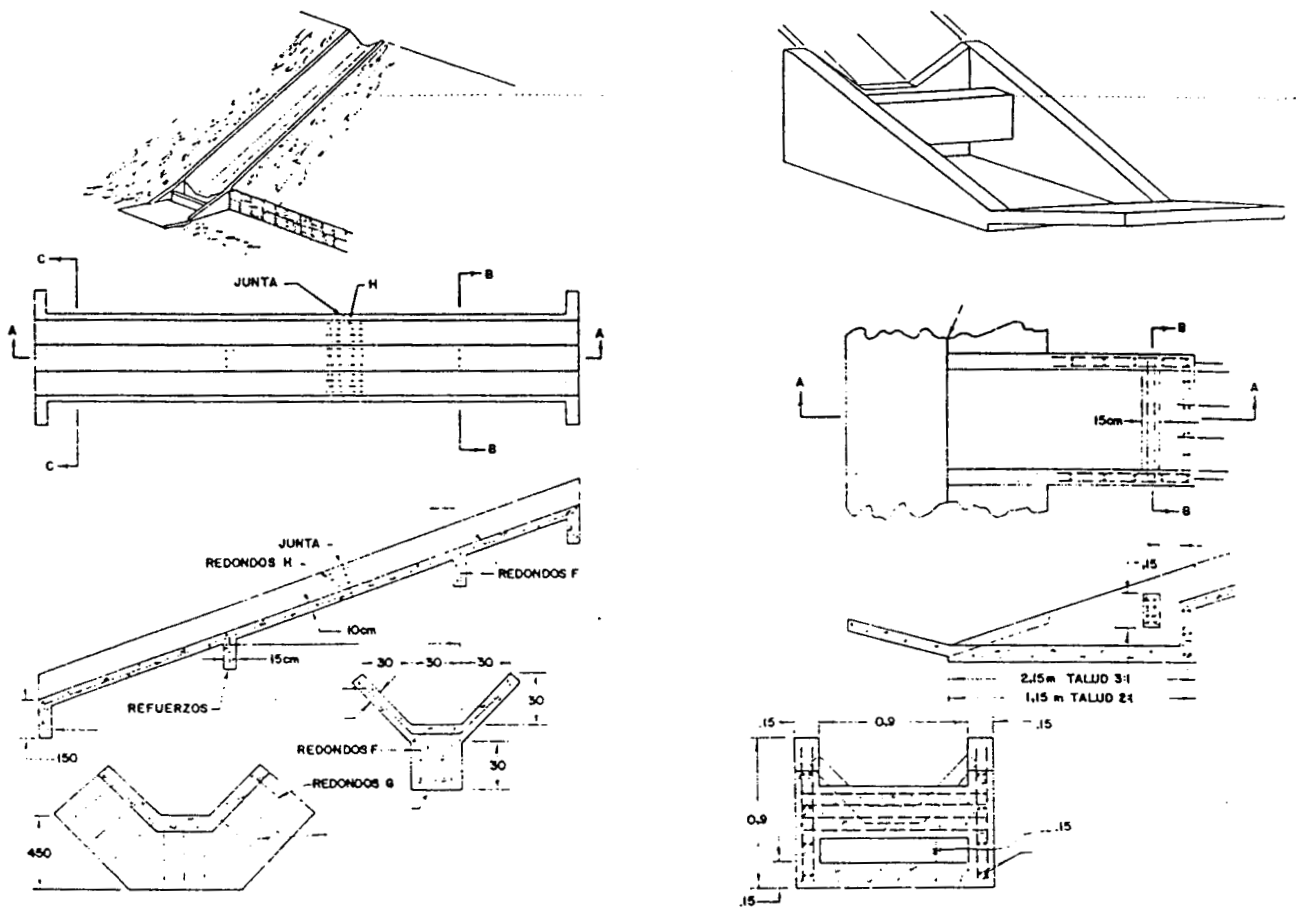


Figura 11.30. Bajante de hormigón encofrado.

3.8. Protección de bermas

Las bermas o terrazas de las escombreras diseñadas sobre el material compactado sirven para controlar la erosión de las aguas que discurren por los taludes y para permitir la sedimentación de los sólidos transportados.

Las bermas deben construirse tan pronto como se alcance la posición final de los taludes del vertedero. Las recomendaciones generales de diseño son:

- Por cada 30 m de longitud de declive se dispondrá de una berma de al menos 3 m de anchura.
- Las pendientes de las bermas hacia el interior deben ser del 1 % como mínimo y del 3 % como máximo.
- Las inclinaciones de los taludes entre bermas, si no se realiza un estudio de estabilidad, serán como mínimo de 3:1.
- Los materiales de las plataformas de las bermas y áreas adyacentes deben compactarse debidamente.
- Para la protección de las bermas y pies de los taludes frente a la erosión se aconseja su revegetación extendiéndose ésta unos 3 m en el pie del talud superior y en la cabeza del inferior.

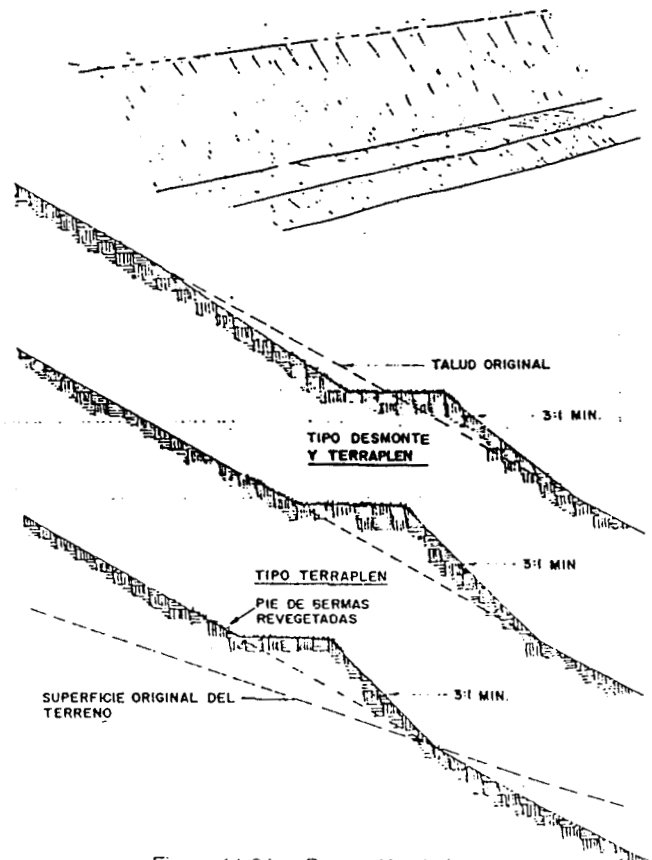


Figura 11.31. Protección de bermas.

3.9. Perfiles de los taludes

Los taludes de los vertederos y áreas constituidas por materiales sueltos y fácilmente disgregables deben modelarse con unos perfiles geométricos que garanticen la estabilidad y minimicen la erosión por el agua de escorrentía. Las investigaciones realizadas sobre los cuatro tipos de taludes que se representan en la Fig. 11.32 se resumen en las siguientes conclusiones:

- Los taludes cóncavos son los menos afectados por la erosión y los que producen menor cantidad de sedimentos, cambiando de forma más lentamente que otros perfiles.
- Los taludes convexos se erosionan más rápidamente y producen la mayor cantidad de sedimentos, cambiando de forma más rápidamente que otros perfiles.
- Los taludes uniformes y los mixtos son afectados en un grado intermedio, aunque los taludes muy uniformes pueden ser fuertemente erosionados por una simple tormenta.
- Los taludes de materiales restituídos tienden a desarrollar perfiles cóncavos en su parte media o inferior si se les da tiempo suficiente.
- La pendiente en la base del talud es la más significativa en lo referente al ritmo de producción de sedimentos y velocidad de cambio de forma del talud.

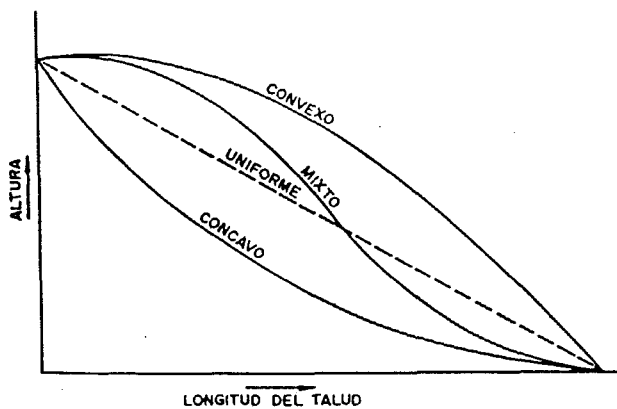


Figura 11.32. Tipos de perfiles de los taludes.

Estos cinco puntos deben considerarse durante la planificación y construcción de los taludes en las condiciones comentadas. Así, en la práctica, interesa aproximarse lo más posible al perfil de equilibrio y para ello, durante el afinado de los taludes, debe procederse al rebaje de las crestas de la parte superior, consiguiendo una forma convexa, y rellenar con esos materiales la parte inferior dejándola con un perfil cóncavo; el tercio central quedará de este modo rectilíneo. (Jardón, 1984).

3.10. Balsas de decantación

3.10.1. UBICACION Y TAMAÑO

Las balsas de decantación son las últimas estructuras que se disponen en la cadena de la erosión. Sus funciones son: retener las aguas durante un periodo de tiempo

suficiente que permita clarificarlas al decantarse los sólidos que arrastran en suspensión y posibilitar el almacenamiento de esos materiales hasta que se realice la limpieza de dichas estructuras.

Las balsas que más se utilizan son de dos tipos: Las excavadas en el propio terreno, con o sin revestimiento, y las construidas como pequeñas presas de tierra. Estas últimas, son las más fáciles de hacer, siempre que la topografía lo permita, ya que en casi todas las explotaciones se dispone de materiales estériles.

La ubicación de estas estructuras suele elegirse aguas abajo y en las proximidades del área donde se realizan las actividades extractivas o el vertido de los estériles. Se debe procurar que la interferencia con esos trabajos sea mínima y que exista un buen acceso a las balsas para realizar las labores de mantenimiento y limpieza.

En cuanto a la capacidad de las balsas, ésta debe ser tal que permita retener un determinado porcentaje de los sólidos en suspensión y, simultáneamente, un volumen suficiente para su almacenamiento durante cierto periodo de tiempo. Guy (1979) recomienda un volumen de diseño capaz de albergar los sedimentos producidos durante 3 años, estimándose estos a partir de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo o cualquier otro método empírico; o 300 m³ por cada hectárea de terreno afectada que se drena y un volumen mínimo de 100 m³, si se demuestra que la eliminación de sedimentos por otros sistemas de control es igual al volumen de almacenamiento reducido. Pueden emplearse mayores capacidades de almacenamiento cuando se desee reducir la frecuencia de las labores de limpieza.

El procedimiento a seguir en el cálculo detallado de la capacidad de las balsas es el siguiente:

- 1.º Se obtiene la distribución granulométrica de las partículas de sólidos en suspensión que pueden afluir a las balsas.

TABLA 11.XIX

PARTICULA DE SUELO	INTERVALO DE DIAMETROS (mm)
Arena muy gruesa	2-1
Arena gruesa	1-0,5
Arena media	0,5-0,25
Arena fina	0,25-0,10
Arena muy fina	0,10-0,05
Limo	0,05-0,002
Arcilla	< 0,002

- 2.º Se determina el tamaño medio de las partículas que han de depositarse en las balsas hasta alcanzar la concentración en sólidos permitida para el vertido del efluente en un cauce exterior.
- 3.º Se calcula la velocidad de sedimentación de las partículas, en función del diámetro de estas. De acuerdo con la Ley de Stokes esta se determina con la expresión:

$$V_s = \frac{g}{18\mu} (S - 1) \cdot D^2$$

donde:

- V_s = Velocidad de caída de la partícula (cm/s).
- g = Aceleración de la gravedad (981 cm/s²).
- μ = Viscosidad cinemática del fluido (cm²/s).
- S = Peso específico de la partícula.
- D = Diámetro de la partícula supuesta esférica (cm).

Las partículas más pequeñas que pueden decantarse en la práctica son las de limo (0,002 mm), que descienden unos 17 cm en 24 horas cuando el agua se encuentra a 0° C. Las partículas de arcilla pueden tardar en decantarse desde 30 horas hasta incluso años.

La viscosidad cinemática del agua depende de la temperatura de ésta, pues conforme se enfría se vuelve más viscosa. Tabla 11.XX.

TABLA 11.XX

TEMPERATURA °C	VISCOSIDAD CINEMATICA μ (cm ² /s)
0	0,01792
5	0,01519
10	0,01308
15	0,01141
20	0,01007
25	0,00897
30	0,00804

- 4.° Se determina el caudal que llegaría a la balsa conociendo la superficie a drenar y la precipitación máxima esperada para un tiempo de retorno dado. Normalmente, se considera el caudal generado por la precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años.
- 5.° Se calcula el área de la balsa.

$$A = \frac{Q}{V_s}$$

donde:

- A = Área de la balsa requerida (m²).
- Q = Caudal máximo que llega a la balsa (m³/s).
- V_s = Velocidad crítica de sedimentación (m/s).

Ejemplo: Se supone la existencia de una mina donde la precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años es de 127 mm. El suelo tiene una textura franca limosa en el que se estima un coeficiente de escorrentía de 0,53. La superficie total a drenar es de 12,5 ha.

El volumen máximo de agua que llegará a la balsa en un periodo de 24 horas será:

$$R = 0,53 \cdot 0,127 \cdot 12,5 \cdot 10^4 = 8.414 \text{ m}^3$$

esto supone un caudal de 0,0974 m³/s. Sin embargo, este caudal es probablemente menor, ya que la precipitación

tendrá lugar en un tiempo inferior a las 24 horas. Para estimar el periodo de tiempo durante el cual se producirá la máxima precipitación puede emplearse la siguiente fórmula:

$$T = 236(E_s - 5)$$

siendo:

- T = Duración intensa de la precipitación (s).
- E_s = Precipitación total en mm en 24 horas y un periodo de retorno de 10 años.

Resulta pues:

$$T = 236(127 - 5) = 28.792 \text{ s}$$

El caudal máximo se calcula ahora dividiendo el volumen total de agua «R» por la duración de la precipitación máxima «T».

$$Q = \frac{R}{T} = \frac{8.414 \text{ m}^3}{28.792 \text{ s}} = 0,292 \text{ m}^3/\text{s}$$

La superficie de agua que se necesita para la balsa con el fin de eliminar todas las partículas sólidas con un diámetro mayor o igual a 0,005 cm se calcula con $A = Q/V_s$, como:

$$V_s = \frac{981}{18 \cdot 0,017} (2,65 - 1) \cdot (0,005)^2 = 0,132 \text{ cm/s}$$

resulta:

$$A = \frac{Q}{V_s} = \frac{0,292}{0,00132} = 221,2 \text{ m}^2$$

Como en la realidad las partículas no son esféricas y el agua no está en reposo, se aplica a la superficie necesaria un factor corrector de 1,2, con lo que:

$$A = 221,2 \cdot 1,2 = 265,45 \text{ m}^2$$

La profundidad mínima de la balsa será entonces:

$$H = \frac{R}{A} = \frac{8.414 \text{ m}^3}{265,45 \text{ m}^2} = 31,7 \text{ m}$$

Como esa profundidad calculada sería muy difícil de conseguirla en la práctica, se aumentará la superficie ocupada por la balsa en áreas a alcanzar un diseño más viable y operativo. Así, por ejemplo, si se piensa en una superficie de 1.700 m² la profundidad que se necesitaría sería de 4,95 m.

Esta nueva profundidad será más práctica y permitirá reducir la turbulencia del agua, incrementar el tiempo de residencia y eliminar partículas sólidas menores que la arena muy fina.

La profundidad obtenida corresponde a la que ocuparía el agua, por lo que es preciso incrementarla a continuación con el volumen ocupado por los sólidos decantados y disponer de un margen de seguridad frente a posibles errores de cálculo, acción del oleaje, etc. Para evitar el

desbordamiento de la presa, el desnivel desde la cota máxima de la lámina de agua hasta la cota del aliviadero debe ser como mínimo de 30 cm, siempre que esta tenga una longitud inferior a los 150 m; cuando la dimensión esté entre 150 m y 300 m se dispondrá de 45 cm de margen, y para más de 300 m de 60 cm.

En la práctica, es frecuente la construcción de diferentes balsas en serie, mejor que una sola de mayor tamaño. Las razones por las que se utiliza esta disposición son las siguientes:

- El paso de agua de una balsa a otra mejora el tiempo de retención y, consecuentemente, la eliminación de los sólidos de suspensión.
- La construcción de balsas pequeñas suele ser más fácil que la de una estructura grande.
- En caso de ser necesaria la limpieza de los lodos de una balsa, ésta se realiza con medios más convencionales cuando tienen dimensiones más reducidas.
- Los problemas de estabilidad son menores en las balsas pequeñas.



Foto 11.5. Balsa de decantación.

3.10.2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

En las Figs. 11.33 y 11.34 se reflejan los principales elementos constructivos de una balsa de decantación del tipo presa de tierra.

El aliviadero principal consiste, generalmente, en un tubo vertical o chimenea de metal corrugado que se conecta a una tubería horizontal que se extiende por debajo del dique. La parte superior de la tubería debe ser protegida para evitar su obstrucción por objetos flotantes y disponerse de un dispositivo anti-vórtice, consistente en una tubería concéntrica cerrada por la parte superior con una placa. Fig. 11.35. El punto de descarga del agua será debidamente protegido frente a la erosión.

El aliviadero de emergencia sirve para la rápida evacuación de las aguas acumuladas durante una tormenta o aguacero en el lago de la presa, asegurando el mantenimiento del resguardo de seguridad. Se recomienda que este aliviadero no se realice sobre zonas de relleno para evitar el acaravamiento, que la sección de control tenga al menos 6 m de longitud y que los taludes laterales del canal sean mayores de 2H:1V.

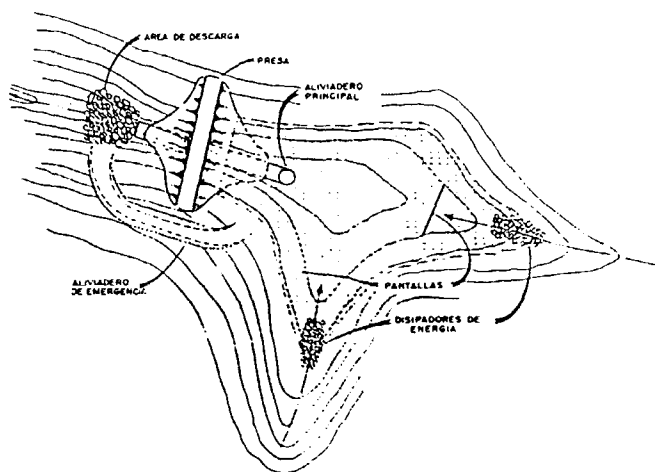


Figura 11.33. Esquema en planta de una balsa de decantación del tipo presa.

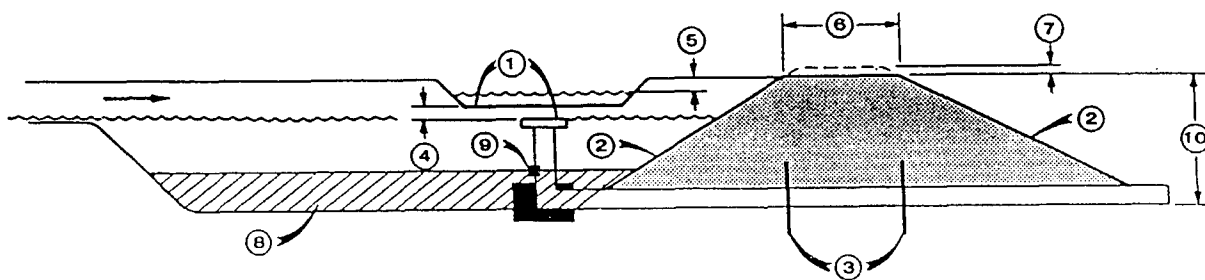


Figura 11.34. Especificaciones de diseño de las balsas de decantación. (Skelly and Loy, 1979).

NUMERO	DESCRIPCION	< 3 m DE ALTURA	> 3 m DE ALTURA
1.	Capacidad de aliviaderos	25 años/ 24 horas precip.	100 años/24 horas precip.
2	Taludes de construcción	2:1 máximo, 5:1 mínimo Combinado	2:1 máximo, 5:1 mínimo 1,5 F.S.
3	Collares antifiltrantes	No requiere	Requiere
4	Altura desde el aliviadero principal al de emergencia	30 cm mínimo	
5	Altura desde la coronación hasta la superficie del aliviadero de emergencia	30 cm. mínimo	
6	Anchura de coronación de la presa	$(H + 10)/5$	
7	Realce adicional (m)	0,05 H	
8	Capacidad de almacenamiento de sedimentos	300 m ³ /ha afectada o 3 años de sedimentos acumulados	
9	Equipo de desagüe	Mantenimiento del nivel de sedimentos	
10	Altura de la presa	Medida desde el tacón de la presa hasta la corona	

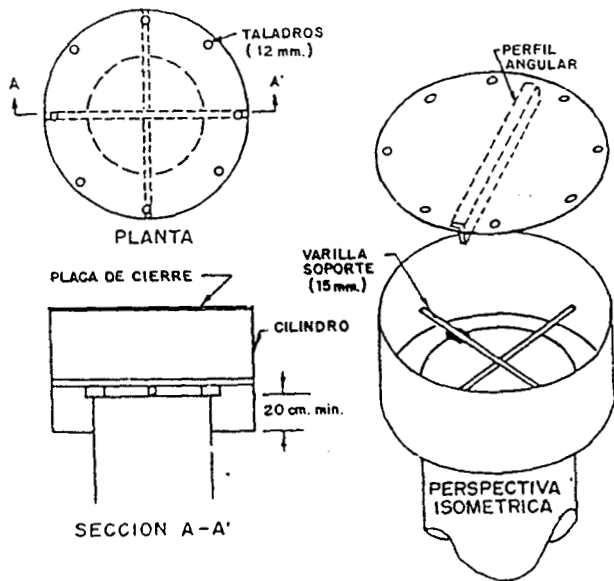


Figura 11.35. Dispositivo antivortice.

Los elementos de desagüe para evacuar el área decantada son muy variados. El tipo más empleado, consiste en una chimenea o torre exenta situada en una zona en la que se espera que siempre se acumule agua de decantación.

Dispone de unas aberturas a través de las que cae el agua decantada, para luego circular por una tubería conectada en su base y que atraviesa la base del dique. Este sistema tiene la ventaja de requerir muy poco mantenimiento y de seguir siendo un elemento de drenaje tras el abandono de la presa. Fig. 11.36.

Existen otros sistemas de desagüe como es el de tipo subterráneo, de sífon, etc, pero que son más costosos, más caros de mantenimiento y menos prácticos.

Con el fin de aumentar el recorrido del agua contaminada una vez que ésta entra en el lago de la presa, y evitar la existencia de «zonas muertas» de decantación, se dispone en ocasiones de pantallas o barreras situadas entre el aliviadero principal y el punto de entrada del agua a la presa. Fig. 11.37.

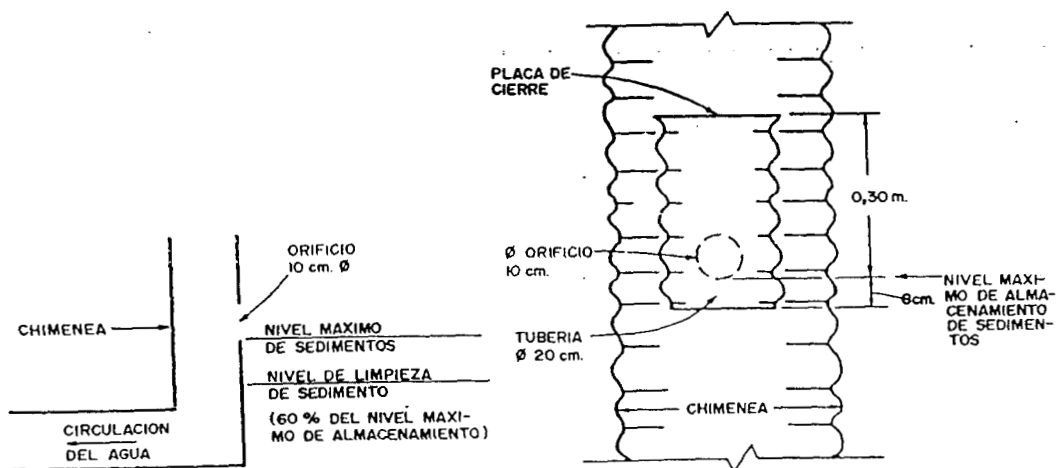


Figura 11.36. Detalle de la chimenea de desagüe.

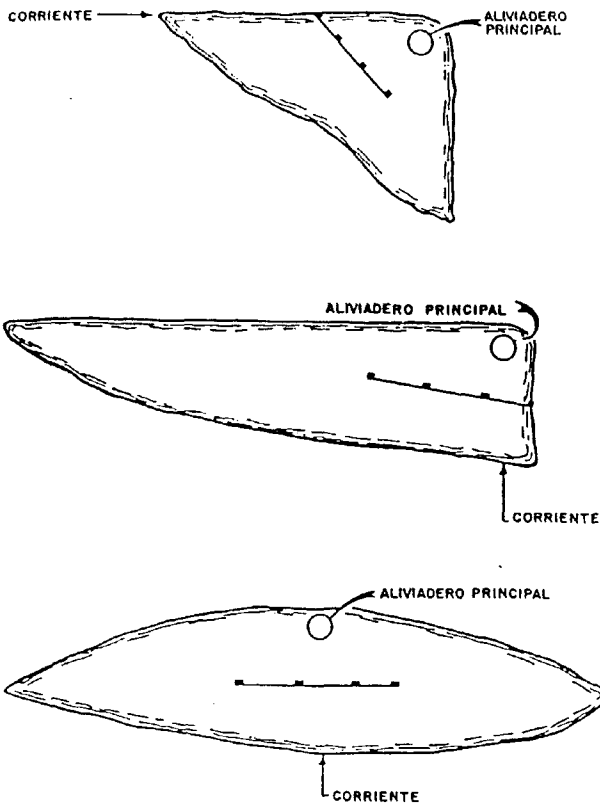


Figura 11.37. Barreras para evitar las zonas muertas de circulación del agua.

Una zona delicada es la de paso de la tubería de desagüe bajo la base del dique, ya que por defectos de compactación pueden establecerse flujos periféricos al conducto que den lugar a una erosión de los materiales adyacentes y rotura del dique. Para evitarlo se colocan dos placas reflectoras a una distancia entre sí inferior a 14 veces la dimensión de las placas sobre la tubería. Fig. 11.38. Estos elementos sólo se recomiendan cuando la altura de las balsas es superior a los 3 m o cuando los materiales del dique son poco arcillosos y el diámetro de la tubería de desagüe es mayor de 25 cm.

En cuanto a la construcción de los diques, ésta se llevará a cabo con material limpio de suelo, raíces, restos de vegetación, desechos de carbón o arenas y gravas muy permeables. Los taludes máximos permitidos son de 2:1 y la suma aritmética de los taludes de aguas abajo y aguas arriba no podrá ser menor de 5:1. El talud de aguas arriba de las balsas es, normalmente, más tendido que el de aguas abajo y está protegido por escollera frente a la acción erosiva del oleaje que pueda producirse. El talud de aguas abajo se suele proteger mediante revegetación.

Antes de construir el dique, es necesario limpiar la base del suelo y vegetación, así como excavar una zanja, de entre 0,6 a 1,2 m de ancho a todo lo largo de la presa y con taludes laterales de 1:1.

La altura del dique debe ser, como mínimo, un 5 % mayor que la altura de diseño para permitir la sedimentación. Si los equipos de transporte del material de construcción se utilizan para compactar las tongadas, de 15 a 20 cm de espesor, se deberá incrementar la citada altura en un 10 %. La anchura de coronación no debe ser nunca me-

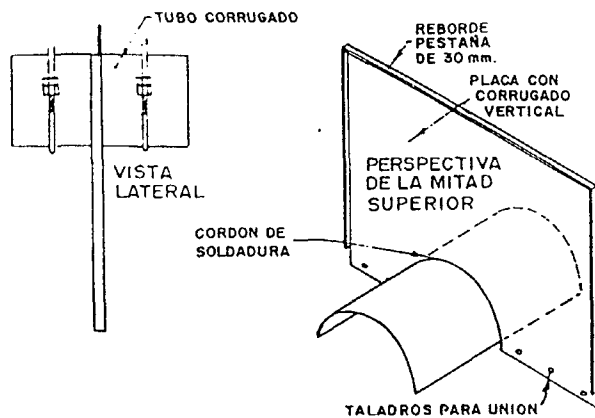


Figura 11.38. Placas reflectoras en la tubería de desagüe bajo el dique.

nor que la suma de la altura en metros más 10,5 dividido por cinco.

Cuando la altura de diseño de la presa exceda de 6 m, el diseño del dique debe ser proyectado por un técnico para que tenga un factor de seguridad superior a 1,5.

Por último indicar que cuando las superficies afectadas que se desean drenar son inferiores a las 2 ha, es suficiente con disponer de pequeñas balsas o trampas de decantación temporales con una capacidad de 130 m³/ha. En estos casos los sedimentos acumulados deben retirarse cuando la capacidad quede reducida a la mitad.

Los taludes laterales, cuando las balsas se construyen excavando pequeños huecos o cuando se utilizan materiales sueltos compactados, deben ser de 20H:1V como mínimo.

Un aspecto que no debe olvidarse, es el de impedir el acceso a las presas a las personas ajenas a las explotaciones, y a los propios animales, ya que suelen constituir un lugar atractivo, especialmente para los niños, y al mismo tiempo peligroso.

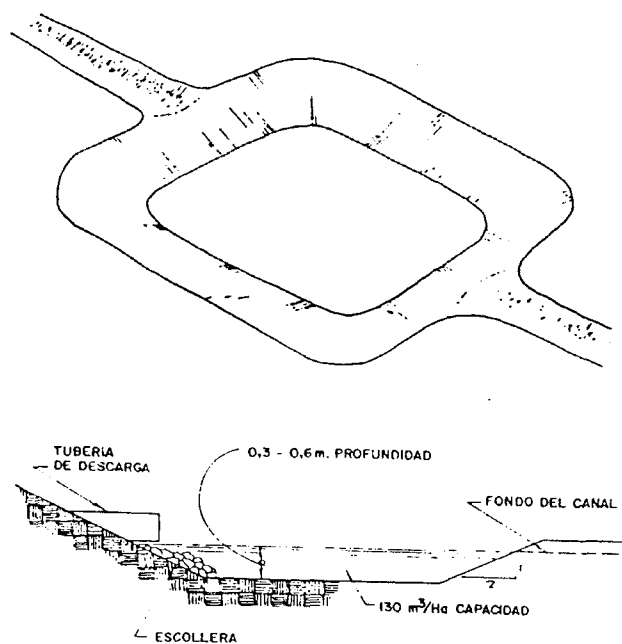


Figura 11.39. Trampa de sedimentos excavada.

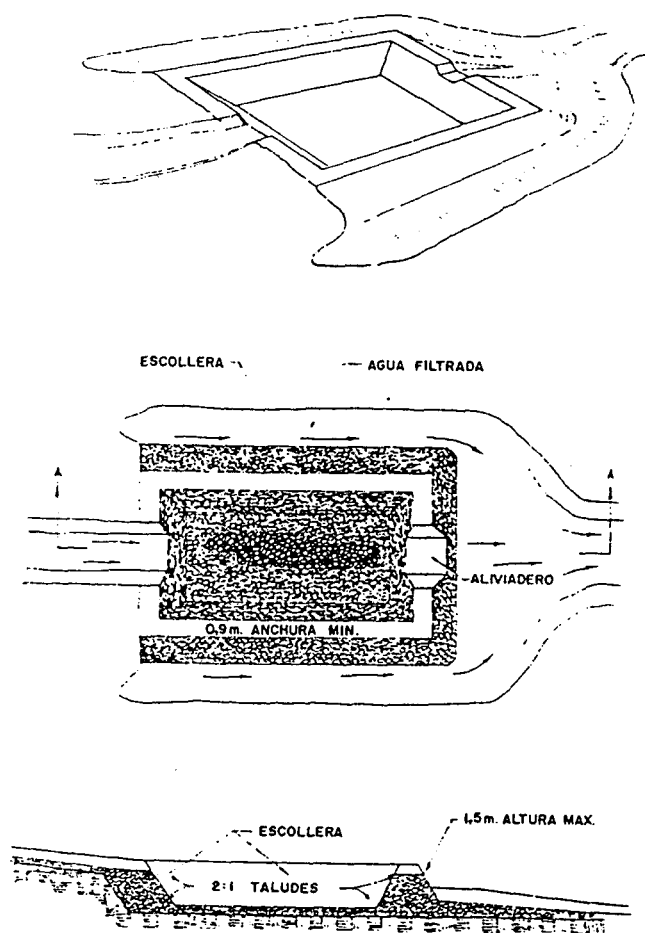


Figura 11.40. Trampa de sedimentos de escollera.

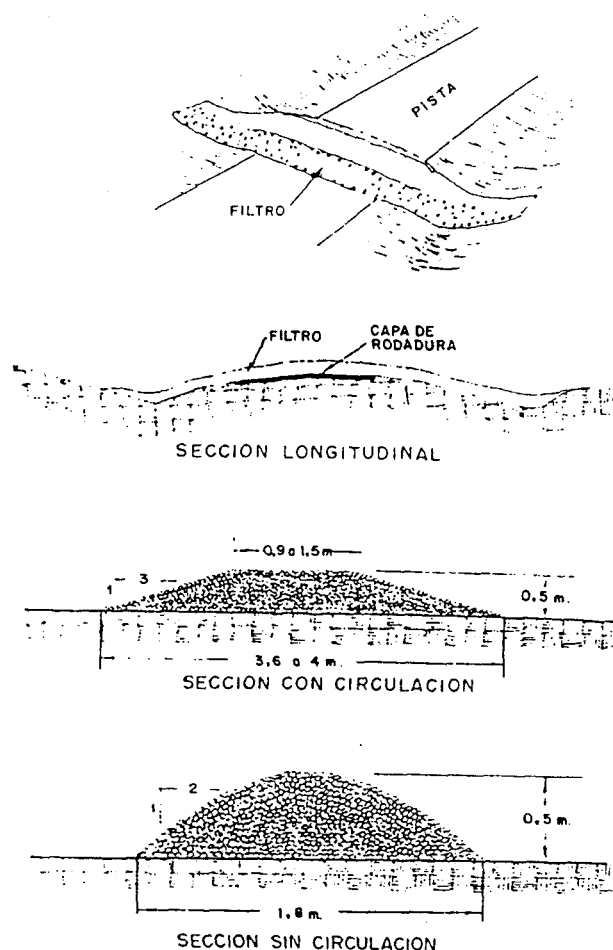


Figura 11.41. Filtros de superficie.

3.11. Filtros de superficie

Los filtros de superficie son estructuras temporales utilizadas para reducir la velocidad del agua que circula por las pistas y las cunetas. No interfieren al transporte ya que permiten el tráfico de vehículos. Fig. 11.41.

Algunos criterios generales de diseño son:

- Las alturas alcanzarán al menos 40 cm.
- Los taludes laterales según exista o no circulación de vehículos serán de 3:1 ó 2:1.
- La anchura mínima de la base será de unos 2 m, si no existe tráfico de vehículos, y de 3,5 m a 4 m, en caso contrario, con una anchura de coronación en este último caso de 1 a 1,5 m.
- El espaciamiento entre filtros dependerá de la pendiente de la superficie que recoge agua por encima de éstos. Para pendientes inferiores al 2 % se recomienda una distancia de 60 m y entre el 2 y el 7 % un espaciamiento de 30 m.
- El material de construcción será grava con un contenido en finos inferior al 5 %.

Después de cada tormenta, o al menos una vez por semana, se revisarán y repararán para garantizar su función.

BIBLIOGRAFIA

- ANONIMO: «Conservation and Reclamation for Mined Lands a Handbook of Recommended Practices for Mining Operations». South Carolina Land Resources Commission, 1983.
- ANONIMO: «Manual for Erosion and Sediment Control in Georgia». State Soil & Water Conservation Committee of Georgia, 1979.
- GENERALITAT DE CATALUNYA: «Recomanacions Tècniques per la Restauració i Acondicionament dels Espais Afectats per Activitats Extractives». Departament de Política Territorial i Obres Públiques, 1987.
- HERAS, R.: «Metodología y Normas de Cálculo de Crecidas de Proyecto». Dirección General de Obras Hidráulicas. Centro de estudios Hidrográficos, 1983.
- KIRKBY, M. J. y MORGAN, R. P. C.: «Erosión de Suelos» LIMUSA, 1980.
- LOPEZ JIMENO, E. y C.: «Control de la Erosión y Contaminación de las Aguas». II Curso sobre Alteraciones Ambientales y Restauración de Terrenos en Minería a Cielo Abierto. Fundación Gómez Pardo, 1985.
- LYLE, E. S.: «Surface Mine Reclamation Manual». Elsevier, 1987.
- MOPU: «Instrucción de Carreteras-Drenaje. Norma 5.1-IC». 1965.
- MOPU: «Guía para la Elaboración de estudios del Medio Físico: Contenido y Metodología». Centro de Estudios de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, 1984.
- SKELLY and LOY: «A Compliance Manual-Methods for Meeting OSM Requirements». 1979.

INTEGRACION PAISAJISTICA. CRITERIOS Y TECNICAS

1. INTRODUCCION

En este capítulo, tras una breve introducción al estudio del paisaje, se aportan un conjunto de pautas y directrices encaminadas a reducir el impacto visual de las explotaciones a cielo abierto, aplicando criterios generales de diseño más racionales que posibilitan, además, la recuperación de los terrenos afectados a un menor coste.

2. ESTUDIO DEL PAISAJE

El término paisaje engloba numerosas acepciones, ya que se ha utilizado en diversos campos de las artes y las ciencias. Ciertos autores estudian el paisaje bajo un prisma puramente estético y como combinación de determinados elementos del medio: el relieve, las formas, los colores, etc.; otros lo contemplan bajo una perspectiva ecológica, entendiéndolo como el resultado del «complejo de interrelaciones derivadas de la interacción de rocas, agua, aire, plantas y animales» (Dunn, 1974). En este sentido podría definirse el paisaje como un «fenosistema», es decir, como la expresión visual del sistema de relaciones subyacente (González Bernáldez, 1973). También a veces se incluye la presencia humana, hablándose entonces de paisaje cultural: «escenario de la actividad humana» (Laurie, 1970).

El terreno como componente del paisaje está sometido a continuos cambios, lentos y poco profundos cuando se trata de causas naturales, y rápidos e intensos cuando se llevan a cabo actividades como las mineras con importantes modificaciones fisiográficas.

Actualmente, el paisaje se considera como un recurso natural más y como parte del patrimonio cultural del hombre, debido a su relativa escasez y a que es un bien cada vez más demandado, por lo que debe conservarse y gestionarse racionalmente.

El estudio del paisaje es una herramienta básica en la definición de los criterios que han de regir el diseño del remodelado del terreno y la revegetación, en los planes de restauración.

A través de él es posible identificar qué elementos visuales del medio se han visto afectados por las explotaciones y de que manera lo han sido, y, por otro lado, conocer la estructura paisajística general del entorno de éstas, para después, poder decidir qué tipo de medidas

correctoras van a ser necesarias para conseguir la integración paisajística del área alterada.

2.1. Elementos y Componentes del paisaje

Una vez reconocido el paisaje como recurso natural y elemento integrador del medio, que puede estudiarse no sólo desde una perspectiva subjetiva, sino de forma sistemática y objetiva, su análisis puede abordarse, en primer lugar, mediante la identificación y caracterización de los elementos y componentes visuales que conforman el territorio observado.

Los elementos visuales básicos a partir de los cuales es posible definir y diferenciar distintos paisajes, son: la forma, la línea, el color, la textura, la escala y el espacio (Smardon, R. C.; 1979).

— **La forma.** Se define como la masa o volumen de un objeto u objetos que aparecen unificados, tanto por la configuración que presentan en la superficie, como por el emplazamiento conjunto sobre el paisaje, Fig. 12.1.

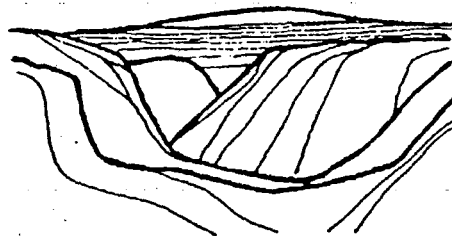


Figura 12.1. Las formas irregulares y las composiciones de grandes volúmenes presentan relevancia visual.

— **La línea.** Se puede definir como el camino real o imaginario que percibe el observador cuando existen espacios diferenciados por el color, la forma, la textura, etc. El borde de la silueta de un objeto recortada contra el cielo o fondo escénico, la separación entre diferentes tipos de vegetación, los corredores visuales, etc., son ejemplos que ponen de manifiesto el elemento línea.



Foto 12.3. Paisaje focalizado.

Sin embargo, un paisaje constituido por los mismos elementos visuales no siempre se observa de igual manera, depende de las condiciones en que se realice dicha observación y de la visibilidad del territorio en ese momento. Los factores modificadores de la visión del paisaje son los que se indican a continuación. (Escribano, et al, 1987).

- **Distancia.** A medida que aumenta la distancia desde el punto de observación, se pierde nitidez. Algunos autores llegan a definir tres zonas de condiciones de visibilidad diferentes: zona próxima o primer plano, donde se distinguen con claridad los objetos, zona o plano medio, donde se aprecian las formas y volúmenes pero se pierden los detalles singulares de los objetos, y zona alejada o plano de fondo en donde sólo se distinguen las siluetas.

Al aumentar la distancia se modifican los elementos visuales básicos, los colores se vuelven más pálidos y menos brillantes, la intensidad de las líneas se debilita, la textura pierde contraste y el grado se vuelve más fino.

- **Posición del observador.** Un objeto resulta más visible cuanto más cerca esté del observador. Se usan tres términos para definir la posición del observador, posición superior, normal e inferior, que corresponden a la visión efectuada desde un plano por encima, al mismo nivel o por debajo, respectivamente, Fig. 12.4.

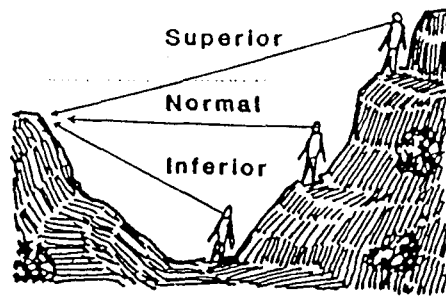


Figura 12.4. Posición del observador.

- **Iluminación.** La forma en que esté iluminado un paisaje puede modificar su observación. Las condiciones de luz varían con la situación atmosférica y sufren modificaciones estacionales y diarias. El paisaje se puede interpretar de distinta manera según la posición de la fuente de luz, frontal (detrás del observador), lateral y posterior (delante del observador y detrás del objeto: contraluz). Fig. 12.5.

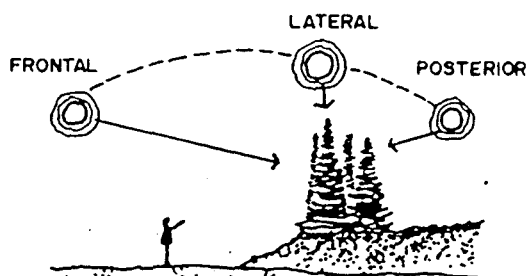


Figura 12.5. Posición de la fuente de luz respecto al observador.

- **Condiciones atmosféricas.** Modifican las propiedades visuales de los elementos, acentuándolos. Por ejemplo, la nubosidad reduce la intensidad de los colores y la presencia de nieve o hielo aumenta la geometría de las formas.

La tierra o los aspectos externos de la superficie terrestre, el agua, la vegetación y las estructuras o elementos artificiales de origen antrópico, constituyen los componentes del paisaje, Fig. 12.6.

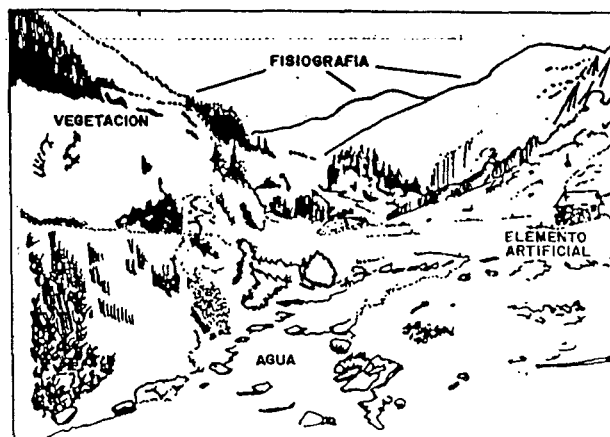


Figura 12.6. Componentes del paisaje.

2.2. Cuenca visual

El ámbito de estudio se fijará en función de las particularidades geográficas y visuales del territorio afectado por la actividad minera y de las características intrínsecas de la explotación.

La división de la zona en unidades de paisaje cuya respuesta visual sea lo más homogénea posible, requiere un alto nivel de detalle. Las unidades pueden ser irregulares extensas, generalmente asociadas a factores naturales del medio, regulares, mediante superposición de una malla poligonal, u obtenidas por combinación de las anteriores (Aguilo, M. et al, 1984).

Sin embargo, la delimitación de la cuenca visual es, teóricamente, la zonación más rigurosa y la que mejor define el área de estudio.

La cuenca visual corresponde a la superficie de terreno visible desde un punto o conjunto de puntos (explotación minera). Generalmente, se obtiene mediante la proyección de rayos visuales alrededor de cada punto de observación. La amplitud de los rayos se fija de antemano, cuanto más pequeño sea el ángulo, mayor información se obtiene sobre la morfología del territorio circundante. Los rayos se interrumpen cuando alcanzan un obstáculo que impide la visión más allá de éste.

La cuenca visual presenta una serie de propiedades intrínsecas que determinan la aptitud del territorio para absorber visualmente las modificaciones o alteraciones producidas.

- **Tamaño de la cuenca visual.** La explotación es potencialmente más visible, cuanto más grande sea la superficie de la cuenca visual.
- **Porcentaje de huecos o zonas de sombra.** La posibilidad de ocultación de la actuación está inversamente relacionada con el porcentaje de huecos: cuanto menor sea el número de éstos, más visible es la explotación.
- **Alargamiento de forma.** Las cuencas alargadas y focalizadas son más sensibles a las perturbaciones producidas que las panorámicas, donde las vistas no están «dirigidas» y el daño visual causado en un sector no perturba el resto del territorio.

2.3. Alteración del paisaje natural

Las explotaciones mineras producen un efecto visual negativo que puede alterar el carácter del paisaje.

Las causas de estas alteraciones son diversas. Lo más frecuente es que haya una falta de ajuste o un excesivo *contraste* entre los elementos visuales de la explotación y los del entorno.

Este contraste puede provenir de cualquiera de los elementos o de varios de ellos a un tiempo. Por ejemplo, se puede hablar de contraste de formas y líneas entre la geometría de las escombreras de una mina a cielo abierto y las formas suaves y blandas del terreno, o el contraste cromático introducido por una cantera en una zona donde el colorido dominante sea el verde homogéneo de un pinar.

Otra causa de alteración es que los elementos físicos de la explotación (huecos, escombreras, edificaciones, etc.) se conviertan en factores dominantes en relación a

los existentes, especialmente en términos de escala y de posición.

La *dominancia en escala* viene determinada por la ocupación relativa de cuencas visuales en términos de área del plano visual relativo. Se producen cuando los elementos físicos de la explotación son desproporcionados en tamaño respecto de los componentes del paisaje circundante.

La *dominancia por posición* es función de la relación espacial de la explotación con los componentes dominantes del paisaje (por ejemplo, si en un paisaje dominado por una línea de cumbres, las escombreras de una explotación interrumpen dicha línea), y de las condiciones de visibilidad del paisaje, como sucede en los paisajes cerrados o focalizados donde las explotaciones son más conspicuas que en los paisajes panorámicos, ya que en los primeros la dirección de las vistas están muy dirigidas y cualquier elemento extraño rompe el sistema de flujos visuales y se convierte en elemento dominante en el paisaje, mientras que en los paisajes panorámicos la dirección de las vistas no está dirigida.

2.4. Técnicas de simulación

Los análisis visuales deben tener un carácter dinámico, ya que paulatinamente las explotaciones y su entorno sufren cambios. Por tal motivo, dentro de los estudios del paisaje es conveniente realizar simulaciones de las diferentes situaciones que irán alcanzando las explotaciones, con el fin de tomar en cada momento las medidas correctoras más adecuadas e incluso evaluar los impactos visuales.

Las técnicas de simulación son actualmente muy variadas y se vienen aplicando con profusión por los planificadores y arquitectos paisajistas. El primer paso suele consistir en la representación gráfica de la topografía por medio de croquis esquemáticos en tres dimensiones, hechos a mano o mediante ordenador. Si se realizan con este último medio, se parte de un plano con curvas de nivel para digitalizarlas u obtener las coordenadas de numerosos puntos de la superficie con vistas a modelizar ésta tras una interpolación numérica.

Con los programas apropiados, es posible obtener perspectivas desde diferentes puntos de vista, simular cambios en los frentes de trabajo, comparar alternativas, evaluar la eficiencia de ocultación de las pantallas, etc. En la Figs. 12.7 y 12.8 se recogen algunos de estos ejemplos.

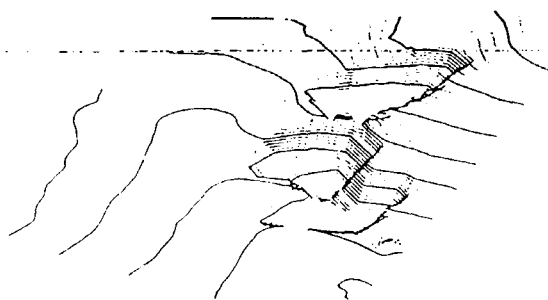


Figura 12.7. Representación gráfica del terreno por medio de bloques hechos con ordenador.

Con el desarrollo de la informática gráfica, hoy en día, las simulaciones pueden incluso utilizarse en la etapa de restauración, pues al incorporar los colores a los modelos geométricos es posible determinar las medidas para minimizar los contrastes cromáticos o incluso mostrar el crecimiento de la vegetación a lo largo del tiempo.

Otra técnica consiste en la utilización de fotografías del área de explotación, obtenidas desde la superficie y desde el aire. A partir de una situación original dada, es posible efectuar diferentes montajes para simular cambios o

alteraciones del entorno captado desde un punto dado. Estos documentos son a veces imprescindibles para un correcto estudio de evaluación de impactos y proyecto de restauración.

Por último, otro sistema consiste en la realización de maquetas. Estos modelos se construyen de forma modular de tal manera que cada uno de los estados de la mina queda materializado a escala. Es la técnica más costosa, pero ilustra muy bien el progreso de las labores y la situación final que se prevé alcanzar.

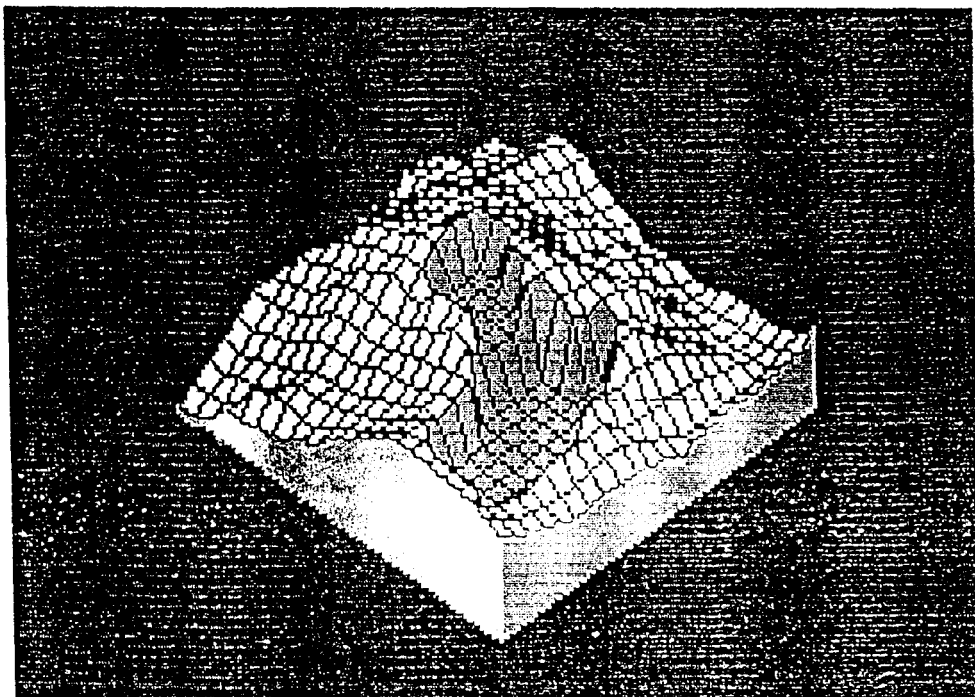
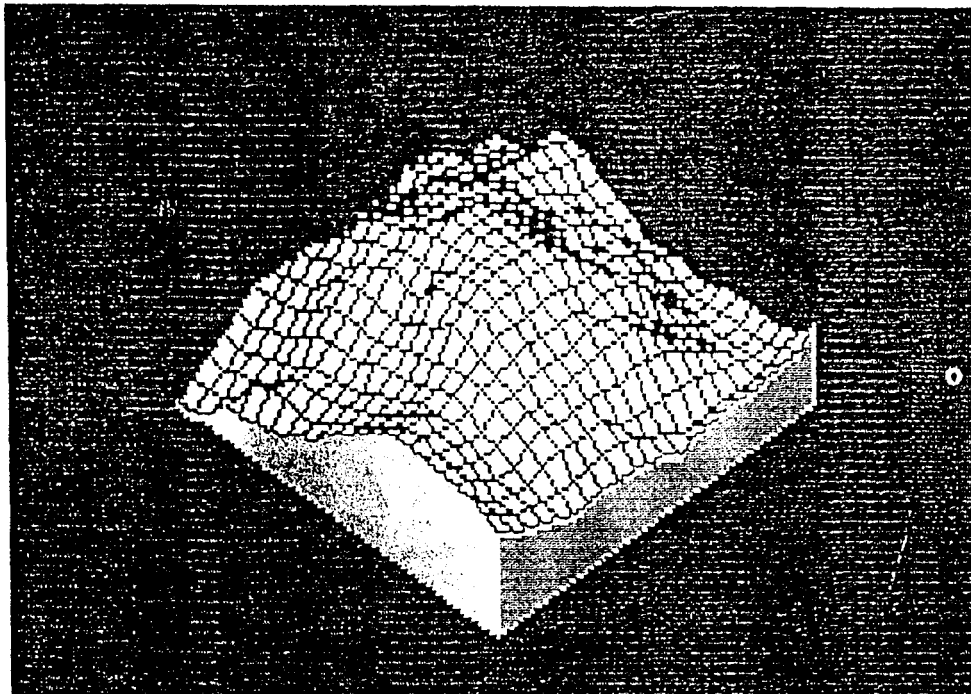


Fig. 12.8. Simulación de las distintas fases de explotación de una cantera.
(P. J. Morán, 1989).

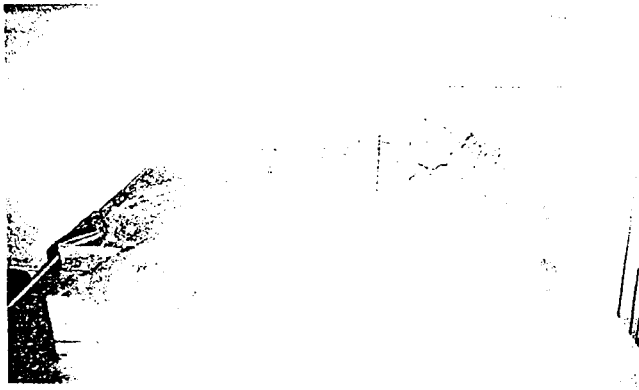


Foto 12.4. Maqueta representativa de una cantera y su entorno.

En la etapa de presentación de los Proyectos de Explotación y Restauración a los Organismos Oficiales y Autoridades, para obtener los permisos oportunos, las técnicas de visualización constituyen una herramienta muy importante de negociación y convencimiento.

3. FUENTES DE IMPACTO VISUAL

La identificación y caracterización de impactos realizadas sobre explotaciones a cielo abierto muestran que algunas de las alteraciones más importantes son las producidas por las modificaciones fisiográficas. La configuración final del terreno como medida correctora del impacto pasa a ser una de las etapas fundamentales dentro de los Proyectos de Restauración y, consecuentemente, parte esencial del diseño en los Planes de Explotación.

Los cambios de fisiografía natural se producen por la excavación de grandes huecos y por la creación de depósitos estériles de gran volumen y con formas que contrastan con las naturales. Además, el grado de humanización, causa también de impacto visual se ve intensificado por la introducción de elementos artificiales dentro del área de explotación y zonas próximas: pistas de acceso, plantas de tratamiento, instalaciones auxiliares, líneas eléctricas, presas de recogida de agua, canales perimetrales, etc.

Los impactos visuales producidos por las actividades extractivas pueden clasificarse en cinco grandes grupos, según donde se originen y la fuente de los mismos.

3.1. Áreas de excavación

La intrusión visual de las áreas de excavación depende de diversos factores, entre los que se encuentran: la naturaleza de la explotación, las características paisajísticas del entorno, el tamaño del hueco, etc.

En principio, no tiene por qué existir una relación directa entre las dimensiones de las áreas de extracción y el impacto visual, pues a veces es mayor la agresión de las pequeñas explotaciones mal diseñadas que la producida por minas de grandes dimensiones con proyectos bien ejecutados.

El contraste de colores entre las superficies activas de los frentes y el entorno es uno de los aspectos que más

destaca, por ejemplo en las canteras de calizas y margas donde las rocas desnudas presentan colores más claros que los del terreno natural.

Otro impacto visual importante se suele producir cuando el hueco de las excavaciones rompe la línea de cumbreras, modificándose la fisiografía original y destacando las formas artificiales. También la introducción de formas geométricas muy lineales y planas, como son las constituidas por los bancos de explotación, bermas, pistas, etc., llaman la atención de los observadores.

3.2. Escombreras de estériles

Las técnicas convencionales de deposición de estériles sólidos y embalsamiento de las pulpas residuales de las plantas de tratamiento, producen, por lo general, una agresión paisajística importante. La magnitud del problema varía de acuerdo con el tipo de mineral explotado, las características del yacimiento y la topografía del entorno, siendo más acusada en aquellos casos donde no se puede efectuar un autorrelleno del hueco o donde el proceso de recuperación mineralúrgico produce una gran cantidad de material estéril.

Los métodos constructivos tienen una gran influencia en este tipo de alteración, ya que, dependiendo del mismo, se podrá, o no, proceder a la recuperación desde los momentos iniciales o realizar ésta una vez se finalice la vida de la mina.

Un caso excepcional de impacto visual es el que se produce en algunos casos por la existencia de depósitos de materiales que contienen piritas u otros contaminantes que dificultan o imposibilitan la implantación de la vegetación, al producirse efluentes ácidos o inhibir el crecimiento de las distintas especies, perdurando en tal estado durante tiempo indefinido.

3.3. Instalaciones fijas

La construcción de plantas fijas para el tratamiento de los minerales y el mantenimiento de la maquinaria son otra fuente de impacto visual. Según el tipo de mineral de que se trate el proceso de preparación y/o concentración será distinto y, consecuentemente, lo serán las dimensiones de las plantas.

En el caso de materiales para áridos las operaciones que se realizan son la conminución y el cribado, por lo que se precisa una superficie de dimensiones reducidas para los equipos mecánicos y cintas transportadoras, y algo mayor para el acopio de materiales.

Las instalaciones más complejas son las correspondientes a minerales metálicos, pues además de las etapas de preparación mecánica: trituración, molienda, clasificación, etc., debe realizarse un proceso de concentración posterior: flotación, medios densos, tostación y lixiviación, etc., del que se genera un gran volumen de residuos que es preciso tratar antes de su vertido, así como las operaciones finales del mineral, espesamiento, filtrado, secado, etc. Con el fin de aprovechar la gravedad en el flujo de materiales, que es muy importante, estas instalaciones poseen gran altura y ocupan grandes extensiones, estando su ubicación próxima a las minas para reducir los costes de transporte, pero sobre áreas no mineralizadas. Así pues, son construcciones que producen una

gran intrusión visual, además de otro tipo de alteraciones como son el polvo, el ruido, etc.

En las minas subterráneas, además de las instalaciones de tratamiento, edificios de oficinas, etc., destacan, por su forma y altura, los castilletes de extracción. Son construcciones metálicas o de hormigón, «esbeltas», que constituyen todo un símbolo de la actividad minera.

En cuanto a los talleres, oficinas, estaciones de servicio, etc., en las grandes minas a cielo abierto y algunas subterráneas, son instalaciones que pueden llegar a ocasionar cierto impacto visual, si no se cuidan su ubicación y diseño.

Por último, cuando se abandonan las instalaciones por cierre de una mina deben realizarse un conjunto de trabajos de acondicionamiento: demolición de las cimentaciones y obras civiles, retirada de acopios, cerramiento de huecos, etc.

3.4. Equipos móviles

Los equipos mineros producen una alteración paisajística temporal, debido a los colores tan vivos que poseen. En ningún caso se deben abandonar tales máquinas, pues de lo contrario se contribuirá a magnificar la alteración paisajística y el peligro de accidentes.

3.5. Polución del agua y el aire

La emisión de contaminantes físicos y químicos a la atmósfera o al agua puede llegar a causar una alteración estética. El polvo producido en las escombreras y presas que se deposita en las proximidades llega a alcanzar grandes áreas con colores blanquecinos, incidiendo además sobre la fauna y la flora. Lo mismo sucede con los cursos de agua que transportan partículas sólidas en suspensión o tienen un carácter ácido y manifiestan los efectos inducidos de éstas.

También las escombreras en ignición, además de producir gases malolientes y nocivos, constituyen otra forma de intrusión visual que no escapa a la percepción de observadores próximos.

4. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA INTEGRACION DE EXPLOTACIONES Y ESCOMBRERAS EN EL PAISAJE

El diseño de la configuración final del terreno tras la explotación de un depósito de mineral está condicionado por un conjunto de factores que pueden agruparse bajo cinco epígrafes genéricos: geológicos, topográficos, geotécnicos, estéticos y económicos.

La consideración de estos factores plantea, en ocasiones, soluciones contradictorias o de conflicto, pero la remodelación final ha de llegar a una solución de compromiso con miras al logro de los siguientes objetivos:

- Una operación minera rentable y una restauración económicamente viable.
- Un aprovechamiento del mineral que alberga el depósito, lo más racional posible.

- Una topografía final estructuralmente estable que minimice los riesgos de deslizamiento o colapso de los taludes y facilite el drenaje natural del agua superficial.
- Una geometría final que no suponga un riesgo potencial de daños a personas o animales.
- Una integración del conjunto lo más acorde con las características del paisaje natural circundante.

Por otro lado, ha de tenerse en cuenta que la remodelación condiciona otros aspectos de la recuperación de los terrenos, como por ejemplo la evolución de los suelos y el establecimiento de la vegetación, y que ha de adaptarse a los requerimientos que exigen los usos del suelo previstos para la zona.

Todos esos condicionantes obligan a contemplar el modelado del terreno dentro de la planificación global del proyecto de restauración, incluso en sus etapas iniciales, y su viabilidad, tanto técnica como económica, exige que se realice simultáneamente con la explotación.

Los huecos de excavación y los depósitos de estériles producidos por la minería a cielo abierto constituyen, como ya se ha indicado, uno de los elementos de mayor intrusión en el entorno, provocando cambios en las características visuales de la zona, proporcionales a la alteración fisiográfica producida, y alteraciones en la calidad paisajística debido a la introducción de colores, texturas y formas discordantes con las del entorno y que suponen una pérdida de naturalidad.

Para minimizar en lo posible esas alteraciones visuales y ecológicas que producen las actividades extractivas, y conseguir una mejor integración paisajística, es necesario aplicar una serie de criterios de diseño, que aún siendo básicos o elementales, constituyen, en algunos casos, una herramienta de enorme utilidad. Esas medidas que se exponen en los epígrafes siguientes, pueden dividirse en tres tipos de técnicas, basadas en el alejamiento, la ocultación y el enmascaramiento.

5. HUECOS DE EXPLOTACION

5.1. Ubicación y ocultación natural de las explotaciones

Es bien conocido que los depósitos de minerales se distribuyen espacialmente sobre la corteza terrestre de forma aleatoria y que deben explotarse allí donde se encuentren. Si bien esto es cierto para la totalidad de los recursos, no lo es tanto en aquellos de los que se dispone de un mayor potencial, como son los productos de cantera y algunos minerales industriales. En estos casos, en que los factores geológicos no son tan determinantes, las posibilidades de actuación en cuanto a la localización son mayores, existiendo una única limitación de índole económica, ya que el valor de esos productos no es alto y, por consiguiente, no soportan grandes distancias de transporte hasta los centros de consumo.

Cuando sea factible, los criterios referentes a la ubicación de la explotación se basarán en el alejamiento de los núcleos urbanos y zonas transitables, la centralización de las canteras y el aprovechamiento de los accidentes topográficos y de la vegetación natural.

Una vez investigado y evaluado el depósito a explotar, la primera pauta a seguir con relación al diseño, es la de aprovechamiento de la topografía del entorno. Debe evitarse la apertura de canteras en laderas de cerros o lomas próximas a carreteras, autopistas u otros corredores visuales, así como zonas habitadas desde las cuales sean visibles. Los huecos de excavación pueden llevarse a cabo en las vertientes opuestas, Fig. 12.9, de manera que el terreno natural actúe como medio de ocultación.

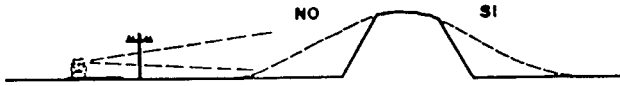


Figura 12.9. Localización de una cantera con respecto a un corredor visual.



Foto 12.5. Canteras ubicadas en la proximidad de una vía de comunicación muy frecuentada.

Dentro de una misma zona, el propio diseño del hueco puede plantearse con diversas configuraciones Fig. 12.10. Lo ideal es proceder a la apertura de la cantera en la zona más alta con una geometría troncocónica, dejando sin extraer una parte del yacimiento para que sirva de pantalla visual frente a los observadores próximos e incluso de pantalla sónica contra los ruidos producidos por las vola-

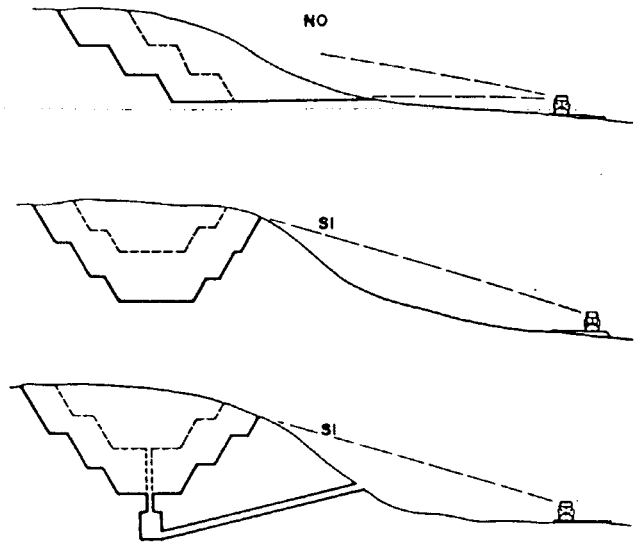


Figura 12.10. Diseño del hueco de explotación para ocultar los taludes finales.

duras y la maquinaria. Otra ventaja de ese diseño, cuando los terrenos son adecuados, es la de aprovechar en el futuro el hueco creado para depósitos de agua, de residuos urbanos, etc.

El complemento ideal a esa variante lo constituye el sistema de transporte por cinta y trituración dentro del hueco de la explotación, pues con ello se consigue eliminar gran parte de las pistas de acarreo exteriores que se precisarían con medios convencionales, disminuir la contaminación atmosférica por polvo y ruidos producidos por la maquinaria y reducir los costes operativos. El principal inconveniente del sistema estriba en la elevada inversión inicial que se requiere en la preparación de la infraestructura minera, cámara de trituración, pozo vertical y galería de transporte, así como en la maquinaria.

Como ejemplos más relevantes cabe citar, en el extranjero, el de la cantera de granito de Glensanda, situada en la costa de Escocia y con una producción anual de 7,5 millones de toneladas, y en España, el futuro proyecto de explotación de caliza de Solvay en Santander.

Por otro lado, la vegetación natural existente es otro elemento aprovechable en la ocultación, Fig. 12.11, de manera que ésta quede interpuesta entre el observador y el área ocupada por la explotación.

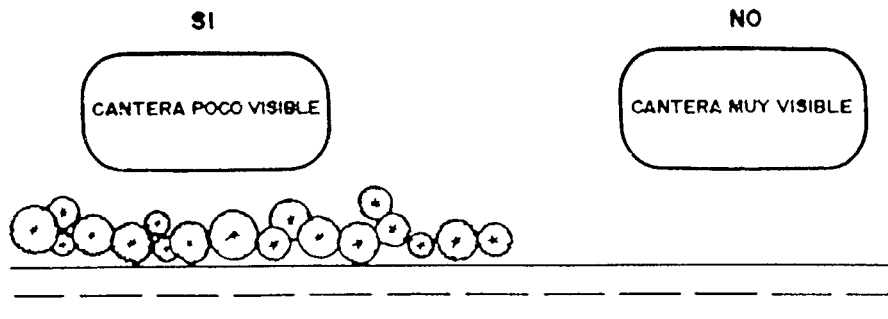


Figura 12.11. Aprovechamiento de la vegetación para ocultar el área en actividad.

5.2. Orientación de los frentes y dirección de avance

Otros factores que pueden ayudar a mitigar el impacto visual producido por las minas son: la orientación de los frentes y la dirección de avance previstas.

Los frentes pueden orientarse de manera que la parte activa no sea tan visible desde los puntos principales de observación. Esto se consigue, por ejemplo, cuando los taludes se van excavando con un rumbo paralelo a la dirección de un corredor visual situado al mismo nivel.

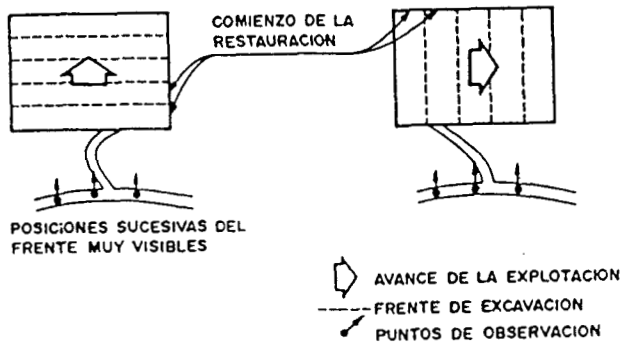


Figura 12.12. Orientación de la explotación para evitar la visión del frente de trabajo y restaurar los taludes finales vistos.

Y cuando el observador está en una situación dominante, disponiendo el frente de trabajo perpendicularmente al eje de visión Fig. 12.13., de manera que el terreno natural aún sin explotar-oculte el área de extracción.

Simultáneamente, la revegetación o tratamiento progresivo de los taludes laterales que vayan alcanzando su posición final de proyecto, complementará el efecto de la orientación y permitirá usar los materiales de cobertera, previamente retirados y/o apilados, o los posibles estériles producidos sin necesidad de depositar estos en escombreras exteriores.

La dirección de avance y punto de apertura de las explotaciones también puede facilitar la ocultación y restauración de los huecos excavados. En la Fig. 12.14., que representa una cantera a media ladera, en el primer caso todo el frente activo es visible, es cada vez de mayor altura y no es factible su revegetación; mientras que en el segundo, en el que la apertura se ha efectuado desde el banco de mayor cota, se consigue una mejor ocultación del hueco y la posibilidad de tratar parcialmente los taludes, desde casi el comienzo de la explotación, al alcanzarse de una forma casi inmediata su situación de abandono. Por otro lado, en esta última alternativa existe una ventaja de tipo operativo, como es la de realizar el transporte siempre a favor de pendiente.

La condición para plantear la secuencia de avance de esta última forma de explotación es conocer, aunque sea

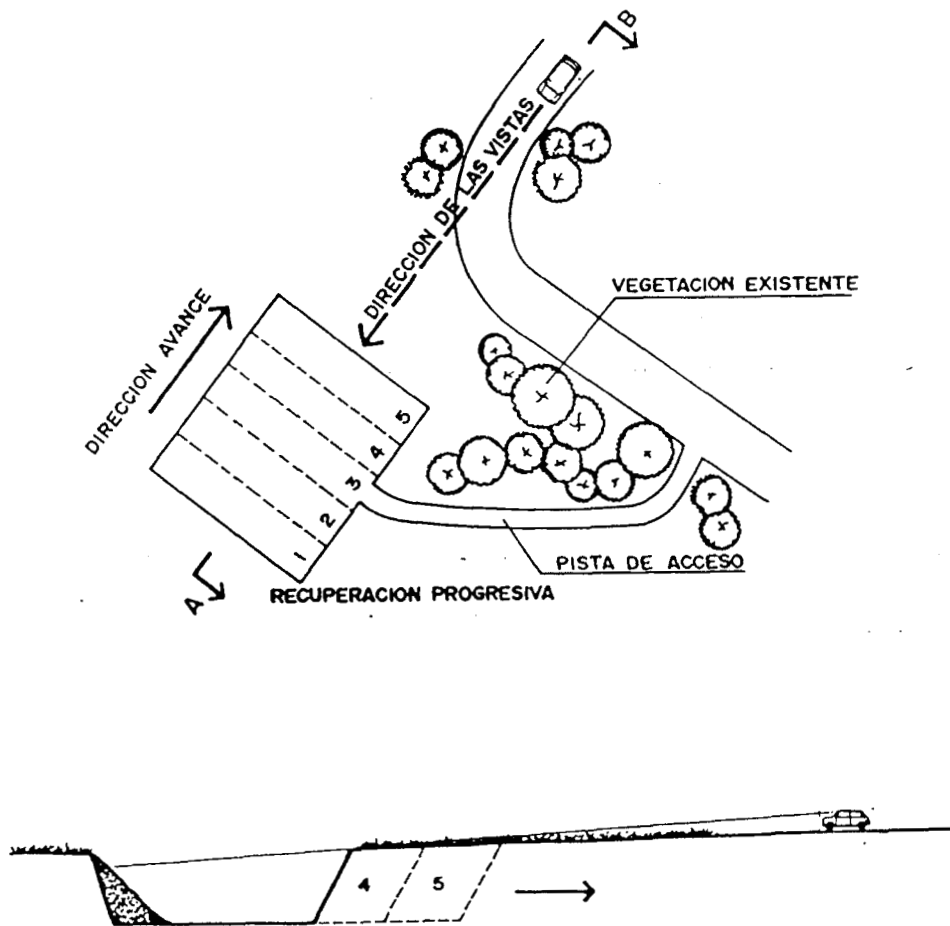


Figura 12.13. Orientación del frente de trabajo perpendicular al eje de visión de un observador situado en una posición dominante.

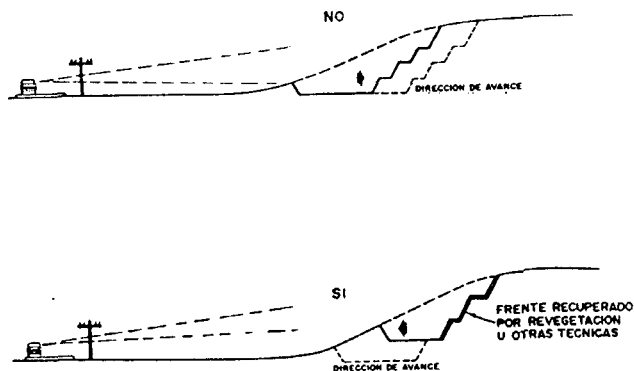


Figura 12.14. Apertura y dirección de avance recomendadas para restaurar desde el comienzo los frentes de los taludes finales.

de un modo aproximado, la posición final de la cabeza del talud general. No obstante, siempre es posible retranquear dicho talud, aunque estuviera parcialmente revegetado, si se justificara como ampliación del hueco proyectado.

5.3. Apantallamiento artificial de las explotaciones

Si después de aplicar los criterios expuestos anteriormente el área afectada por la explotación sigue siendo muy visible por posibles observadores, podrá recurrirse a la utilización de pantallas visuales como elementos adicionales de ocultación.

Las dimensiones de las pantallas visuales han de ser tales, en cuanto a altura y longitud, que impidan o minimicen la percepción de la zona a ocultar. Fig. 12.15.

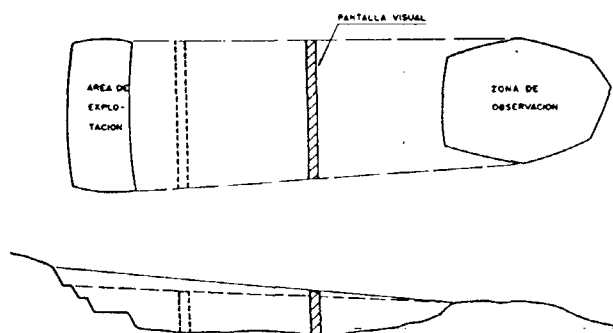


Figura 12.15. Comparación de efectividad de pantallas visuales.

Según donde se situen las pantallas su geometría podrá variar considerablemente. Se tendrán, pues, que tener en cuenta en el proyecto de restauración diferentes aspectos como son: la propiedad de los terrenos, los materiales a emplear, la integración en el paisaje, el coste de realización, etc.

Los tipos de pantallas que se construyen son básicamente tres. De materiales estériles, de vegetación y mixtos. Fig. 12.16.

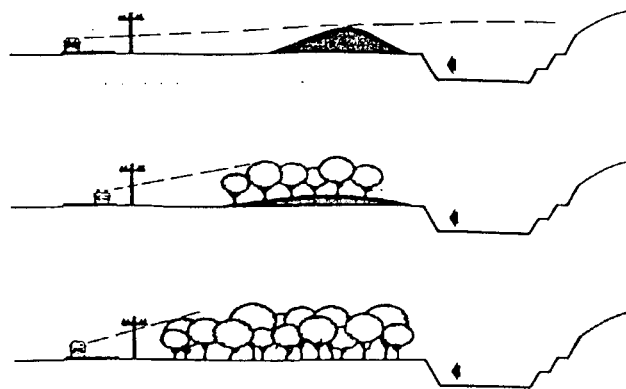


Figura 12.16. Tipos de pantallas visuales.

Si las pantallas son vegetales, se recomiendan que estén constituidas preferentemente por árboles y arbustos autóctonos. Los árboles se plantarán en 2 ó 3 filas como mínimo, con follaje espeso y hoja perenne.



Foto 12.6. Pantalla vegetal y de tierra diseñada para reducir el impacto visual.

En cuanto a los terraplenes, se podrán construir con los estériles procedentes de la propia explotación, modificando así el relieve natural y complementando, a ser posible, la efectividad de las pantallas vegetales. Frecuentemente, se emplea la propia tierra vegetal que se retira durante la fase de apertura y que tras la finalización de los trabajos se utiliza en las labores de revegetación.

5.4. Accesos a las explotaciones

Los puntos de entrada a las explotaciones desde la red viaria, si están mal elegidos y los trazados no son los adecuados, pueden agravar el impacto visual de las excavaciones e incluso constituir puntos peligrosos con alto riesgo de accidentes de tráfico. El diseño de los accesos debe efectuarse, pues, estratégicamente para que los huecos de excavación queden fuera de las cuencas visuales de los correspondientes puntos de percepción. Esto se conseguirá con trazados en planta en forma de «j» o «bayoneta». Fig. 12.17.

5.5. Criterios de modelado de taludes finales de explotación en zonas secas

Aunque el relleno del hueco final es la solución ideal, desde el punto de vista de la restauración, no siempre es posible por condicionantes, económicos o por ausencia de materiales estériles.

Por ello, en la mayoría de los casos, es necesario modelar los taludes finales de manera que se consiga un perfil geotécnicamente estable, integrado en la morfología característica del entorno y que facilite la implantación de la vegetación.

El primer criterio de diseño, fundamentalmente operativo, es la altura de banco. Son numerosos los factores que influyen en su determinación, pero es fácil observar con datos estadísticos que en los sectores más tecnificados de la minería metálica y energética las alturas de banco se sitúan por debajo de los 20 m, salvo en el caso de las descubiertas, y que en el sector de las canteras esa variable llega a tener dimensiones incluso superiores a los 100 metros, Fig. 12.18.

Ese sobredimensionamiento es consecuencia, en parte, de la falta de proyectos mineros bien ejecutados y fundamentados en una investigación geológica y en estudios de mercado que permitan establecer, al menos de forma tentativa, la situación final del hueco de excavación, y por otro lado, al hecho de que la construcción de las pistas de transporte, por las que se accede a los nuevos bancos, suponen un gravamen económico si no se han considerado inicialmente en el diseño y planificación de la explotación.

Las razones por las cuales las alturas de banco se limitan en numerosos países a 15 m son las siguientes:

- La restauración y tratamiento de los taludes finales es más sencilla de realizar.

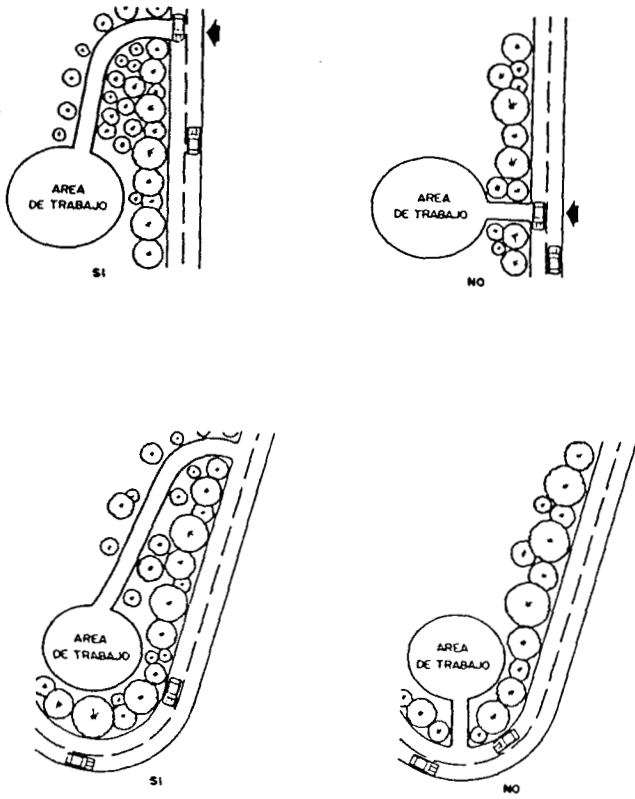


Figura 12.17. Trazados de accesos y puntos de entrada a las explotaciones.

En cuanto a los puntos de entrada o cruces con la red viaria principal, se debe intentar que estos se encuentren fuera de los tramos en curva donde la visibilidad de los conductores es limitada.

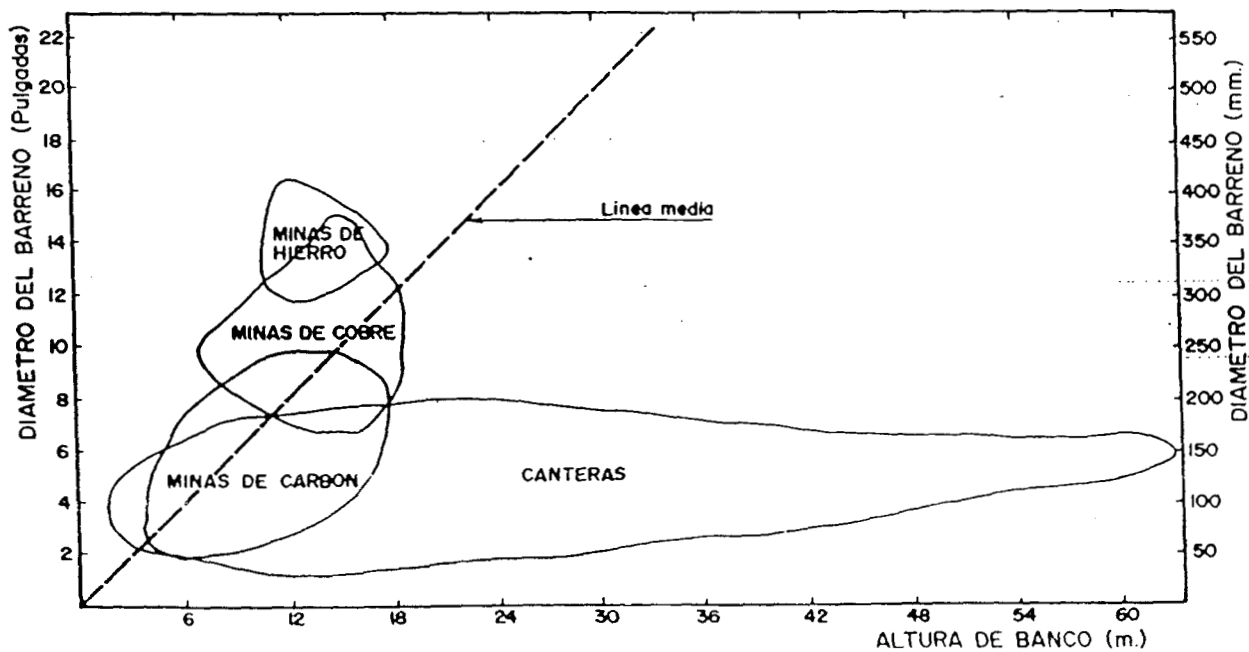


Figura 12.18. Alturas de banco en explotaciones mineras.

- Las condiciones de seguridad son mucho mayores, pues el alcance de las máquinas de carga permite un saneo y limpieza de los frentes durante la operación.
- Las cargas operantes de explosivo son menores, y al disparar las voladuras con secuencias de encendido adecuadas se disminuyen los problemas de vibraciones y onda aérea.
- El control de las desviaciones de los barrenos es más efectivo, sobre todo cuando se utilizan perforadoras con martillo en cabeza.
- Se reduce el riesgo de proyecciones y onda aérea como consecuencia de los robos de piedra (piedra menor que la nominal en un punto del banco producida por la sobreexcavación de la voladura anterior), pues es más fácil la inspección y modificación de los barrenos de la primera fila de las voladuras. Lo mismo se puede decir en el caso de existencia de coqueras intersectadas por los barrenos cuando éstos se cargan con explosivos a granel.
- El control de la fragmentación de la roca es mejor al sistematizarse las voladuras en esquemas y cargas.

Sólo en casos especiales, como por ejemplo las canteras para producción de escollera, se debería trabajar con alturas de 20 m o superiores. En estas explotaciones se recomienda dividir los bancos antes de alcanzar las posiciones finales de los taludes. Fig. 12.19.

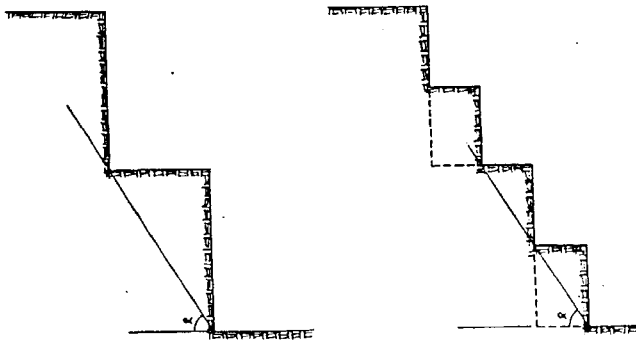


Figura 12.19. División de bancos antes de llegar a la situación final de los taludes.

En cuanto a las técnicas de tratamiento de los taludes, estas dependerán de las condiciones de estabilidad, tipo y dimensiones del frente, disponibilidad de materiales de relleno, naturaleza del mismo, y posibilidad de simultanear algunas de las actuaciones técnicas.

En la Tabla 12.1. se indican los tratamientos posibles sobre los taludes de huecos excavados, según que sean frentes únicos o banqueados, y la altura de los mismos.

TABLA 12.1. OPCIONES DE TRATAMIENTO DE TALUDES Y HUECOS (Coppin y Bradshaw, 1982)

OPCION	TALUDES ALTOS		TALUDES BAJOS
	Unico	Banqueado	
• Relleno total	—	(x)	x
• Relleno parcial para reducir pendiente	—	x	x
• Relleno puntual selectivo	—	x	x
• Voladura de las cabezas de los bancos	x	x	x
• Creación de pendiente continua con los escombros de la voladura	—	x	x
• Introducción de vegetación	x	x	x

(x) Tratamiento posible.

Como ya se ha indicado, los taludes banqueados presentan mayores posibilidades de recuperación que los de frente único. La implantación de la vegetación en las bermas ayuda a romper la continuidad y uniformidad del talud mejorando su apariencia.

En muchos casos, es interesante disminuir la pendiente del talud general de las explotaciones, y si esto no es posible la de los taludes parciales de los bancos, dejando pequeñas bermas sobre las que se acumula material fino y fragmentado que facilite el establecimiento de la vegetación y sirvan de elementos de protección frente a caídas ocasionales de piedras.

Una práctica habitual consiste en volar las cabezas de los bancos con el fin de que los fragmentos de roca queden retenidos en las bermas y pasen a constituir un sustrato potencial para la vegetación, al mismo tiempo que se reducen las fuertes inclinaciones de los frentes y se rompe la linealidad y angulosidad de las formas.

En algunas ocasiones se realizan voladuras puntuales con pequeñas cargas de explosivo para crear los hoyos necesarios y aumentar la fracturación de las rocas, sin afectar a la estabilidad estructural de los taludes, con el fin de facilitar el desarrollo radicular de las plantas.

Cuando se dispone de materiales estériles, de la propia explotación, de otras próximas o incluso de origen urbano (escombros de construcción, basuras, etc., que tengan un carácter inerte) es posible efectuar un relleno parcial de los frentes para conseguir un perfil del terreno suave y extender sobre ellos la capa de tierra vegetal. Rellenar es la solución que permite acercarse más al estado original del terreno, y por consiguiente, disminuir el impacto paisajístico.

En los taludes únicos en roca, de grandes dimensiones, es posible realizar voladuras controladas en puntos estratégicos para crear unos frentes de menor pendiente, al pie de los mismos, y pequeñas irregularidades en sus partes altas que mejoren la textura y apariencia natural. Las discontinuidades producidas por las voladuras formarán pequeños salientes o repisas, que permitirán la acumulación de los finos y una implantación más fácil de la vegetación.

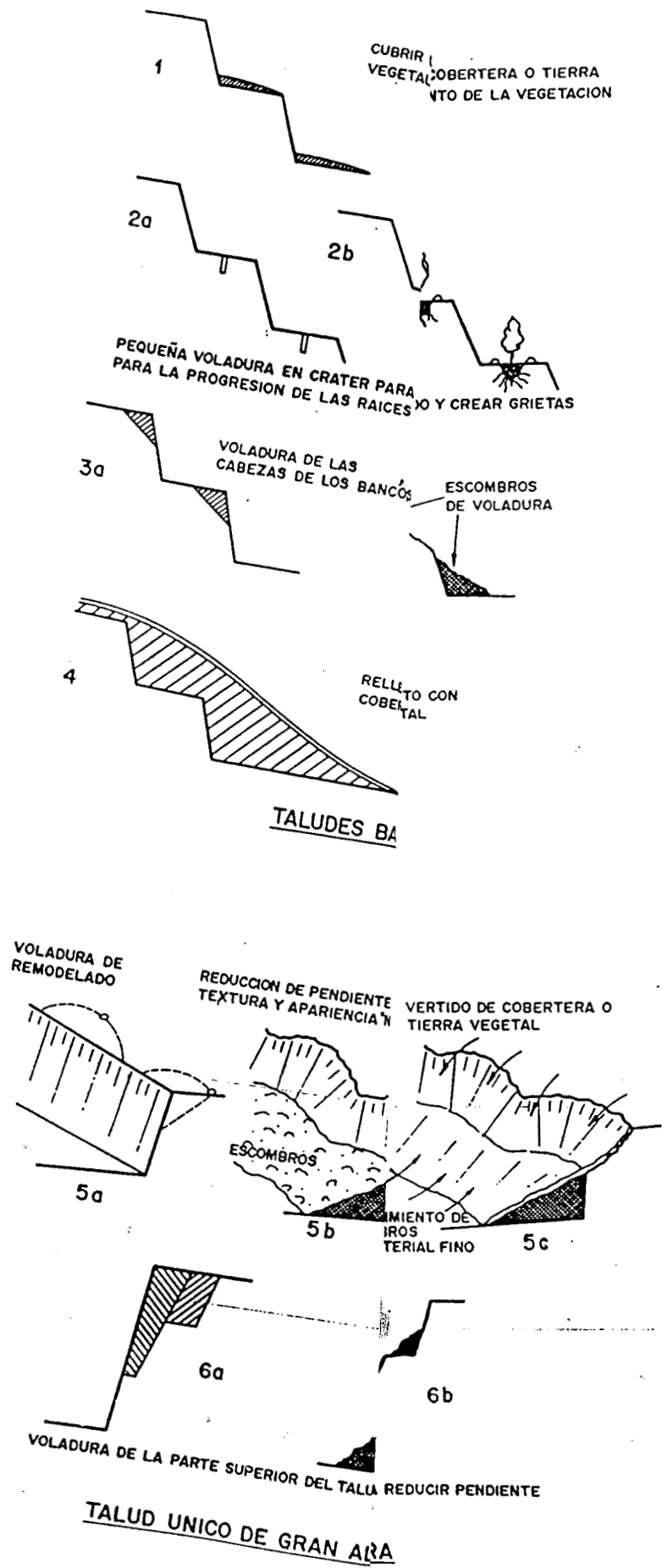


Figura 12.20. Posibilidades de tratamiento de taludes finales.



Foto 12.7. Relleno parcial y revegetación de las bermas en una cantera.

Cuando se dispares voladuras de más de una fila éstas deben diseñarse con profundidades diferentes, de manera que se creen pequeñas bermas para la retención del material. Tanto en este caso como en el anterior, las voladuras deben garantizar la integridad estructural y estabilidad de los taludes, pues de lo contrario el tratamiento sería más perjudicial que beneficioso.

En los frentes de canteras de materiales blandos, fácilmente disgregables, no es necesaria la acción de las voladuras para diseñar o modificar los taludes finales, sino que es preciso prestar más atención a aquellas medidas que eviten la erosión e inestabilidad. Una solución consiste en excavar pequeñas repisas a lo largo de la cara de los bancos.

La restauración de los taludes finales de las canteras debe iniciarse antes de que finalice la explotación de las mismas. En las etapas últimas de extracción pueden conseguirse situaciones más estables de los taludes, reducir la pendiente de los mismos y dejar accesos perimetrales que faciliten los trabajos posteriores de recuperación.

Además del modelado del área de explotación que se desee abandonar tras los tratamientos descritos anteriormente y las medidas de implantación de la vegetación, pueden seguir quedando parámetros o frentes desnudos que produzcan un fuerte contraste cromático. En tales casos, es factible aplicar diferentes técnicas especiales de envejecimiento.

Mediante un riego superficial, se puede aplicar una solución ácida, teniendo la precaución de que los líquidos que escurren no dañen a la vegetación existente, por lo que el pie del talud deberá lavarse con agua abundante.

Otro procedimiento consiste en espolvorear paja abundante por el talud y a su pie, quemándola a continuación de modo que el humo manche y envejezca el color de la roca, si es que los tonos claros de ésta destacan. Esto puede efectuarse puntualmente aprovechando las bermas existentes en el talud final de las canteras. También pueden emplearse otros materiales combustibles como neumáticos, gasolina, etc., pero prestando atención a los problemas de contaminación que se puedan derivar de ello.

Las técnicas descritas son especialmente interesantes para pequeñas explotaciones del tipo de las canteras y sobre todo en el caso de calizas, margas, etc.

En lo relativo al perfil general y trazado en planta de los huecos finales, siempre que sea viable y no exista una limitación de tipo geológico, como sucede con muchos productos de cantera, deberá tenderse a seguir las pautas marcadas por las formas naturales del paisaje. Estas formas básicas suelen ser, por lo general, la variedad en las pendientes o en el relieve, la irregularidad de las superficies y de las líneas, las redondeces, las formas difusas y con disposición asimétrica, etc.

En la Fig. 12.21, se representa un caso muy simple de comparación de integración en el paisaje, cuando las siluetas se recortan contra el cielo rompiendo la línea de cumbres naturales.

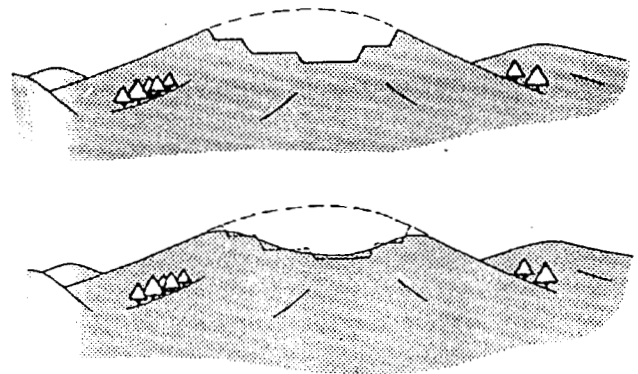


Figura 12.21. Recorte de siluetas contra el cielo.

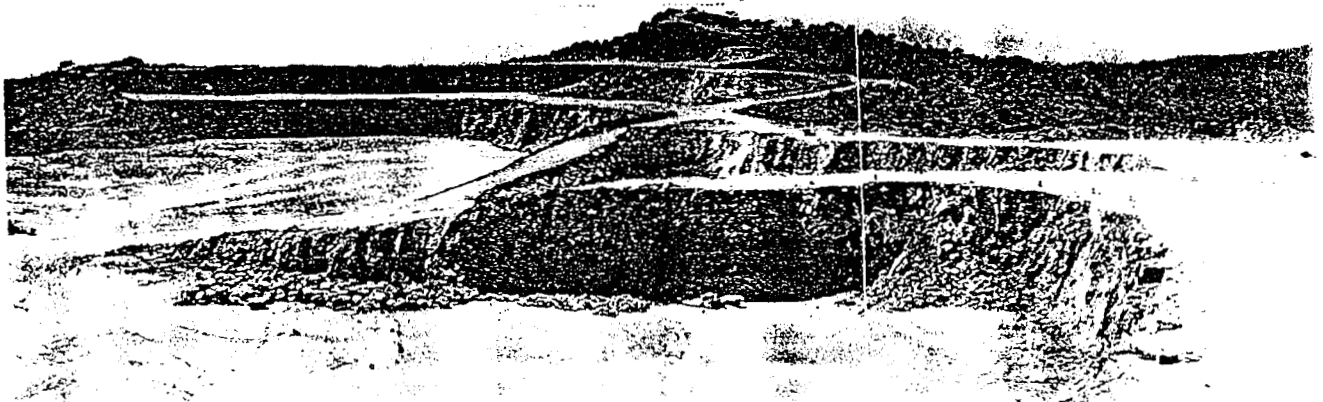


Foto 12.8. Cantera explotándose en la coronación de un cerro.

5.6 Criterios de modelado de taludes finales en zonas húmedas

En zonas húmedas donde esté previsto la creación de estanques en los huecos creados por la explotación de areneros y graveras se seguirán un serie de criterios básicos en su configuración geométrica. Por un lado, el contorno del hueco se aconseja que sea sinuoso con formas redondeadas, pero sin llegar a formar un círculo.

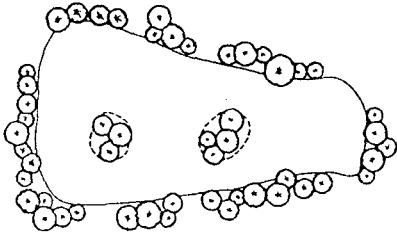


Figura 12.22. Diseño en planta del hueco de un estanque para conservación de la fauna.

La superficie mínima que se aconseja que tenga la lámina de agua es de media hectárea, la óptima del orden de las 5 ha y la máxima entre 10 y 20 ha.

El perfil transversal del hueco debe proyectarse de manera asimétrica, compaginando orillas casi verticales o muy escarpadas, y otras muy tendidas o playas. Así se conseguirá en las primeras evitar la invasión de la vegetación semiacuática y en las segundas favorecer el crecimiento de dicha vegetación, la reproducción de los peces al calentarse más rápidamente el agua y el acceso de la fauna. Si se pretende crear un hábitat adecuado para la implantación de comunidades vegetales y especies animales acuáticas, la profundidad no debe ser muy grande, inferior a los 5 m, pues de lo contrario la productividad del ecosistema se verá mermada por la falta de luz. Fig. 12.23.

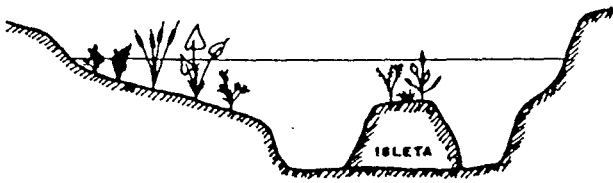


Figura 12.23. Perfil transversal de un estanque artificial.

También conviene crear islas, promontorios y entrantes que sirvan como zonas de refugio.

Cuando los taludes dejados por la explotación son muy abruptos y altos, y por consiguiente peligrosos para las personas y la fauna, deberán descabezarse los bancos otras minas del exterior. Tal es el caso de los métodos de Fig 12.24.

Si, por el contrario, el banco abandonado es muy pequeño podrá utilizarse la tierra vegetal apilada para tumbar los taludes y crear un medio idóneo para la instala-

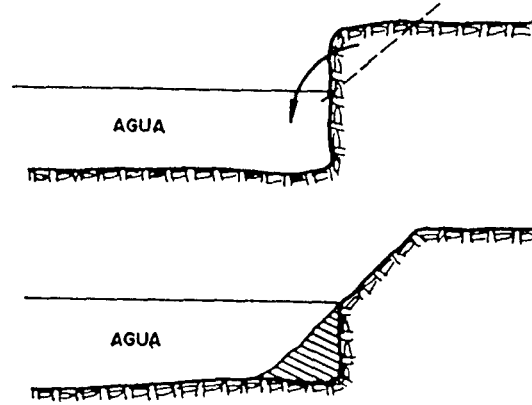


Figura 12.24. Descabezamiento de un talud vertical.

ción de la vegetación acuática. Especial atención se prestará a aquellos casos donde se pueda producir un aterrado o colmatación de los huecos, pues se corre el riesgo de que surjan problemas de déficit de oxígeno por la acumulación de desechos orgánicos, hojas, troncos, etc.

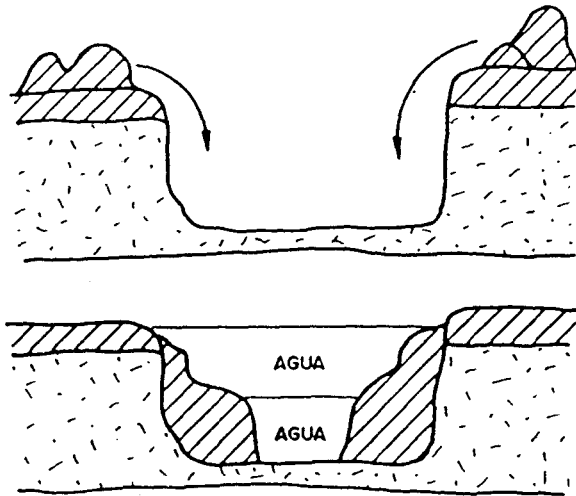


Figura 12.25. Vertido de tierra vegetal en las márgenes de los huecos de pequeña profundidad.

6. ESCOMBRERAS

6.1. Ubicación y ocultación natural de las escombreras

La ubicación óptima de los estériles que se generan durante la explotación de yacimientos de minerales por métodos de cielo abierto, y en menor medida por métodos subterráneos, se encuentra en los propios huecos creados al extraer el material beneficiable.

En minería de interior esto es, en parte, posible cuando en el sostenimiento de las excavaciones se utiliza estéril procedente de las propias labores de infraestructura o de otras minas del exterior. Tal es el caso de los métodos de explotación por grandes cámaras, el de corte y relleno, etcétera.

En minería a cielo abierto el autorrelleno del hueco es factible cuando el yacimiento tiene una forma alargada y la explotación se realiza con la adecuada planificación, avanzando desde un extremo hacia el opuesto. Fig. 12.26. Para ello, es preciso efectuar la apertura de un hueco inicial de volumen suficiente para albergar los estériles de las fases posteriores, pues en caso contrario sería necesario ir depositando fuera, a lo largo de la vida de la misma, parte del estéril movido.

Con los estériles del vertedero exterior caben dos posibilidades, que se trasladen al hueco final, lo que no siempre es viable desde un punto de vista económico, o que permanezcan en el lugar ocupado originalmente debidamente remodelados y revegetados.

En cuanto a la zona afectada por el vertedero interior, con frecuencia suele quedar a una cota ligeramente mayor a la primitiva, ya que el hueco inicial no es capaz de absorber el incremento de volumen de los estériles que se produce por causa del esponjamiento.

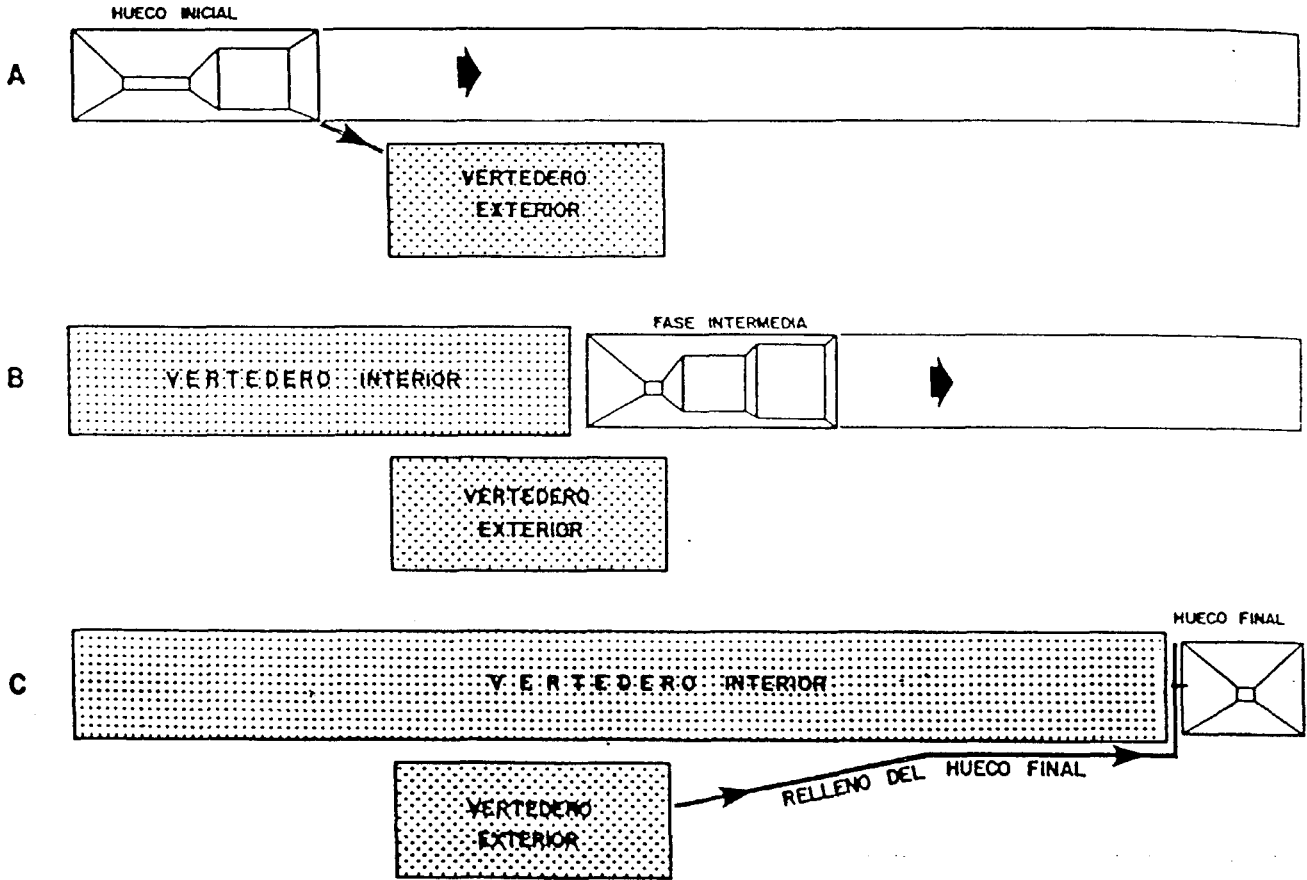


Figura 12.26. Método de explotación con autorrelleno del hueco en un yacimiento longitudinal.

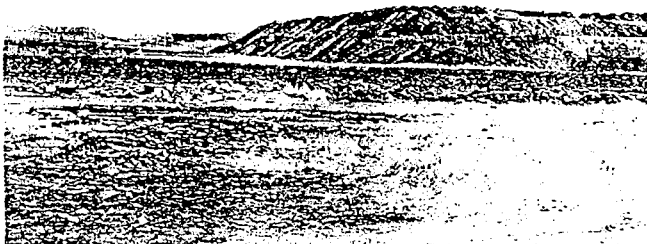


Foto 12.9. Escombrera exterior creada por una explotación de carbón.



Foto 12.10. Autorrelleno del hueco abierto en una mina de carbón.

La ubicación de cualquier vertedero exterior depende en primer lugar de un condicionante económico, pues los estériles no pueden transportarse más allá de una cierta distancia si se pretende que la explotación sea rentable. La segunda limitación es de tipo geológico, pues antes de planificar y diseñar un depósito de residuos es obligatorio cerciorarse de que el subsuelo no está mineralizado, o si lo está no reúne unas expectativas de explotabilidad futuras.

A continuación, entran en juego otros parámetros como son: las características fisiográficas donde se asentará la escombrera (sobre fondo de valle, sobre ladera, en un páramo, etc). Las propiedades geotécnicas e hidrogeológicas de los materiales de apoyo, las características visuales y de calidad del paisaje, la conformación geométrica del depósito, los tipos de materiales que constituyen la escombrera, etc.

Entre las características visuales descritas anteriormente se encuentran las relacionadas con la posición de los observadores, los cerramientos y las cuencas visuales. En el caso de las escombreras las posibilidades de ocultación mediante el aprovechamiento de los accidentes del terreno son grandes, siendo muy frecuente el vertido en vaguadas u otras depresiones naturales. Fig. 12.27.

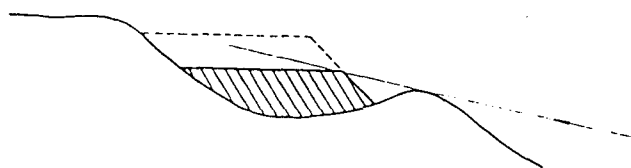


Figura 12.27. Ocultación de una escombrera apoyada sobre la depresión de una ladera.

6.2. Modelado de escombreras

La configuración geométrica de un depósito de estériles, hasta épocas recientes, dependía casi exclusivamente de la morfología de la superficie de apoyo y del sistema de vertido empleado, vagonetas, volquetes, cintas transportadoras, etc. Fig. 12.28.

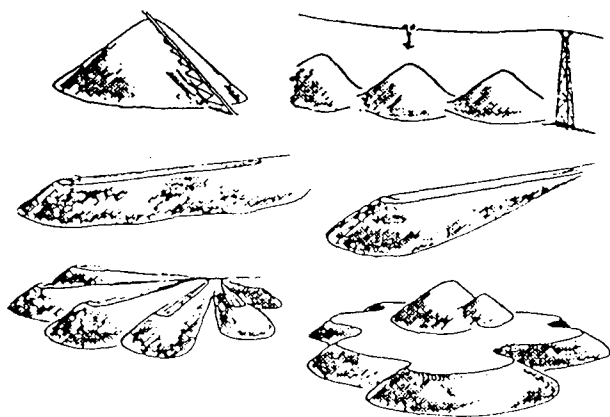


Figura 12.28. Configuraciones típicas de escombreras para distintos métodos de vertido. (C. Tandy, 1979).

Las exigencias técnicas y ambientales han hecho que en los últimos tiempos se establezcan unos criterios básicos aprovechando, en lo posible, las ventajas que ofrecen ciertos principios ópticos para conseguir que disminuya el impacto visual ejercido por estas estructuras:

- El ojo percibe más las dimensiones verticales que las horizontales, por lo que impactará menos una masa alargada y de poca altura que otra estrecha y alta.
- La distribución del material sobre una ladera en pendiente hace que en la parte más alejada del observador se aprecie una menor masa aparente.
- Se debe evitar que la altura de la escombrera sobrepase la cota altitudinal del entorno para que así no destaque en la línea del horizonte.
- Las líneas curvas sobre superficies suaves producen una intrusión visual menor que las líneas y cortes rectos sobre superficies planas, que no hacen sino acentuar formas y volúmenes.
- Las litologías con colores fuertes y llamativos intensifican y agravan las sensaciones ópticas de los observadores, al contrastar con el colorido suave y vistosidad natural de los suelos y vegetación.

En la etapa inicial de estudio del medio físico se deben identificar los rasgos característicos del paisaje circundante al lugar ocupado por los depósitos de estériles, pues en la construcción y modelado de éstos debe intentarse reproducir las formas naturales de las estructuras geológicas para alcanzar una mayor integración paisajística. Fig. 12.29.

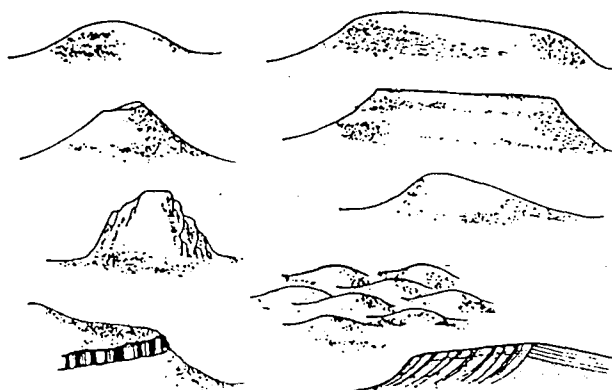


Figura 12.29. Formaciones geológicas naturales.

La regla de rebajar la altura de las escombreras es importante, pues con frecuencia es la parte alta del promontorio la que más destaca y sobresale de la línea del horizonte.

La reducción de altura de una escombrera implica un aumento de la superficie afectada, pero tal perjuicio queda parcialmente compensado por el menor impacto visual y el menor coste operativo. No hay que olvidar que en el caso de una escombrera con forma cónica la limitación de la altura a la mitad supone sólo la pérdida de 1/8 de la capacidad total y que en el supuesto de que tal estructura

se encuentre ya construida el movimiento de material a realizar es de esa magnitud. Fig. 12.30.



Figura 12.30. Reducción de la altura de una escombrera con sección triangular.

Cuando se intente remodelar una escombrera ya construida repartiendo su volumen sobre una superficie mayor deberá retirarse previamente la tierra vegetal existente sobre el terreno a ocupar, con el fin de disponer de una base de apoyo más resistente y del material necesario para el recubrimiento y revegetación.

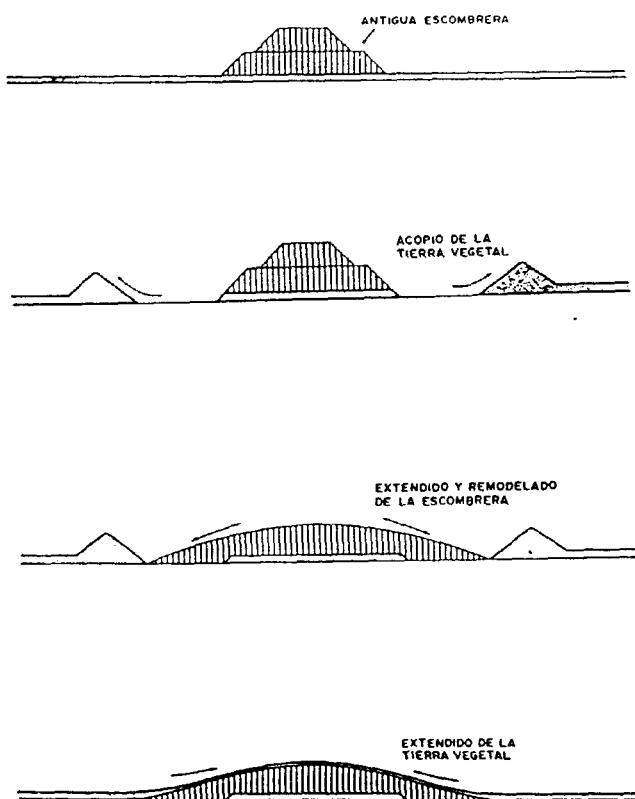


Figura 12.31. Fases de remodelación y cobertura con tierra vegetal de una antigua escombrera (Bradshaw, A. D., 1980).

En situaciones muy especiales, los montículos antiguos de estériles pueden haberse constituido en una especie de hito o rasgo destacado del paisaje con un cierto valor histórico, resultando aconsejable respetarlo por formar

parte del patrimonio natural del lugar. Tal puede ser el caso de algunos escoriales y vertederos de antiguas explotaciones de carbón.

En los terrenos ondulados y montañosos la intrusión visual disminuye; primero, si las escombreras se apoyan en las laderas y, segundo, si se reproducen las pendientes, formas y líneas naturales del terreno. Fig. 12.32.

En general, habrá que huir de las formas troncocónicas, evitar dejar aristas y superficies planas que manifiesten artificialidad y redondear taludes en planta y en alzado para conseguir una apariencia más natural.

Las terrazas o bermas de gran anchura producen un efecto visual negativo, por lo que, desde un punto de vista estético, se desaconseja su uso generalizado. No obstante, como suelen ser necesarias, tanto por condicionantes del método constructivo como por otros imperativos de control de la erosión, estabilidad y accesibilidad a diferentes puntos, se recomienda seguir los siguientes criterios básicos:

- Ser lo más estrechas posibles, pero permitiendo el paso de vehículos auxiliares, y equipos de hidrosiembra cuando la altura es grande.
- Tener los bordes redondeados.
- No ser equidistantes o totalmente paralelas.
- Hacer que las bermas desaparezcan gradualmente para evitar que atraviesen toda la superficie de la escombrera.



Foto 12.11. Antigua escombrera en la cuenca de Puertollano.



Figura 12.33. Disposición asimétrica de bermas.

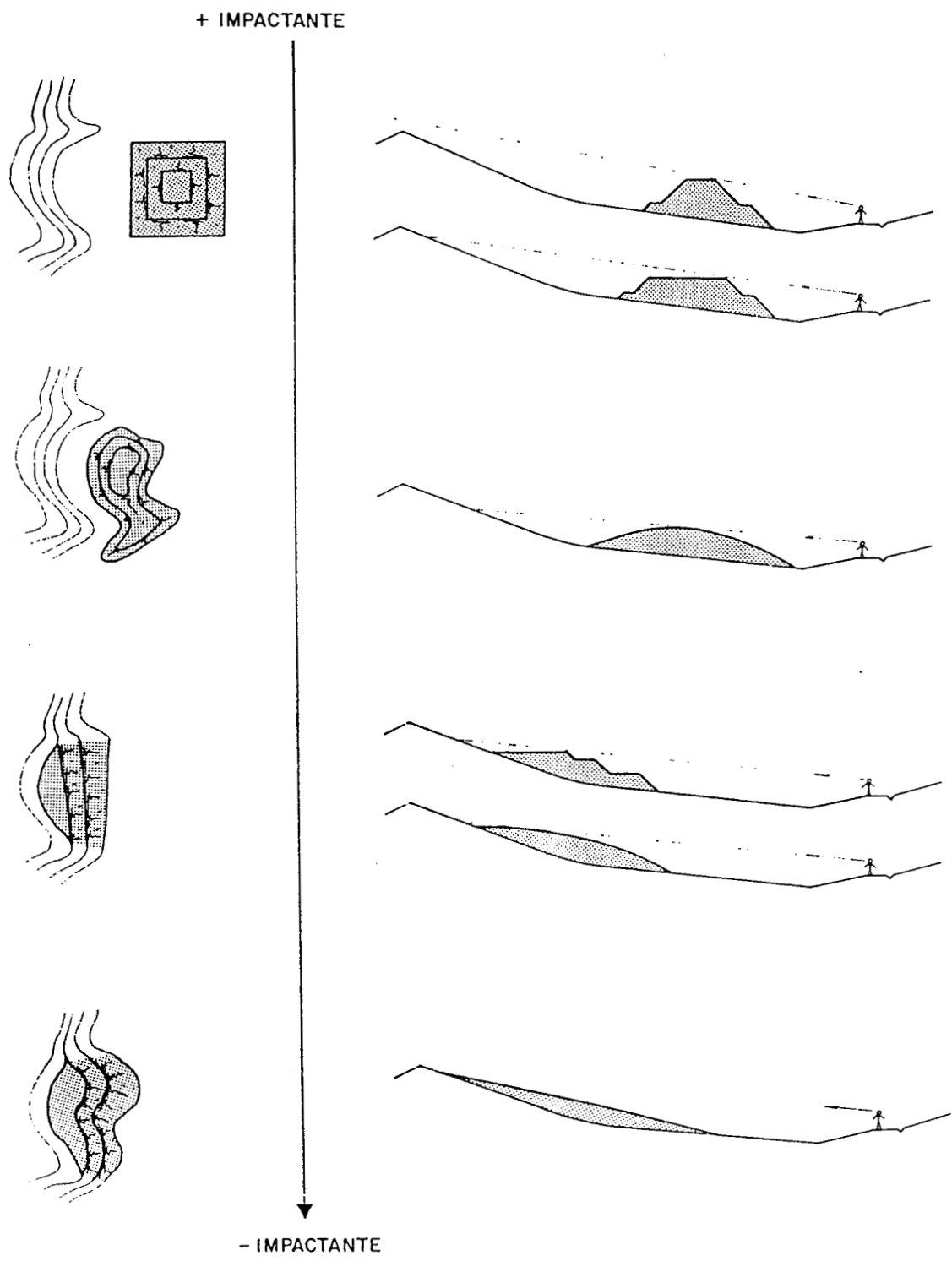


Figura 12.32. Diseños posibles de una escombrera, de mayor a menor impacto visual.

6.3. Secuencias de construcción de escombreras

La secuencia constructiva de una escombrera viene marcada, por un lado, por el método de construcción y vertido de los estériles y, por otro, por un conjunto de condicionantes técnicos y económicos que es preciso analizar y evaluar en cada caso particular. A partir de un diseño final las fases de formación de esas estructuras pueden plantearse de manera que sea posible la restauración progresiva de los terrenos. Esto permite reducir el impacto global, tanto en el espacio como en el tiempo, distribuir el coste de restauración a lo largo de la vida de la explotación e incrementar el período de tiempo disponible para lograr el establecimiento de la vegetación y la adopción de medidas correctoras.

La recuperación progresiva puede hacerse en escombreras con un solo nivel de vertido o con varios niveles, tal como se muestra en la Fig. 12.34 en depósitos apoyados sobre una ladera.

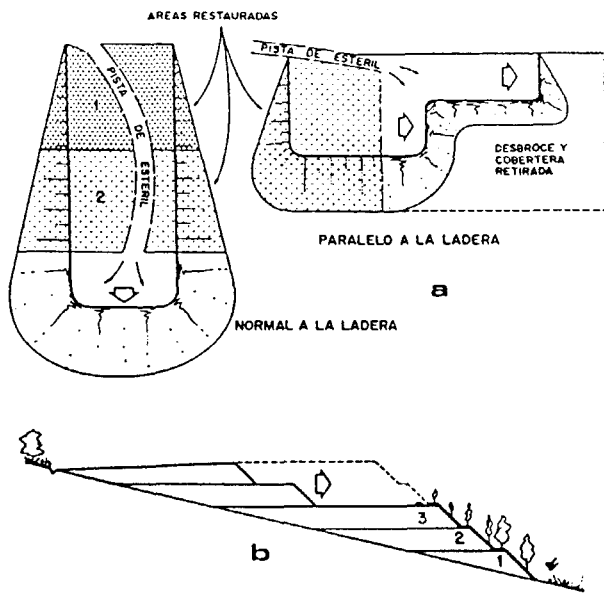


Figura 12.34. Recuperación progresiva de escombreras.

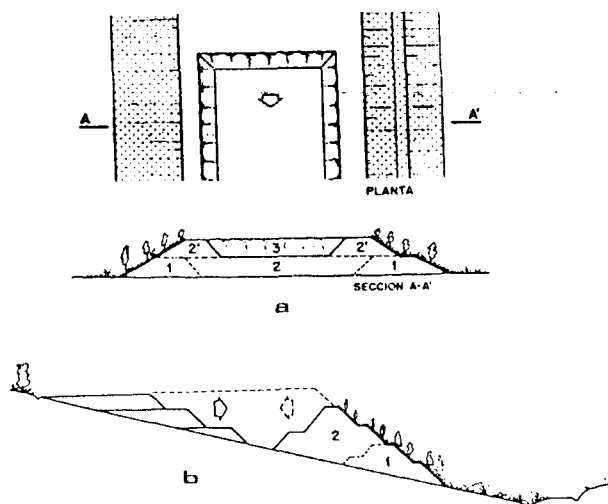


Figura 12.35. Construcción perimetral con restauración progresiva.

Desde un punto de vista paisajístico, la secuencia óptima de creación de escombreras es aquella con la que se construye en primer lugar el perímetro exterior de las mismas, alcanzando su posición final y revegetando las superficies, de forma que estas partes actúen de pantallas visuales del resto de la estructura y también de barreras sónicas durante el vertido posterior en zonas interiores.

En la Fig. 12.35 se representa el sistema de construcción perimetral de una escombrera de llanura y de otra a media ladera.

6.4. Apantallamiento artificial de las escombreras

Las escombreras de estériles de minas y residuos de lavadero es posible ocultarlas mediante pantallas artificiales construidas con una parte de los propios estériles y complementadas con especies vegetales.

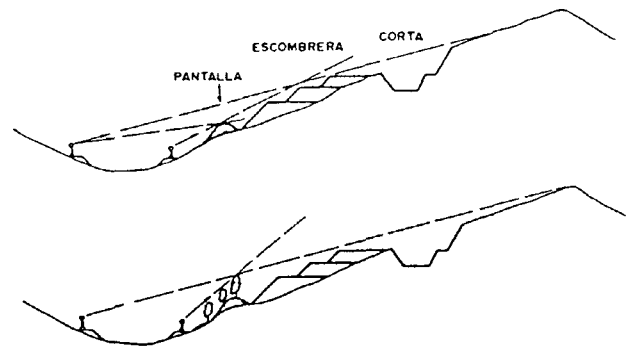


Figura 12.36. Ocultación de escombreras.

Esos pequeños volúmenes de estériles o incluso de tierra vegetal, dispuestos en forma de cordones o caballones, bastan a veces para conseguir el efecto deseado desde el comienzo de las explotaciones. Son económicamente viables y de fácil integración en el paisaje.

Como en cualquier proyecto de apantallamiento, es preciso evaluar si el impacto visual es igual o incluso mayor que el ocasionado por los elementos que tratan de ocultar, pues de ser así tal técnica se desecharía.

7. INSTALACIONES

7.1. Ubicación de instalaciones

Al igual que sucedía con los huecos de explotación y con las escombreras, en la ubicación de las plantas de tratamiento y otras instalaciones mineras es preciso tener en cuenta los elementos característicos del paisaje para lograr que las intrusiones visuales sean lo menor posible, sin olvidar que son también generadoras de otro tipo de alteraciones como residuos, polvo, etc.

Además de seguir el criterio básico de «alejamiento» se debe intentar «ocultar» y «camuflar» las edificaciones. En la ocultación juega un papel importante la topografía existente, tal como queda reflejado en la Fig. 12.37.

Por otro lado, no siempre puede resultar acertado «esconder» en valles u otras depresiones las instalaciones edificadas; pues, si bien, es cierto que un antiguo hueco

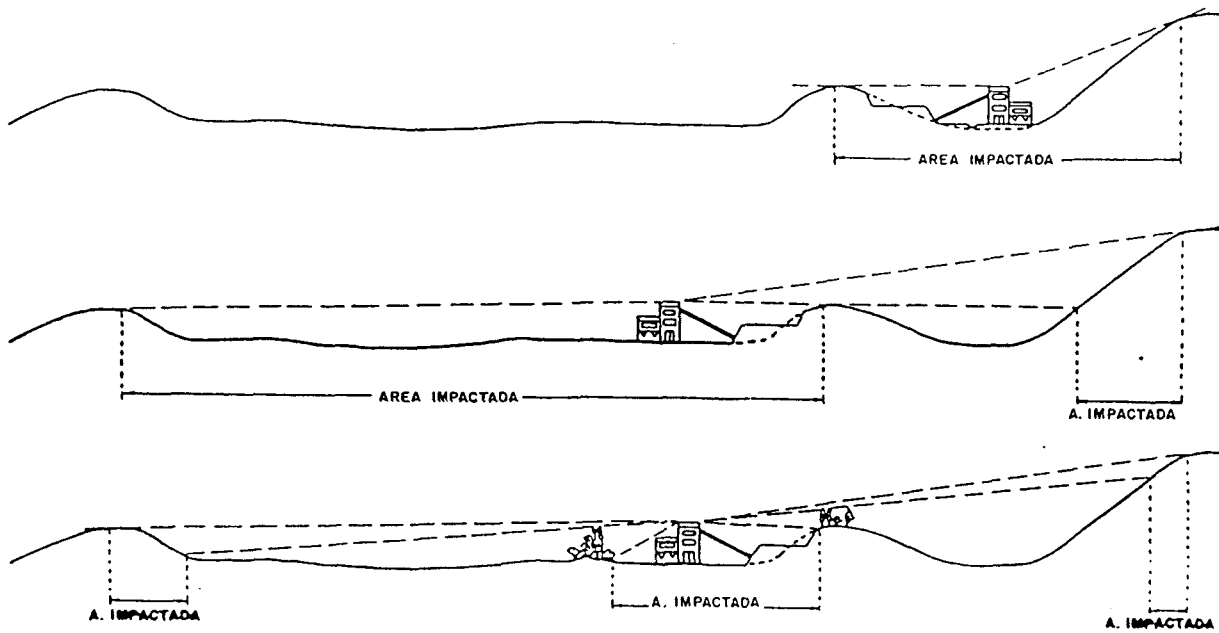
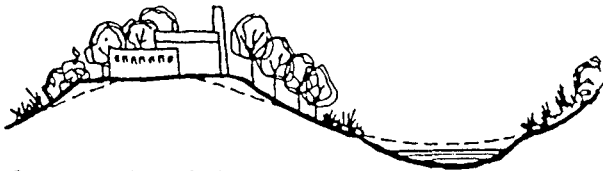


Figura 12.37. *Áreas impactadas por una instalación minera según su localización topográfica* (Lorenzo, J., 1985).

o un pliegue del terreno son aparentemente los lugares adecuados para situar tales obras no lo es menos, en alguna ocasión, que sea más conveniente el realzar las formas naturales más que anularlas.



Curvas naturales anuladas



Curvas naturales realzadas

Figura 12.38. *Realce de las formas naturales del terreno* (Tandy, C., 1979).

Siempre es recomendable un cierto equilibrio y armonía a fin de que predominen los rasgos naturales del paisaje frente a las estructuras artificiales. Cuando esto no es posible, porque la edificación en cuestión es grande y se encuentra en un paisaje llano, es mejor evitar el contraste con pequeños elementos como colinas, árboles, etc., por lo que en caso de disponer de vegetación ésta deberá encontrarse a cierta distancia con el fin de cerrar la vista de la estructura desde puntos de observación alejados.

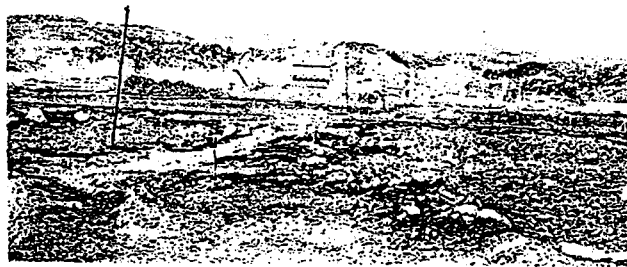


Foto 12.12. *Impacto visual producido por las instalaciones de trituración y almacenamiento de una cantera.*

7.2. Ocultación y enmascaramiento de instalaciones

En las instalaciones mineras y mineralúrgicas además de recurrir al empleo de pantallas visuales para ocultarlas de las vistas, puede ser aconsejable la aplicación de elementos de camuflaje discretos. En los cerramientos, se recomienda emplear materiales típicamente «campestres», como el ladrillo, la piedra, la madera alquitranada o sin tratar. También en las propias instalaciones las actuaciones pasan, además de por un diseño lo menos aparatoso posible, por el empleo de pinturas poco llamativas o detonantes.

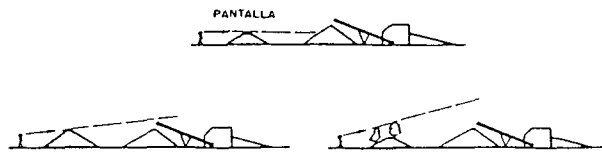


Figura 12.39. *Apantallamiento de una instalación de trituración.*



Foto 12.13. Vista aérea de una mina de carbón a cielo abierto con hueco de explotación, escombreras e instalaciones.

BIBLIOGRAFIA

- AGUILO, M., et al: «Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico. Contenido y Metodología». CEOTMA. Serie Manuales 3. 1984.
- DOWD, C. G., and STOCKS, J.: «Environmental Impact of Mining». Applied Science Publishers Ltd. 1978.
- ESCRIBANO, M.ª DEL MILAGRO, et al: «El Paisaje». MOPU. 1987.
- GALIANA, F., y TORRECILLA, I.: «Restauración de Zonas Aluviales Alteradas por la Extracción de Aridos». I Curso sobre Restauración de Canteras y Minas a Cielo Abierto. Fundación Gómez-Pardo. 1988.
- GLARIA, G., y CEÑAL, M.ª A.: «Impactos Visuales y Restauración en Minería a Cielo Abierto». Jornadas sobre Minería a Cielo Abierto y Medio Ambiente. Oviedo. 1985.
- GONZALEZ ALONSO, S., et al: «Directrices y Técnicas para la Estimación de Impactos». ETSI de Montes. Madrid, 1983.
- LOPEZ JIMENO, C.: «La Restauración de Canteras a Través de un Diseño más Racional». II Jornadas sobre Restauración del Espacio Natural Afectado por Explotaciones Mineras. Consejería de Industria. Gobierno Autónomo de Canarias. 1988.
- LORENZO, J.: «La Minería de Superficie y el Paisaje». II Curso sobre las Alteraciones en el Medio Ambiente y la Restauración de Terrenos en Minería a Cielo Abierto. Fundación Gómez-Pardo. 1985.
- MANGLANO, S.: «Criterios de Diseño de Canteras y Minas a Cielo Abierto». I Seminario de Restauración de Canteras y Minas a Cielo Abierto. Fundación Gómez-Pardo. 1988.
- SMARDON, R. C.: «Prototype Visual Impact Assessment Manual». State University of New York. Syracuse. 1979.
- SMARDON, S. R., et al (ed): «Foundations for Visual Project Analysis». Wiley-Interscience. 1986.
- TANDY, C.: «Industria y Paisaje». Instituto de Estudios de Administración Local. 1979.

USOS POTENCIALES DE LOS TERRENOS AFECTADOS POR LAS ACTIVIDADES MINERAS

1. INTRODUCCION

Las operaciones extractivas constituyen un uso temporal de los terrenos, con períodos de ocupación que con frecuencia no superan los 20 ó 30 años, salvo casos especiales como son los grandes yacimientos metálicos. Es por esto por lo que el abandono de tales áreas se debe hacer de una manera juiciosa y responsable, máxime con la creciente concienciación de la sociedad, en general, de que la «calidad de vida» pasa por un aprovechamiento racional de todos los recursos de la tierra.

El estado que presentaban las superficies después de finalizadas las actividades mineras solía ser de un abandono total, donde difícilmente tenían cabida su aprovechamiento por parte de otros tipos de actividades.

Los problemas de la recuperación de esas áreas afectadas, están íntimamente asociados con los que han surgido del aprovechamiento de otros recursos naturales, pudiendo causar considerables efectos en amplias zonas y dando lugar a paisajes degradados.

El objetivo de la recuperación es restituir la posibilidad de que el terreno alterado vuelva a ser útil para un determinado uso, sin perjudicar el medio ambiente. Cualquiera que sea el uso adoptado en la recuperación deberá ajustarse a las necesidades de la zona y su entorno, y deberá ser compatible con los usos ahí existentes. De esta forma, en unos casos se podrá recuperar el uso original perdido, mientras que en otros, puede resultar más interesante el establecimiento de uno nuevo. Este comportamiento va a dar lugar a una terminología diferente en lo que respecta al concepto de recuperación de zonas degradadas.

Si lo que se pretende tras la explotación minera es volver a dar a los terrenos el mismo uso que tenían con una reduplicación exacta de las condiciones originales, se hablará entonces de una «Restauración» propiamente dicha, y cuando se pretende conseguir un aprovechamiento nuevo y sustancialmente diferente al anterior, los terrenos ten-

drán que ser «Rehabilitados» o «Recuperados». Por ser este último vocablo el de más amplia aplicación, nos referiremos a él en el presente capítulo.

Los usos posibles a que pueden destinarse los terrenos afectados por las explotaciones mineras pueden dividirse en:

- Urbanístico e industrial.
- Recreativo intensivo y deportivo.
- Agrícola.
- Forestal.
- Recreativo no intensivo y educacional.
- Conservación de la Naturaleza y refugio ecológico.
- Depósitos de agua y abastecimiento a poblaciones.
- Vertederos de estériles y basuras.

En principio, los usos posibles son muy amplios, si bien en cada zona afectada las características de las alteraciones, los entornos social, ecológico y paisajístico, y los condicionantes técnicos y económicos de las explotaciones son los factores que determinan la elección de los usos concretos.

Una vez elegido el uso que se considera más apropiado, es necesario acondicionar el terreno con el fin de que la instauración del uso no fracase. Para ello, hay que remodelar la zona, facilitar o mejorar las redes de drenaje que controlarán la erosión, y reconstruir el suelo. A su vez, el estudio del medio físico de la zona donde está ubicada la explotación y de su entorno va a proporcionar los datos referentes a las especies vegetales convenientes para su posterior selección e implantación. Fig. 13.1.

La Tabla 13.1 refleja una primera guía de las posibilidades de aprovechamiento de los terrenos, en función únicamente de las características físicas de las explotaciones mineras.

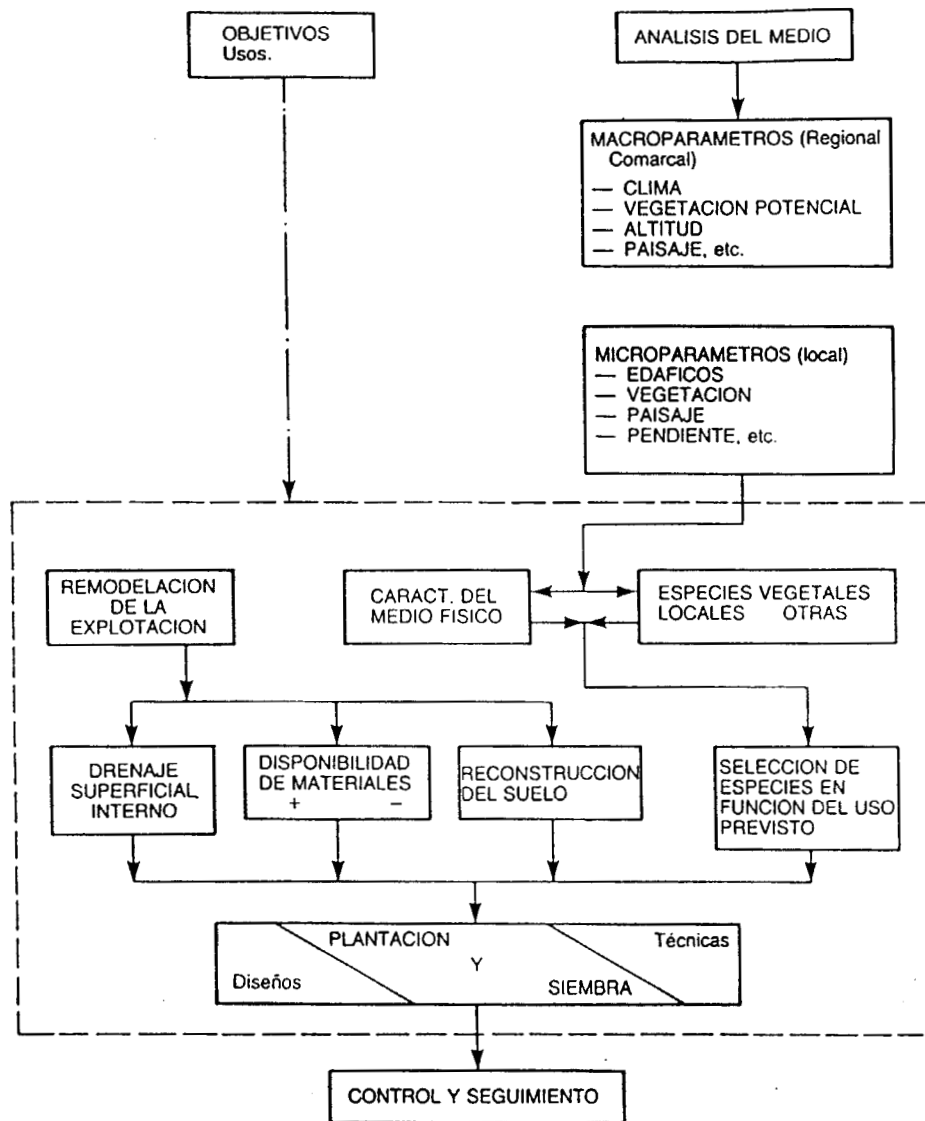


Figura 13.1. Factores del medio a tener en cuenta y acondicionamiento del terreno para instaurar un uso determinado.

TABLA 13.I

USOS POSIBLES	HUECOS				ESCOBRERAS	
	PROFUNDOS		SUPERFICIALES		Escarpada	Nivelada
	Secos	Húmedos	Secos	Húmedos		
— Uso original			2			2
— Agrícola			2			1
— Forestal			1		2	1
--- Industrial (piscícola)		2		1		
— Recreativo intensivo y deportivo	2	2	1	1		2
— Depósito de agua y abastecimiento				2		
— Recreativo extensivo y parques	1	2	1	1	2	2
— Conservación de la naturaleza	2	2	2	2	2	2
— Vertederos de estériles y basuras	2		2			

1. Uso principal. 2. Uso secundario.

Fuente: Coppin y Bradshaw, 1982.

Es importante, desde el punto de vista del explotador, que se establezca desde el principio el uso final previsto para los terrenos, con el fin de adecuar y contemplar el mismo en el proyecto minero, si bien cuando se trata de operaciones con una vida dilatada es más prudente considerar un abanico de alternativas para tomar la decisión de uso final una vez avanzado el desarrollo del proyecto.

Aunque se haya planificado «a priori», en la dedicación final del terreno una vez terminada la explotación minera, en la realidad, hay un margen de flexibilidad al respecto, pudiéndose cambiar el uso previsto por otro. Sin embargo, se aconseja respetar y aceptar el uso planteado en un principio, siempre y cuando esto sea posible.

La posibilidad de compatibilizar la recuperación de los terrenos con los trabajos de explotación debe intentarse siempre, pues se ha demostrado, por un lado, que los costes resultantes son más bajos y, por otro, que la capacidad de adaptación de los proyectos es mayor. El caso más representativo tal vez sea el de las minas de carbón en las que se realiza la transferencia de los estériles a los huecos de explotación, permitiendo reducir la distancia de transporte y mantener una superficie mínima de terrenos afectados.

Este modo de efectuar la recuperación posibilita una mayor alternativa de usos que si ésta se realiza después de finalizada la explotación y abandonado la zona, ya que algunos usos no van a ser viables. Este es el caso, por ejemplo de la actividad agrícola, que requiere unas determinadas condiciones del sustrato que solo podrán obtenerse si se han tomado medidas en el transcurso de la explotación y se llevan a la práctica en un corto periodo de tiempo, situación que no ha lugar en una recuperación «a posteriori».

Hay que indicar que en algunos proyectos es factible combinar, de forma afortunada, diferentes usos, lo cual permite una mayor flexibilidad y adaptación en respuesta a las circunstancias de cada terreno. Normalmente, se combinan con éxito áreas de recreo con zonas forestales, almacenamiento de agua o de conservación de la natura-

leza, o también depósitos de agua con reservas piscícolas, etc. Las actividades agrícolas generalmente no son compatibles con otros usos. Fig. 13.2.

Por último, señalar que la recuperación de este tipo de áreas degradadas es posible y necesaria, y requiere para su ejecución, imaginación, sensibilidad y conocimientos científicos.

A continuación, se puede observar, Fig. 13.3, el proceso a seguir cuando se plantea la actividad minera en un terreno. En dicha figura se muestran los distintos tipos de usos que se pueden realizar si la zona se recupera.

CULTIVOS																			
PASTIZAL	●																		
PASTOREO	●	●																	
FORESTAL	●	●	●																
RESIDENCIAL	●	●	●	●															
INDUSTRIAL	●	●	●	●	○														
RECREATIVO	●	●	●	●	●	○													
PARQUE NATURAL	○	●	●	●	●	○	●												
ABASTECIMIENTO DE AGUA	●	●	●	●	○	○	●	●											
TERRENO SIN DESARROLLAR	●	●	●	●	●	●	●	●	●										
USOS DE LOS TERRENOS EN ZONAS DEGRADADAS POR LA MINERIA Y AREAS ADYACENTES	CULTIVOS	PASTIZAL	PASTOREO	FORESTAL	RESIDENCIAL	INDUSTRIAL	RECREATIVO	PARQUE NATURAL	ABASTECIMIENTO DE AGUA	TERRENOS SIN DESARROLLAR									

Figura 13.2. Matriz de compatibilidad de usos de los terrenos.

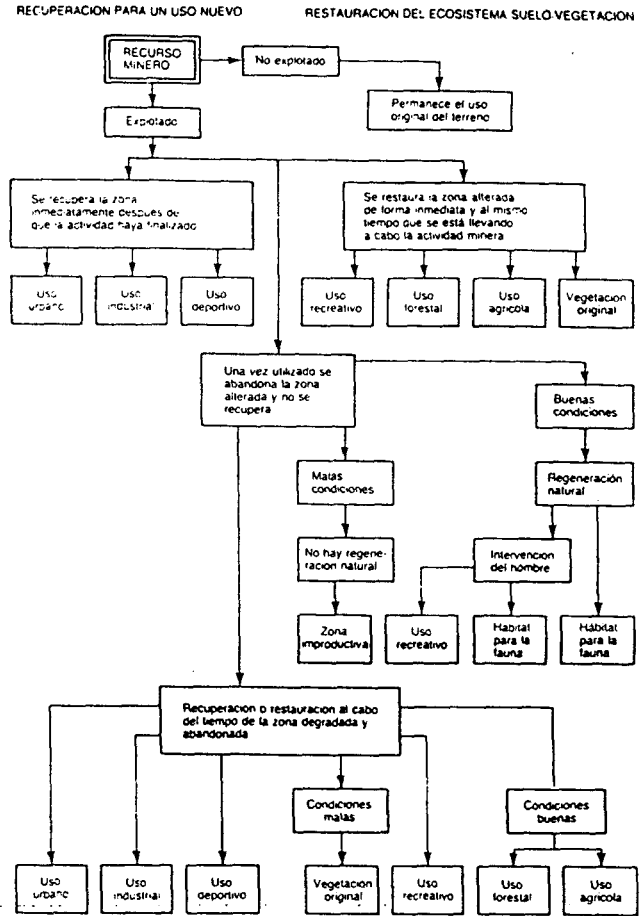


Figura 13.3. Esquema de la estrategia a seguir en la recuperación de una zona afectada por actividades mineras.

2. POSIBILIDADES DE USO

La recuperación de los terrenos afectados por las explotaciones mineras tiene en la mayoría de los casos como objetivos modelar las superficies y suministrar una cubierta vegetal, diferente según el uso previsto.

Existe, pues, una íntima relación entre la vegetación y los usos del terreno, de manera que las limitaciones que puedan surgir en el establecimiento o durante el crecimiento de las plantas suponen también restricciones en la elección del uso.

Las especies vegetales a seleccionar dependerán del uso que se pretenda dar a la zona alterada, y del grado de gestión a corto o a largo plazo. En la Tabla 13.11 se puede observar, a modo de guía, un esquema del tipo de especies a emplear para los usos más habituales.

TABLA 13.II

USO	TIPOS DE ESPECIES VEGETALES
Agrícola. Hábitat para la fauna Uso original; reestablecimiento de la vegetación. Recreativo.	Especies agrícolas que proporcionan un establecimiento rápido de la cubierta vegetal y alta productividad. Variedad de especies autóctonas y naturalizadas. Especies que proporcionen semillas, frutos, que sean de gusto agradable, lugares para nidificar, etc. Especies autóctonas. Producción para madera o para alimentos. Especies que se regeneren después de incendios, etc. Especies tolerantes, desarrolladas para cubrir terrenos deportivos. Especies que soporten el pisoteo. Especies de baja productividad.

Fuente: Willianson et al., 1982.

A continuación, se exponen los usos principales que se han venido dando, hasta hoy, en la recuperación de los terrenos afectados por las actividades extractivas. Si bien hay que señalar que los usos más empleados normalmente son: el agrícola, el forestal, el recreativo y el relacionado con el establecimiento de la vegetación para crear hábitats para la fauna.

Los factores condicionantes que pueden presentarse se derivan de la estabilidad de los taludes, del drenaje y de las propiedades geotécnicas de los terrenos para las cimentaciones. En áreas húmedas, estos últimos problemas se acentúan, pudiendo llegar incluso a imposibilitar este uso, al igual que sucede en terrenos blandos o mal drenados. Estas situaciones requieren un tratamiento adecuado del terreno para poder efectuar el uso previsto.

2.1. Uso urbanístico e industrial

Las excavaciones realizadas en áreas urbanas o muy próximas a éstas, cuando la extensión de tales núcleos las hayan englobado, pueden aprovecharse para construir zonas residenciales o incluso zonas comerciales. Las formas del terreno son en muchos casos ideales, ya que se han llevado a cabo abanalamientos y explanaciones que facilitan la construcción de las edificaciones y la integración en el medio urbano. Múltiples ejemplos pueden verse en todo el territorio nacional, y especialmente, en algunas zonas turísticas de la costa, donde los huecos de las canteras abiertas a media ladera, además de constituir solares para la construcción, Fig. 13.4, se habilitan también como espacios para el aparcamiento de vehículos. Un ejemplo de esto último se puede observar en Cáceres, donde la estación de autobuses está ubicada en una antigua cantera.

2.2. Recreativo intensivo y deportivo

En áreas urbanas y residenciales, los terrenos abandonados próximos a las mismas, pueden ser adecuados para desarrollar diferentes actividades recreativas y deportivas, especialmente para los jóvenes. Siempre que se trate de terrenos secos, es posible usarlos como parques de aventuras, circuitos para ciclismo y motocross, campos de golf, de fútbol, de tenis, instalaciones de tiro con arco, con pistola, escuelas de escalada, etc. Si se dispone de agua suficiente, podrán construirse estanques o lagos para practicar deportes como piragüismo, remo, esquí, natación, etc.

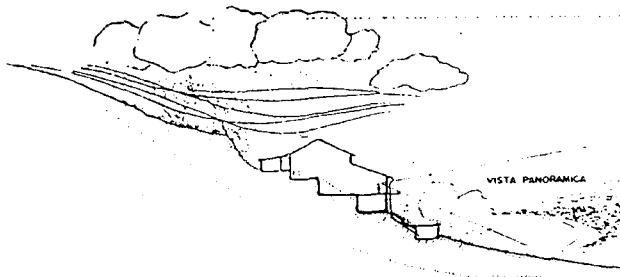


Figura 13.4. Aprovechamiento urbanístico de una excavación a media ladera.



Foto 13.1. Recuperación del hueco dejado por una mina de lignito pardo con la creación de un lago con usos deportivos (Rheinbraun, R. F. Alemania).



Foto 13.2. Antigua cantera cuyos terrenos se han acondicionado y se han convertido en un área apta para la práctica del golf (Florida, EE. UU.).

En todos esos aprovechamientos, las áreas deben acondicionarse remodelando el terreno, estabilizando los taludes y retirando todo vestigio minero que pudiera dar lugar a accidentes.

De igual modo, muchas de estas actividades exigen el desarrollo de ciertas estructuras especiales para su funcionamiento, por lo que se insiste de nuevo en las ventajas que conlleva una planificación del uso a implantar, a priori de la actividad minera.

Algunos huecos de cantera con formas de anfiteatro se pueden adecuar, creando pequeños bancales o peldaños, para el asiento de las personas y utilizar como auditorios para obras de teatro, ópera u otros espectáculos al aire libre.

Las zonas de explotación ubicadas en áreas rurales tienen un potencial similar para un uso recreativo menos intensivo, especialmente si se encuentran situadas próximas a zonas naturales muy visitadas como puede ser un Parque Natural. En estos casos las operaciones de recuperación pueden ir destinadas a proporcionar aparcamientos de vehículos, merenderos, campings, etc., desplazando de este modo, parte de la presión ejercida en esas áreas naturales de mayor fragilidad.

Las especies a seleccionar, tanto para el uso recreativo intensivo como para el no intensivo, deberán ser resistentes a las pisadas de las personas, de baja profundidad y normalmente de crecimiento lento.

2.3. Vertederos de estériles y basuras

Como en muchas ocasiones, las minas y canteras se encuentran próximas a áreas urbanas e industriales, un

uso muy frecuente de los huecos finales de excavación es el de depósitos de basuras, escombros y residuos industriales sólidos. El vertido de esos residuos debe llevarse a cabo de forma completamente controlada, especialmente si no tienen las características de los residuos inertes, realizándose un estudio inicial de las propiedades hidrogeológicas de las formaciones rocosas sobre las cuales se van a construir, las condiciones climatológicas y geográficas, las limitaciones socioeconómicas, etc.

En la Tabla 13.III se clasifican los diferentes tipos de terrenos en función de la permeabilidad de los materiales rocosos. Si la situación lo requiere, se impermeabilizará la base y los taludes finales de los huecos, por ejemplo con arcillas, para después ir colocando los residuos en capas de reducido espesor, por ejemplo de unos 2 m en el caso de las basuras urbanas, que una vez compactadas se recubrirán con tierra o material inerte en unos 20 cm, repitiéndose el proceso hasta la cota prevista, y extendiendo finalmente sobre la última tongada una capa de tierra vegetal de unos 30 cm que podrá sembrarse para su revegetación. En todos los casos se deberá disponer de los elementos de drenaje internos y superficiales.

El relleno habitualmente se realiza en áreas de pequeñas dimensiones de 0,3 a 1 ha con el fin de reducir la superficie descubierta y poder proceder a la recuperación simultánea de otras zonas. Especial cuidado debe ponerse en aquellas situaciones donde se requiera el drenaje de las aguas de lluvia que hayan percolado sobre los depósitos, así como la colocación de dispositivos para la evacuación de los gases producidos durante los procesos de fermentación anaerobia.

TABLA 13.III. CLASIFICACION DE LOS TERRENOS PARA SU UTILIZACION COMO VERTEDEROS

CLASE	1. IMPERMEABLE	2. SEMIPERMEABLE	3. PERMEABLE
Coefficiente de permeabilidad	$K \leq 10^{-9}$ m/s (0,01 mm/d) en 5 m	10^{-9} m/s < $K \leq 10^{-6}$ m/s (0,1 mm/d y 10 cm/d)	$K \geq 10^{-6}$ m/s (10 cm/d)
Ejemplos	Margas, esquistos arcillosos, pizarras.	Medios areno-arcillosos, areniscas.	Aluviones, gravas.
Consideraciones	Terrenos favorables, pero se necesita: — Drenar los efluentes, y — Evitar la entrada de agua de escorrentía.	Terrenos utilizables si: — La zona no saturada puede garantizar la depuración del agua lixiviada.	Alto riesgo de contaminación de los acuíferos.
Residuos admisibles	Ciertos tipos de residuos especiales.	Residuos asimilables a basuras urbanas.	Residuos inertes exclusivamente.

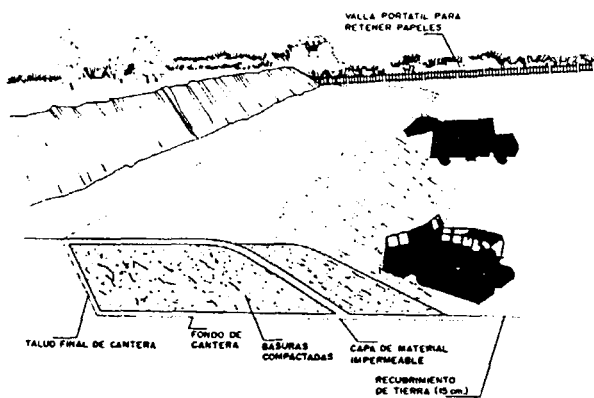


Figura 13.5. Vertedero controlado de basuras dentro de un hueco de explotación minera.

El aprovechamiento de las basuras para la producción de gas ha sido estudiado e incluso llevado a cabo en algunos países como Francia, Alemania y Estados Unidos. Durante la fermentación anaerobia de los desechos se producen gases que pueden recuperarse, siempre que el vertido se haya efectuado de manera controlada.

Los principales constituyentes de los citados gases son el metano (CH₄) y el anhídrico carbónico (CO₂), cuya presencia varía entre los siguientes límites:

$$40 \% < \text{CH}_4 < 60 \%$$

$$30 \% < \text{CO}_2 < 45 \%$$

Otros gases igualmente presentes, pero en mucha menor proporción, son: el vapor de agua, el oxígeno y el nitrógeno. Dependiendo del contenido en metano, los poderes caloríficos oscilan entre las 3.500 y las 6.000 Kcal/m³. El porcentaje de metano está relacionado con las características de las basuras: composición, humedad, etcétera.

La utilización del gas depende de las propiedades de éste: presión, caudal, poder calorífico, regularidad, presencia de impurezas, etc., siendo además precisa su de-

puración mediante filtros y la separación del CO₂ mediante barboteo en agua. El gas depurado puede emplearse en la alimentación de generadores eléctricos, en motores térmicos de gas pobre, en el sector industrial y agrícola, o simplemente introduciéndolos en la red general de distribución de gas.

Este uso de los huecos de las minas abandonadas es el menos noble, pero al mismo tiempo el más codiciado por algunas autoridades municipales, pudiendo llegar a desembocar en puntos altamente desagradables y molestos si los vertidos se realizan de manera incontrolada y con emisión continua de humos, olores e incluso de aguas contaminadas.

Cuando los residuos industriales están constituidos en parte por líquidos contaminantes, un requisito previo antes de su vertido es la realización de un estudio hidrogeológico y la ejecución de obras impermeabilizantes del hueco receptor. Se han producido diversos casos de vertidos incontrolados en huecos de labores antiguas, tanto a cielo abierto como subterráneos, con importantes daños hidrológicos por contaminación de los acuíferos. En cualquier caso, se deberán seguir las normas existentes en la legislación vigente.

2.4. Agrícola

El uso agrícola es probablemente uno de los usos más utilizados en la recuperación de los terrenos afectados por las actividades mineras. Esto parece estar justificado fundamentalmente por motivos económicos, tanto en aquellas zonas donde el uso original era el agrícola, y por tanto la restauración de dicho uso resulta apropiada y obvia, como en aquellas otras donde la dedicación original no era la agricultura. En cualquier caso, el establecimiento de la vegetación es más barato que en otro tipo de usos como es el forestal o el de habitat para la fauna, y la rentabilidad económica es mayor y más inmediata, de forma que compense los gastos ocasionados en la recuperación.

Las excavaciones finales con una topografía suave, gran extensión y próximas a zonas cultivadas pueden destinarse, de una manera provechosa, a usos agrícolas, es-

pecialmente cuando las operaciones mineras tienen una duración limitada y se ha tomado la precaución de apilar la tierra vegetal y el material de cobertera.

Esas tierras almacenadas son ricas en arcillas y en materia orgánica y, por tanto, aptas para constituir un medio óptimo para el aprovechamiento agrícola, una vez colocadas o extendidas sobre las plataformas creadas en las explotaciones. El espesor mínimo que se recomienda es de unos 50 cm con el fin de que las máquinas agrícolas trabajen adecuadamente.

La alternativa de usos dentro de la dedicación agrícola comprende los cultivos arables, pastos, forraje y pastos extensivos, donde el tipo de vegetación y los condicionantes son diferentes para cada uno de ellos.

En cuanto al factor geométrico que condiciona la restauración del uso agrícola está en primer lugar la pendiente. Fig. 13.6. En general, se necesitan huecos de excavación grandes y poco profundos con pendientes no superiores a los 15° si se quiere establecer un pastizal, e inferiores a los 5° para los cultivos arables. También habrá que considerar la integración paisajística del nuevo uso en el modelo agrícola del entorno, si es que este es el uso del mismo, de manera que no es aconsejable establecer una cubierta de pastos en un área de cultivos, incluso aunque el pasto reconstruya más rápidamente la estructura del suelo. En las Tablas 13.IV y 13.V se indican otros condicionantes para el aprovechamiento agrícola de un terreno.

TABLA 13.IV. PRINCIPALES CONDICIONANTES QUIMICOS EN EL USO AGRICOLA

FACTOR	LIMITACIONES QUIMICAS
Acidez/alcalinidad	Es impracticable cualquier tipo de uso agrícola, pastizal, forraje o cultivo, si el material es demasiado ácido (pH < 4,5).
Nutrientes	La falta de nutrientes en los terrenos sometidos a actividad minera puede suponer un serio condicionante en la restauración de dichos terrenos para actividades agrícolas. No obstante, con gran cantidad de fertilizantes y repetidas aplicaciones puede llevarse a cabo, aunque los costes de tales prácticas pueden hacer no rentable el efectuar este uso.
Metales tóxicos	Algunas minas antiguas contienen altos niveles residuales de metales tóxicos que no permiten mantener el nivel de productividad requerido, incluso añadiendo fertilizantes. La contaminación de los cultivos por toxicidad puede causar enfermedades en animales y personas.

TABLA 13.V. PRINCIPALES CONDICIONANTES FISICOS EN EL USO AGRICOLA

FACTOR	LIMITACIONES FISICAS
Pedregosidad	Las piedras en la superficie del terreno a recuperar interfieren la gestión agrícola. Generalmente, terrenos con menos de 0,01 % de piedras en la superficie total pueden cultivarse, de 0,01-15 % en las capas superficiales dificultan el cultivo. Más del 15 % hacen prácticamente imposible el uso agrícola.
Pendiente	Pendientes de más del 25 % (15°) son demasiado elevadas para cualquier alternativa agrícola; más del 10 % (5°) son inapropiadas para cultivos arables.
Disponibilidad de agua	La supervivencia y el crecimiento en ciertos climas puede depender del riego, aunque si se emplean especies autóctonas el riego puede ser únicamente necesario para el establecimiento.

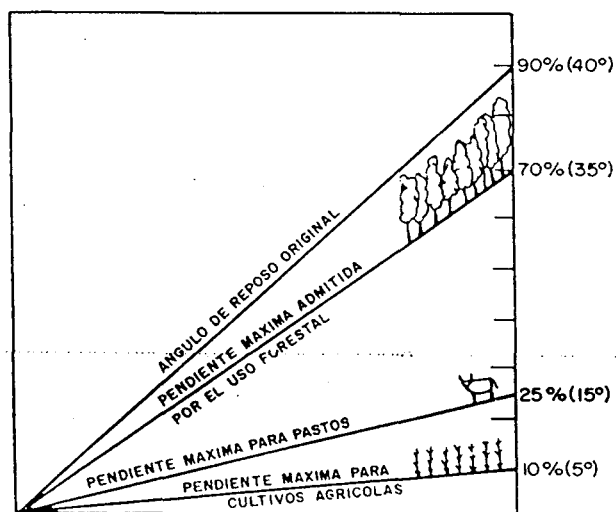


Figura 13.6. Pendientes máximas para diferentes usos del terreno (Coppin y Bradshaw, 1982).

La erosión del suelo constituye un problema en las tierras agrícolas, tanto dedicadas para cultivos como para pastos y forrajes. El empleo de una cubierta de cultivo anual o de especies utilizadas para pastos o forrajes, ayudan a estabilizar el suelo y a reducir la erosión.

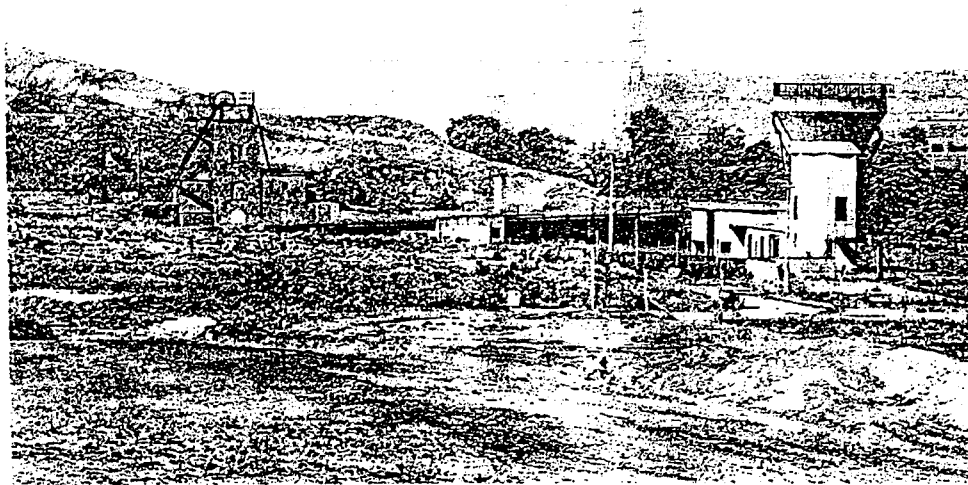


Foto 13.3. Desmantelamiento de instalaciones mineras y aprovechamiento de los terrenos para agricultura. (Mina de carbón en Derbyshire).

Por otro lado, debe garantizarse el drenaje de la zona recuperada verificando que el nivel freático se encuentra siempre a más de 50 cm por debajo de la superficie. En caso contrario, será preciso efectuar un relleno con materiales rocosos o escombros inertes que no contaminen el agua, para extender sobre ellos la capa de suelo recuperado.

Cuando no se disponga de suficiente cantidad de suelo agrícola útil, será preciso agregar otros materiales finos como arena, cenizas volantes, residuos de lavadero, etc., analizando previamente las propiedades edáficas de éstos, y materiales de enmienda y fertilizantes. Al mismo tiempo se realizarán operaciones mecánicas de extendido, de despedregado, de arado y subsolado, etc.

En cualquier caso las limitaciones físicas y químicas, particularmente la toxicidad de los estériles, necesitarán un tratamiento adecuado como puede ser el aporte de materia orgánica, fertilizantes, etc., que pueden encarecer excesivamente la recuperación, por lo que resultará más rentable plantear otra alternativa de uso del terreno.

Como los rendimientos de los suelos a corto plazo no son comparables con los del entorno, o existen dudas sobre la calidad de los mismos, una práctica aconsejable consiste en el arrendamiento de los terrenos recuperados

a agricultores de la zona, de forma que se consiga una mayor aceptación social y un aprovechamiento de su experiencia.

2.5. Forestal

Este tipo de dedicación está menos extendido que el agrícola, y aunque normalmente su instauración es más cara, en algunas ocasiones resulta más económico que el uso agrícola, pudiendo ser una buena alternativa en aquellas tierras de peor calidad donde no es posible llevar a cabo el mencionado uso. No obstante, su rentabilidad es más baja y los resultados a más largo plazo.

La reforestación se efectúa en superficies de cierta extensión (>0,25 ha), y puede llevarse a cabo en suelos de baja fertilidad, en taludes con pendientes de hasta el 70 % (35°), y en sitios pedregosos. Los pH bajos, la falta de nutrientes, el exceso de metales tóxicos y la compactación del sustrato pueden limitar su crecimiento.

Los lugares con toxicidad elevada no podrán destinarse a la producción maderera, sino que la reforestación tendrá una finalidad diferente, recreativa, faunística, etc.

Para repoblar forestalmente un terreno, se necesita que los suelos tengan unas características adecuadas, primero físicas para retener el agua necesaria para las especies arbóreas y el desarrollo de sus raíces, y después químicas y biológicas, para disponer de elementos nutrientes y condiciones óptimas.

El espesor del suelo y subsuelo que se precisa depende de las especies elegidas, por ejemplo 60 cm para el pino negro y el abedul, 1,20 m para el castaño y el abeto, 2 m para el roble, etc. Cuando no se disponga de material suficiente, se aprovecharán los lodos de decantación, que garantizan una buena capacidad de retención por la elevada cantidad de finos que poseen, algunos tipos de estériles y basuras inertes, las cenizas volantes y escorias de centrales térmicas, etc. Para crear el horizonte húmico, que en ocasiones es indispensable, se sembrarán los suelos con gramíneas y leguminosas, que tienen la propiedad de fijar el nitrógeno y, si es aconsejable, la in-

critorio forestal, así como el método de implantación, deberá realizarse siempre por personal especializado.

2.6. Recreativo no intensivo y educacional

En muchas áreas rurales, las antiguas explotaciones ofrecen posibilidades de uso similares, en muchos aspectos, a las ubicadas en zonas urbanas, ya comentadas anteriormente. Zonas amplias con gran variedad de hábitats, normalmente con extensiones superiores a 10 ha, pueden aprovecharse como parques, incluyendo estanques, áreas de esparcimiento, aparcamientos, merenderos, embarcaderos, pistas de equitación y otros servicios.

Algunos lugares pueden poseer singularidades relevantes, tales como estructuras geológicas: pliegues, cabalgamientos, fallas, etc., con litologías especiales, valores arqueológicos y ecológicos que puedan utilizarse con fines educativos e incluso científicos.

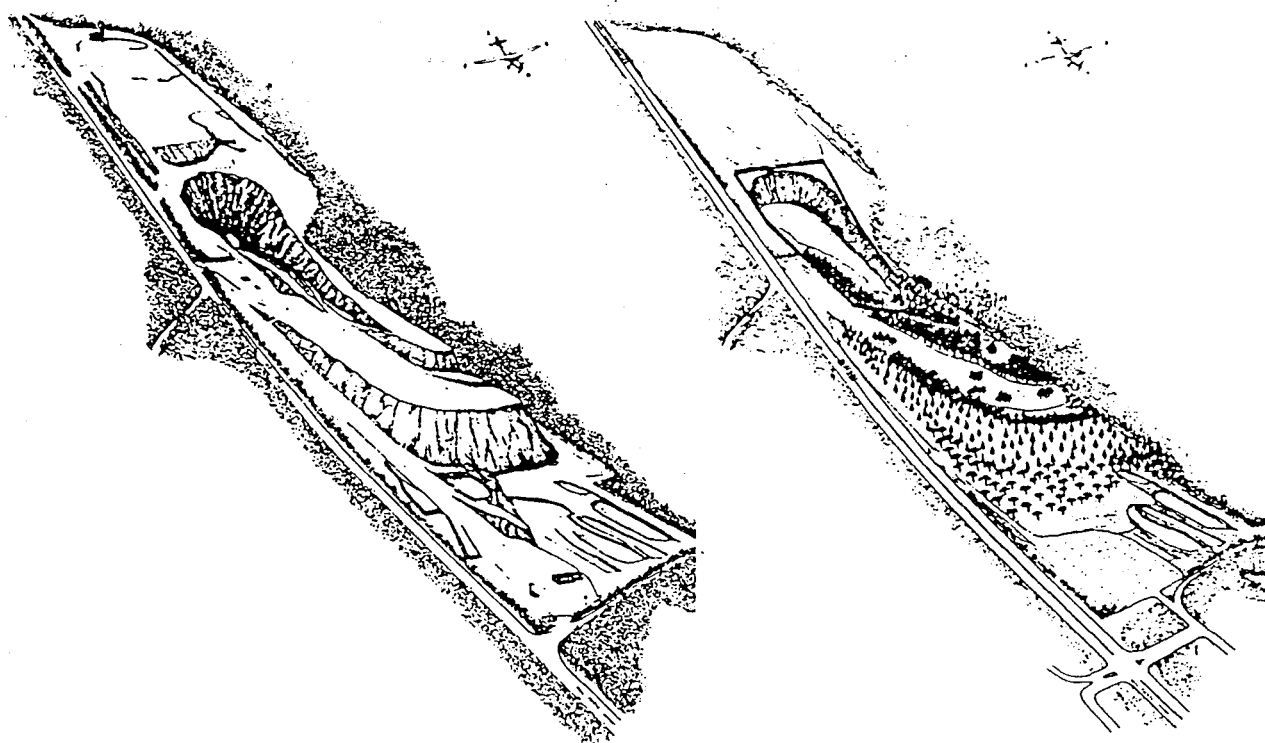


Figura 13.7. Recuperación forestal de los terrenos afectados por una explotación a cielo abierto.

culación de lombrices de tierra, que se ha demostrado que favorecen la reconstrucción de los suelos.

La dedicación forestal tiene como finalidad suministrar madera, proporcionar alimento y protección a la fauna, proteger al suelo frente a la erosión, aunque resulta menos eficaz a corto plazo que la cubierta herbácea, y por último se puede contemplar este uso con una finalidad paisajística, ya que se trata de un componente visual muy importante que requiere un largo período de tiempo para su establecimiento. Puede llegar a convertirse en un valioso recurso y permitir la combinación con otros usos, tales como los recreativos, la fauna, etc.

La elección de las especies más adecuadas según el

Si la extensión de los terrenos afectados es pequeña, pero se encuentra en las proximidades de algún parque natural, podrán adecuarse para la instalación de campings o bases de campamentos veraniegos.

La construcción de parques acuáticos requiere la preparación de los huecos, tanto en la forma como en los taludes de los márgenes y en la profundidad, con el objetivo principal de crear un hábitat idóneo para el establecimiento de la vegetación, de la fauna piscícola y de las aves acuáticas. Para preservar la conservación de estos lugares, se debe limitar el acceso a los mismos mediante la creación de barreras, senderos, etc, al mismo tiempo que se prepararán, si se estima conveniente, observatorios ornitológicos, puntos para la pesca, etc. Figs. 13.8 y 13.9.

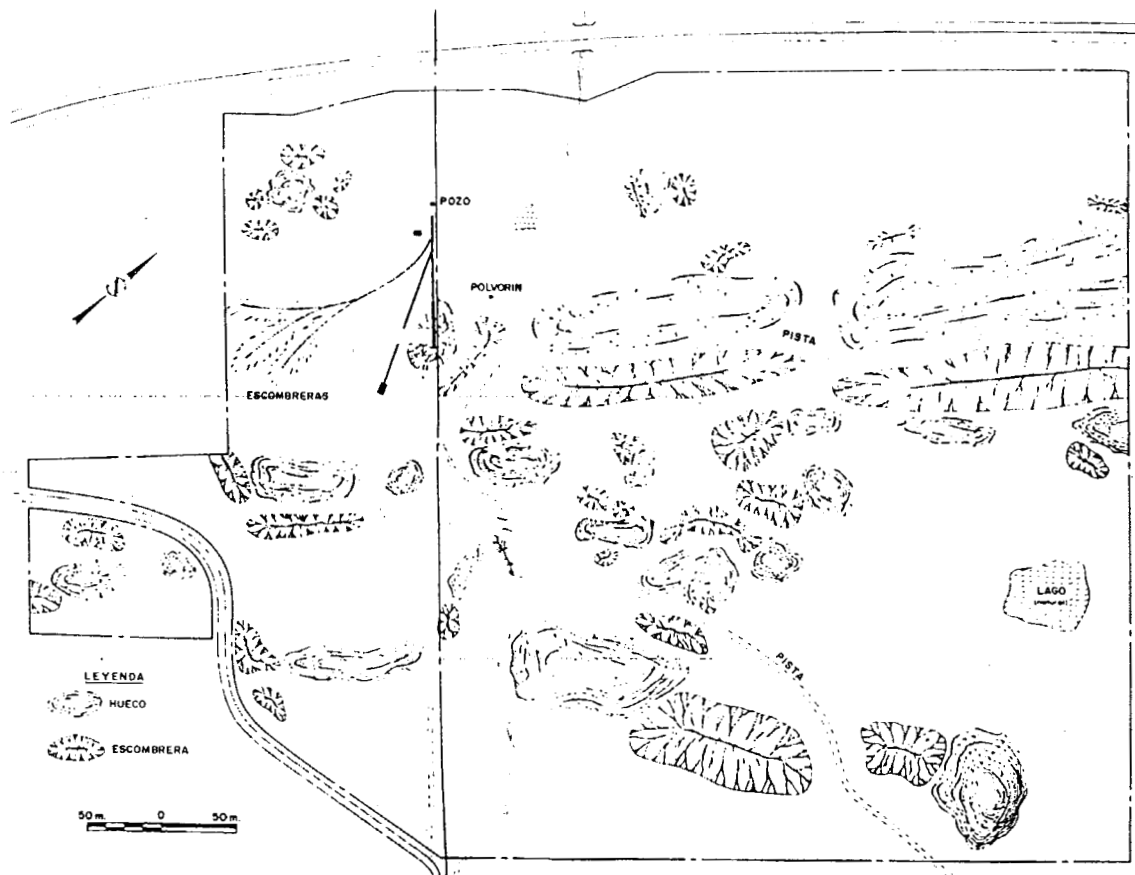


Figura 13.8. Estado de abandono de un área con explotaciones mineras antes de la recuperación.

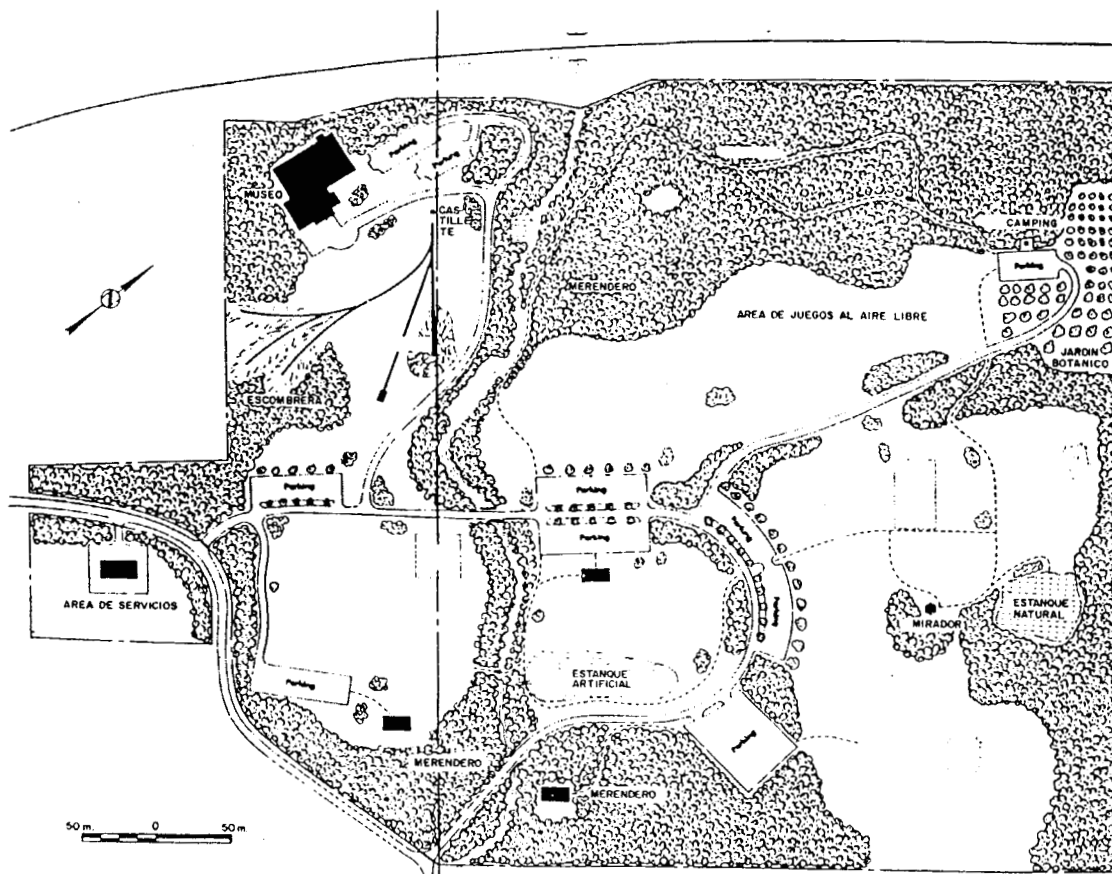


Figura 13.9. Recuperación mediante la creación de parques, campos deportivos, etc.

2.7. Conservación de la naturaleza y refugios ecológicos

Los procesos de colonización natural por diversas especies voluntarias en los antiguos terrenos ocupados por explotaciones mineras confieren a éstos, al cabo de un cierto tiempo, un potencial ecológico importante. Los procesos de colonización son complejos y se producen de forma fortuita más que planificada, siempre que no exista, desde el abandono, una intervención posterior del hombre.

Cuando las canteras lleven abandonadas bastante tiempo y existan presiones sociales para su recuperación o aprovechamiento por otros usos, es necesario efectuar previamente estudios encaminados a identificar y evaluar las diferentes especies de animales, plantas e insectos que se hayan instalado y refugiado allí, pues suelen aparecer especies endémicas o protegidas de alto valor ecológico. En tales casos, esas antiguas explotaciones pueden reacondicionarse con las precauciones oportunas, o bien destinarse a fines educativos y científicos para el estudio de los ecosistemas naturales e investigación de las interrelaciones que existen entre el clima, la geología, la flora, y la fauna, dentro de los procesos de colonización.

Numerosos tipos de explotaciones aparecen como lugares de interés biológico. Así, por ejemplo, sucede con las canteras de calizas, margas y yesos, escombreras de estériles alcalinos y terrenos de graveras y arenosos inundados total o parcialmente. Sin embargo, cuando las rocas explotadas son compactas y ácidas y los sustratos de base pobres, son muy pocas las especies vegetales que llegan a instalarse.

La colonización natural por la vegetación se produce generalmente cuando existe en el entorno próximo una fuente de semillas, y éstas se transportan y diseminan por la acción del viento, o a mayores distancias por los excrementos que depositan los pájaros y pequeños mamíferos después de ingerir ciertos vegetales. También con el movimiento de tierras procedentes de otros lugares, se transportan numerosas especies vegetales de origen diverso en forma de rizomas, plantas enteras o semillas, si bien estos aportes son, por lo general, desfavorables para una recolonización espontánea armoniosa.

La intervención voluntaria del hombre favorece el reestablecimiento de la vegetación autóctona más rápidamente que si se deja actuar a los procesos naturales exclusivamente. Con ello se pretende conseguir una armonización con el entorno, y crear un hábitat para la fauna o incluso restaurar la flora local.

En la Tabla 13.VI se pueden observar las ventajas e inconvenientes que se derivan del establecimiento de la vegetación natural. Quizás uno de los mayores problemas existentes, sea la obtención de semillas o plantas de especies naturales en cantidad suficiente como para poder llevar a cabo una revegetación a gran escala.

En cuanto a la introducción de la fauna ésta va íntimamente ligada a la vegetación, pero puede instalarse incluso en los primeros estadios de creación de las explotaciones, a pesar de que esos sistemas se consideren por los biólogos como abióticos, desprovistos de especies primitivas como los musgos o líquenes. Son numerosas las aves que anidan en puntos inaccesibles de los taludes de los bancos y se alimentan de los insectos, que también han colonizado esos lugares al encontrar unos microclimas adecuados. Foto 13.4.

TABLA 13.VI. VENTAJAS E INCONVENIENTES EN EL ESTABLECIMIENTO DE LA VEGETACION

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Se establece una comunidad que se automantiene por sí misma.	Puede que las especies autóctonas no estén disponibles comercialmente.
La vegetación es compatible con los condicionantes locales, como el clima. El riego no es necesario, excepto en la fase de establecimiento.	El almacenamiento y germinación de las especies autóctonas requiere conocimientos especializados.
Las especies suelen adaptarse a suelos de baja fertilidad y las necesidades para llevar a cabo la gestión a largo plazo son reducidas.	Las plantas de crecimiento lento, y algunos árboles y arbustos pueden tardar años en alcanzar un tamaño satisfactorio.
Armonización del lugar rehabilitado con el paisaje del entorno.	Los suelos perturbados por la actividad minera difieren considerablemente de los suelos no alterados. Por lo que se pueden encontrar dificultades en el establecimiento de especies autóctonas.
La fauna recolonizará el área. Pueden crearse hábitats para la fauna como un uso del terreno.	Hay poca probabilidad de obtener un beneficio económico con este tipo de uso.

Fuente: Williamson y Bradshaw, 1982.



Foto 13.4. Nidos de abejarucos en un acopio de estériles.

Cuando la revegetación del terreno con especies autóctonas tiene como objetivo procurar un refugio a la fauna, deberán seleccionarse las especies nativas o/y naturalizadas que proporcionen alimento, protección, esparcimiento y que tengan capacidad de regeneración después de efectuarse determinadas prácticas perjudiciales como es la quema de un bosque.

Hay que señalar que cuanto mayor variedad de especies vegetales haya, mayor diversidad de fauna podrá encontrarse.

El hábitat para la fauna puede desarrollarse bien como un uso primario, o en asociación con otros usos de la zona.

2.8. Depósitos de agua y abastecimiento

Los huecos profundos de minas y canteras es posible utilizarlos como depósitos de almacenamiento de agua con diversos fines: para la regulación hidráulica; para la lucha contra avenidas; para la navegación, para el riego; para el abastecimiento de agua a núcleos urbanos; para la recarga de acuíferos; para el almacenamiento de energía, si se dispone de un pequeño salto reversible o una estación solar; para acuacultivos y producción de biomasa o, simplemente, para consumo en industrias próximas.

3. CAPACIDAD DE USO DE LOS TERRENOS

Los factores que influyen en los usos potenciales de un terreno no poseen en cada uno de ellos la misma importancia. Probablemente, un factor que sea extremadamente importante para un uso en un terreno lo sea relativamente poco para otro uso alternativo. En las Tablas 13.VII.

y 13.VIII. se resumen los factores naturales y culturales y los grados de influencia que representan en cada tipo de aprovechamiento (Clar y Ramani, 1986).

Para un caso concreto de recuperación, estas tablas constituyen una herramienta de encuadre inicial y aproximación al problema, tras la cual se procederá a la evaluación y comparación de las diferentes alternativas siguiendo el proceso de la Fig 13.10. La metodología propuesta comprende 4 etapas y es análoga al procedimiento empleado en la investigación minera. El objetivo que se persigue es diseñar un plan de aprovechamiento de los terrenos que sea adecuado a las condiciones ambientales, sociales y económicas del entorno de la explotación. Al igual que en otros procesos secuenciales, después de cada etapa, se toma una decisión que permite el paso a la siguiente fase o el retorno a la etapa inicial dentro del proceso de planificación. Tiene, pues, un carácter interactivo y en la práctica son inevitables los solapes entre las diferentes etapas.

TABLA 13.VII. IMPORTANCIA RELATIVA DE LOS FACTORES GEOAMBIENTALES EN LA DETERMINACION DEL USO ADECUADO DE LOS TERRENOS
(Clar y Ramani, 1986)

FACTORES GEOAMBIENTALES	USOS DEL TERRENO						
	FORESTAL	RECREATIVO	AGRICOLA	RESIDENCIAL	INSTITUCIONAL	COMERCIAL	INDUSTRIAL
— Relieve topográfico	2 *	3	1	2	2	2	2
— Pendiente	1	3	1	2	1	1	1
— Altitud	2	3	2	3	3	3	3
— Exposición	2	3	2	3	3	3	3
— Drenaje	1	3	1	1	1	1	1
— Temperatura	1	2	1	3	3	3	3
— Precipitación	1	2	1	3	3	3	3
— Consolidación de los estériles	2	2	1	2	3	3	3
— Suelos:							
• Propiedades agrícolas	2	2	1	3	3	3	3
• Propiedades técnicas	3	3	2	1	1	1	1

- * 1 = Factor con un alto grado de influencia sobre la recuperación del terreno para un uso particular.
- 2 = Factor con un grado de influencia moderado.
- 3 = Factor con un grado de influencia bajo.

TABLA 13.VIII. IMPORTANCIA RELATIVA DE LOS FACTORES CULTURALES EN LA DETERMINACION DEL USO ADECUADO DE LOS TERRENOS
(Clar y Ramani, 1986)

FACTORES CULTURALES	FORESTAL	RECREATIVO	AGRICOLA	RESIDENCIAL	INSTITUCIONAL	COMERCIAL	INDUSTRIAL
— Localización	3 *	1	2	1	1	1	1
— Accesibilidad	3	2	3	1	1	1	1
— Tamaño y forma del área	3	3	1	2	2	1	1
— Usos del terreno en el entorno	3	2	3	1	1	1	3
— Propiedad de los terrenos	3	2	3	2	2	2	2
— Tipo e intensidad del uso	3	3	3	1	2	1	2
— Características de la población	3	2	2	1	2	1	2
— Limitaciones legales	3	2	2	1	1	1	1
— Actitudes de la compañía	2	2	2	1	1	1	1

- * 1 = Factor con un alto grado de influencia sobre la recuperación del terreno para un uso particular.
- 2 = Factor con un grado de influencia moderado.
- 3 = Factor con un grado de influencia bajo.

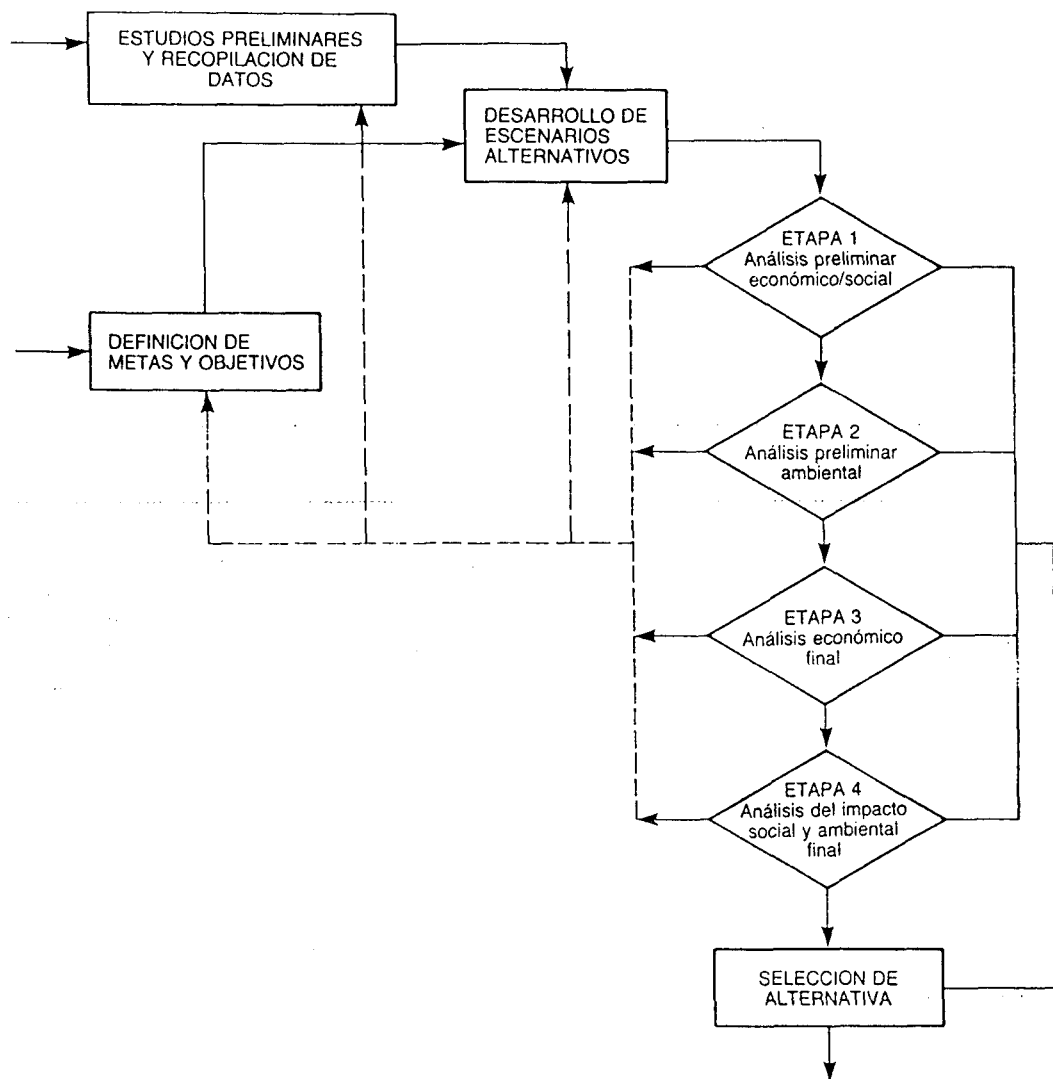


Figura 13.10. Proceso para la evaluación de usos alternativos del terreno.

Generalmente, la consideración preliminar de los factores económicos y sociales elimina un cierto número de usos potenciales de los terrenos. Como el proceso es continuo, puede ser necesario reformular escenarios alternativos, adquirir nuevos datos o redefinir los objetivos iniciales.

La primera etapa tiene una duración corta y se suele limitar a revisar las características sociales y económicas del entorno, así como los usos actuales, el crecimiento de la población y los planes de desarrollo. Es útil en esta fase mantener contactos con los planificadores y autoridades locales.

A continuación, se realizará un análisis preliminar ambiental con un carácter general y no excesivamente detallado. Mediante listas de chequeo, se revisarán distintos factores ambientales comprobando si existen limitaciones físicas que impidan un uso de los terrenos. Por ejemplo, unas características de los suelos deficientes impedirán su aprovechamiento con fines agrícolas, o la presencia en la superficie de materiales productores de aguas ácidas desaconsejará los usos recreativos que requieran estanques de agua.

Después de contemplar esas dos etapas, suele ser ne-

cesario mejorar y completar los planes de usos previstos. El análisis económico final de la etapa 3 puede llevarse a cabo de múltiples formas. Por un lado, se estimarán las inversiones y costes necesarios para alcanzar un uso específico y los ingresos que puede suponer la venta de los terrenos acondicionados, o los flujos generados durante un período de tiempo por el aprovechamiento previsto de los mismos, tal es el caso del uso agrícola donde se producen unas cosechas de forma periódica.

En la etapa final de evaluación, se emplearán técnicas analíticas desarrolladas por técnicos ambientalistas y expertos sociales para comparar planes alternativos. Por lo general, esta etapa sólo se realiza cuando se ha demostrado previamente que existen dos o más usos de los terrenos con un potencial económico importante. Un método aplicable para la evaluación de los impactos ambientales es el método matricial desarrollado por Leopold et al. (1971). Para la evaluación de los impactos sociales, existen numerosos métodos entre los que destacan los siguientes: las listas de chequeo, las técnicas Dephi y Delbecq, la extrapolación de tendencias, los modelos de simulación, las tablas input-output, las tablas beneficios-costes, etc.

El análisis de impactos social y ambiental puede combinarse también con las técnicas de toma de decisiones multicriterio.

Otra forma de determinar el uso potencial o la capacidad del terreno para aceptar un determinado uso después de que la actividad minera haya tenido lugar, es a partir de la Clasificación de Capacidades utilizada en Gran Bretaña (U.K. Land Use Capability Classes). Según este método el criterio de clasificación depende de los siguientes factores: pendiente, textura del suelo y pedregosidad, clima, humedad (drenaje y disponibilidad del agua), y riesgo de erosión. Factores tales como fertilidad y gestión no se consideran, ya que son fácilmente modificados y no llegan a afectar al potencial de la tierra.

El criterio puede utilizarse no sólo para evaluar el potencial de un área ya restaurada, sino también para determinar las medidas necesarias a tener en cuenta para hacer un área apropiada para el futuro uso.

En la Tabla 13.IX se pueden observar los usos del terreno asociados con las clases de capacidad, y en la Tabla 13.X se especifican los criterios que definen las clases de capacidad del terreno.

TABLA 13.IX. USOS DE LA TIERRA ASOCIADOS CON LAS CLASES DE CAPACIDAD DEL TERRENO (Coppin and Bradshaw, 1982)

USOS	CLASES DE CAPACIDADES						
	1	2	3	4	5	6	7
Cultivos: intensivo	x	x					
moderado	x	x	x				
limitado	—	—	x	x			
Pastos: intensivo	—	x	x	x			
moderado	—	—	x	x	x		
limitado	—	—	x	x	x	x	
Forestal	—	—	—	x	x	x	
Recreativo	—	—	—	x	x	x	x
Fauna	—	—	—	—	x	x	x

X: Adecuado. El aprovechamiento de la tierra será mayor cuando se plantee disponer la restauración hacia el uso múltiple.

TABLA 13.X. CRITERIOS QUE DEFINEN LAS CLASES DE CAPACIDAD DE LA TIERRA

FACTORES	CLASES DE CAPACIDAD (Capacidad decreciente)						
	1	2	3	4	5	6	7
1. Factores del lugar:							
Pendiente máxima (°)	6	7	11	25	25	25	25
Grupo climático (a)	I	I	I, II	I, II, III	I, II, III	I, II, III	I, II, III
Altitud, niveles máximos	150	230	11	380	550	600	600
Riesgo de erosión	Muy bajo	Bajo	Bajo	Medio	Lig. alto	Alto	Alto
Drenaje	Bueno	Moderado	Pobre o imperfecto	Pobre inund. de 1-5 años	Pobre inund. de 1-3 años	Pobre frec. inund.	Muy pobre o anegado
2. Factores del suelo:							
Capac. agua disponible (b)	250 ó 50	200 ó 40	120 ó 25	80 ó 20	80	50	Ninguno
Enraizamiento profundo (mm)	2.000	1.500	750	500	300	Ninguno	Ninguno
Textura del suelo (c)	1, Cl, Si	No, Cl, Si, Sk	No, Sk	No, Sk	No, Sk	Ninguno	Ninguno, incluy. rocas
Pedregosidad (ϕ 25 mm)	1 %	5 %	15 %	50 %	50 % algún canto rodado	50 % con cantos	Cantos y rocas presentes
Reacción del suelo, pH	5,5-7,5	5,5-7,5	5-8	4,5-9	4,5-9	4,5-9	Ninguno

(a) Grupos climáticos para Gran Bretaña (calculado para periodos de abril-septiembre).

- I. PRECIPITACION: < 100 mm y media de la temperatura máxima diaria > 15° C.
- II. PRECIPITACION: < 300 mm, temperatura > 14° C.
- III. PRECIPITACION: > 300 mm, temperatura < 14° C.

(b) Capacidad de agua disponible, en mm o mm/m de profundidad.

(c) Textura del suelo:

- S = arena.
- Cl = arcilla.
- Si = limo.
- I = franco.
- Sk = esquelético (> 35 % fragmento grueso y < 18 % arcilla).

Fuente: Coppin and Bradshaw, 1982.

Por último, en la Tabla 13.XI se refleja un resumen de los requerimientos y las posibles soluciones que pueden

seguirse para suplantar un determinado uso.

TABLA 13.XI. ALGUNOS REQUERIMIENTOS Y POSIBLES SOLUCIONES NECESARIAS PARA IMPLANTAR UN DETERMINADO USO

TIPO DE USO	REQUERIMIENTOS	SOLUCIONES
Urbanístico e industrial.	<ul style="list-style-type: none"> — Estabilidad de los taludes y control de la erosión. — Estudio de propiedades geotécnicas de los terrenos para las cimentaciones. — Localización cerca de núcleos urbanos y rurales. 	<ul style="list-style-type: none"> — Remodelado para reducir pendientes. — Obras de drenaje. — Medidas estructurales, cuando sea necesario.
Recreativo y deportivo.	<ul style="list-style-type: none"> — Estabilidad de los taludes. — Retirada de elementos que puedan dar lugar a accidentes. — El uso recreativo no intensivo y educacional requiere grandes superficies, que pueden sobrepasar las 10 ha en muchos casos. — Localización: cerca de núcleos urbanos y rurales. 	<ul style="list-style-type: none"> — Remodelado del terreno. — Corrección de pendientes. — Medidas estructurales si son necesarias. — Establecimiento de una cubierta vegetal.
Vertedero de basuras y estériles.	<ul style="list-style-type: none"> — Estudio de la permeabilidad de los materiales rocosos. — Estudio de las características de los vertidos. — Ubicación en lugares poco visibles. Localización: cerca de núcleos urbanos e industriales. 	<ul style="list-style-type: none"> — Impermeabilización, cuando sea necesario. — Mejora del drenaje interno y superficial.
Agrícola.	<ul style="list-style-type: none"> — Huecos de excavación grandes y poco profundos. — Limitaciones: Químicas: acidez/alcalinidad, nutrientes y toxicidad. Físicas: <ul style="list-style-type: none"> • Pedregosidad > 15 %, imposible el uso agrícola. • Pendiente: < 15° pastizal. < 5° cultivos arables. • Disponibilidad de agua. • Riesgo de erosión. 	<ul style="list-style-type: none"> — Añadir materia orgánica. — Enmienda caliza para corrección de acidez. — Aporte de elementos finos. — Abonado. — Mejora del drenaje. — Disminución de pendientes. — Establecimiento de la vegetación.
Forestal	<ul style="list-style-type: none"> — No se precisan suelos de gran fertilidad. — Limitación en taludes con pendientes > 70 % (35°). — Superficies de cierta extensión (> 0,25 ha). — Espesor del suelo y subsuelo para su instauración, diferente según la especie. 	<ul style="list-style-type: none"> — Añadir materia orgánica. — Añadir elementos finos: — Posible aportación de nutrientes. — Buen drenaje. — Modificar pendiente si se necesita. — Establecimiento de la cubierta vegetal.
Conservación de la naturaleza.	<ul style="list-style-type: none"> — Requerimientos mínimos, aunque es necesario un sustrato adecuado capaz de facilitar el crecimiento de la vegetación natural. 	<ul style="list-style-type: none"> — Establecimiento de la cubierta vegetal.

BIBLIOGRAFIA

- ANDRUZZI, F. C.: «Reclaiming Strip-Mined Land for Recreational Use in Lackawanna Country, Pa. A Demonstration Project». U.S. Bureau of Mines. I.C 8716, 1976.
- ANON.: «La Décharge Contrôlée de Résidus Urbains». Agence Nationale pour la Récupération et l'élimination des Déchets. Ministère de L'Environnement et du Cadre de Vie, 1981.
- BRADSHAW, A. D. and CHADWICK, M. J.: «The Restoration of Land». Blackwell Scientific Publications. London, 1980.
- COPPIN, N. J. and BRADSHAW, A. D.: «Quarry Reclamation». Mining Journal Books, 1982.
- SKELLY and LOY.: «A Compliance Manual. Methods for Meeting OSM Requirements» 1979.
- SWEIGARD, R. J. and RAMANI, R. V.: «Site Planning Process: Application to Land Use Potential Evaluation for Mined Land». Mining Engineering. June, 1986.
- U.N.P.G.: «L'Affectation des Sols de Carrières de Granulats Après Exploitation». 1982.
- VOGEL, W. G.: «A Manual for Training Reclamation, Inspectors in the Fundamentals of Soils and Revegetation». U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 1987.
- WILLIAMSON, N. A. et al.: «Mine Waste Reclamation». Mining Journal Books, London, 1982.

FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN A LA RESTAURACION DE LA VEGETACION

1. INTRODUCCION

Las plantas dependen estrechamente para vivir del medio en el que se desarrollan. De él obtienen la energía, materias primas y el espacio que necesitan y usan para crecer y conservarse. El suelo, la atmósfera y el agua son sus elementos constituyentes básicos.

Las condiciones de habitabilidad para las plantas que ofrece el medio son la resultante de la interacción de diversos factores de orden topográfico, climático y edáfico. Estos factores ambientales se combinan e interfieren para formar un complejo difícilmente dissociable, en el que todos ellos actúan de forma simultánea y contribuyen a caracterizar el medioambiente. A pesar de ello, un factor ambiental determinado puede hacerse preponderante e influir sobre la vegetación prácticamente por sí solo. Esto sucede cuando dicho factor adquiere valores extremos no compatibles con la vida de las plantas. Por ejemplo, en las regiones áridas la característica más importante del medio respecto de la vegetación es la escasez de agua, así como en los litorales lo es el exceso de sal en el sustrato.

A estos factores que adquieren valores extremos se les denomina *factores limitantes*, y pueden actuar por exceso (el contenido en sal del ejemplo anterior) o por defecto (el agua en las regiones áridas).

Por otro lado, la capacidad de las especies vegetales para desenvolverse bajo unas condiciones ambientales concretas, viene definida por la posibilidad de que puedan llevar a cabo sus procesos fisiológicos fundamentales (fotosíntesis, respiración, translocación y absorción de agua y nutrientes) y de la velocidad y duración de estos procesos.

Cada especie solamente puede desarrollarse satisfactoriamente dentro de un rango de valor determinado para cada factor ambiental. Los valores máximos y mínimos por encima (o por debajo) de los cuales la planta no es capaz de sobrevivir, se denominan *límites de tolerancia*. Entre estos límites hay un valor óptimo para cada especie.

Como la actividad minera supone una modificación más o menos intensa del medio natural, uno o más factores ambientales pueden verse alterados, pudiendo, incluso, convertirse en factores limitantes para la vegetación.

Por ello, antes de abordar la revegetación de una zona, hay que estudiar cuáles de los factores ambientales se han visto alterados por la actividad, cómo y cuánto, para

poder así definir las condiciones que el nuevo medio ofrece para la instauración de la vegetación.

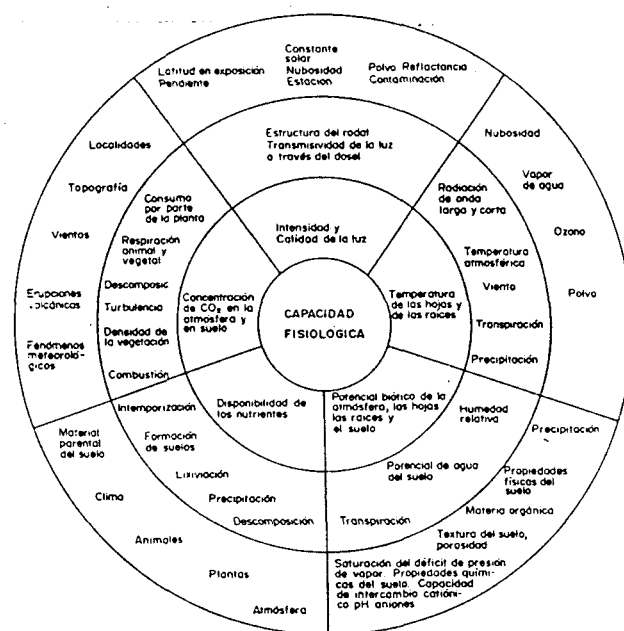


Figura 14.1. Factores ambientales que afectan a la capacidad fisiológica (Daniel et al, 1982).

2. FACTORES AMBIENTALES DE INFLUENCIA GENERAL

Los factores ambientales se pueden agrupar en:

- Factores climáticos.
- Factores edáficos.
- Factores topográficos.

2.1. Factores climáticos

Las características del clima que actúan directamente sobre los vegetales son la radiación solar, la precipitación, la temperatura y el viento.

La *radiación solar* es el factor climático esencial puesto que permite la fotosíntesis y es, además, la fuente de calor del medioambiente. Las necesidades de las especies vegetales varían tanto en lo que se refiere a cantidad total de radiación recibida, como a su distribución estacional y diaria (fotoperíodo).

El agua resulta indispensable para la vida de las plantas y la *precipitación* atmosférica constituye su principal fuente de aprovisionamiento. Tanto el agua edáfica como la humedad atmosférica dependen directamente de la cantidad y distribución anual de la precipitación.

El funcionamiento del metabolismo celular, la asimilación clorofílica y la transpiración dependen en gran medida de la *temperatura ambiente*. Cada especie tiene una temperatura óptima y un máximo y un mínimo más allá de los cuales no pueden vivir. Estos tres parámetros (intervalo de temperaturas medias, máximas y mínimas absolutas) son las más interesantes para el estudio de este factor en relación con la vegetación.

El *viento* es también un factor climático importante que puede influir decisivamente en la vegetación, cuando se trate de vientos fuertes y frecuentes.

Las brisas moderadas actúan favorablemente sobre el ritmo vital de la planta (aseguran la renovación del aire alrededor de los estomas y facilitan la función clorofílica), pero cuando el viento es fuerte, la transpiración aumenta peligrosamente al ser aportado constantemente aire no saturado de humedad a las hojas. A consecuencia de esto, los estomas tienden a cerrarse para contrarrestar este efecto, por lo que la fotosíntesis se reduce. A pesar de este mecanismo de defensa, si los vientos son constantes la deshidratación de la planta prosigue.

Así, en los lugares con este tipo de viento las plantas no pueden desarrollarse con normalidad: el tamaño de los árboles disminuye, se producen deformaciones, puede impedir el desarrollo de un estrato arbóreo, etc.

2.2. Factores edáficos

El suelo es un sistema físico-biológico que actúa de forma compleja sobre la vegetación. Es la fuente y dispensa de elementos nutritivos y agua, y en él está contenido el oxígeno necesario para la respiración de las raíces y los microorganismos del suelo.

El suelo es el producto de la acción del clima y la vegetación sobre el sustrato geológico. Cada tipo de suelo tiene una estructura general y unas características físico-químicas determinadas, acerca de las cuales, el conocimiento de la litología sobre la que se ha formado dicho suelo da una información muy valiosa.

Los factores edáficos que resumen la influencia del suelo en la vegetación son:

- Textura y estructura.
- Contenido y disponibilidad de nutrientes para las plantas.
- Reacción del suelo (pH).
- Profundidad.

La porción sólida del suelo está formada por partículas minerales de diversos tamaños. Se distingue una fracción gruesa, formada por las partículas que superan los 0,002

mm de diámetro (limos, gravas y arenas) y una fracción fina, constituida por partículas de menos de 0,002 mm de diámetro (arcillas). Los movimientos de aire y agua en el interior del suelo y su capacidad de almacenamiento e intercambio de agua con las plantas dependen de la proporción entre estas dos fracciones. Por ello, se ha señalado como factor edáfico fundamental en relación con la vegetación la *textura*, que refleja la composición granulométrica del suelo, Fig. 14.2.

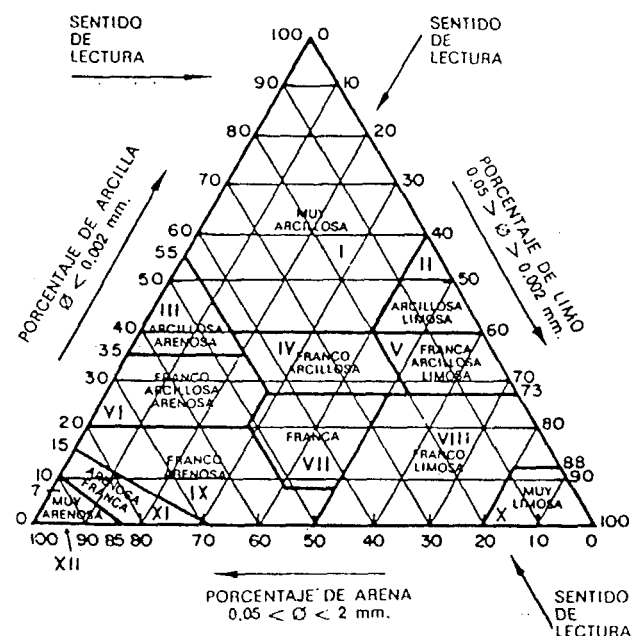


Figura 14.2. Diagrama de las texturas en coordenadas trilineales.

Las *sustancias nutritivas* aprovechables por las plantas se encuentran en el suelo en solución en forma de sales minerales. Se dividen en dos grupos, dependiendo de sus cargas eléctricas. De entre los aniones, el fósforo, el azufre y el nitrógeno desempeñan un papel esencial en el desarrollo de las plantas. Los cationes más interesantes son el calcio, potasio, magnesio y sodio. Además hay una serie de metales necesarios en cantidades ínfimas: hierro, manganeso, cinc, cobre, boro, molibdeno y cloro. Para un desarrollo normal, las plantas tienen que disponer de un abastecimiento adecuado de cada uno de estos elementos. Tanto el exceso como el defecto de alguno puede crear problemas.

El *pH* es un factor complejo que refleja la actividad química del suelo. Depende de la naturaleza de la roca madre y determina la presencia o ausencia de ciertas plantas.

El suelo juega también un papel importante como modificador de las condiciones climáticas generales. Color, textura y grado de humedad tienen incidencia sobre la temperatura, radiación y las condiciones hídricas locales.

La temperatura de cada localidad a nivel del suelo, para unas condiciones climáticas determinadas, es función de su color y su humedad: será mayor en un suelo oscuro que en uno claro, y en uno seco que en uno húmedo. A través de estas características, el suelo influye también sobre la iluminación de la localidad: la proporción de radia-

ción luminosa es mayor cuanto más claro y seco es un suelo.

2.3. Factores topográficos

La altitud, pendiente, exposición, orientación y formas del relieve son factores topográficos que ejercen una acción modificadora sobre los otros factores ambientales.

La *pendiente* es un factor de influencia local en la formación y desarrollo del suelo. En función de ella se producen cuatro fenómenos:

- En las cumbres y pendientes fuertes se produce un rejuvenecimiento constante del suelo, debido a la erosión, que tiene como consecuencia que el suelo de estas zonas tenga escasa profundidad y un perfil poco desarrollado.
- Se produce una migración constante de elementos solubles y coloidales a favor de la pendiente, con lo que las partes altas se empobrecen nutricionalmente y en las de pie de ladera se producen acúmulos de nutrientes.
- Tanto el agua de precipitación como el agua edáfica tiende a migrar por gravedad al pie de las laderas, con lo cual las zonas altas y de media ladera son estaciones más secas que las zonas llanas y de pie de ladera.
- En las depresiones se producen estancamientos de agua que son los responsables de la génesis de un tipo particular de suelo, los suelos hidromorfos.

La influencia de los factores topográficos en el clima tiene especial importancia, ya que las condiciones climáticas a que están sometidas las plantas no se corresponden exactamente con las que define el clima regional sino con las del *microclima*, y son los factores topográficos los principales creadores de condiciones microclimáticas particulares.

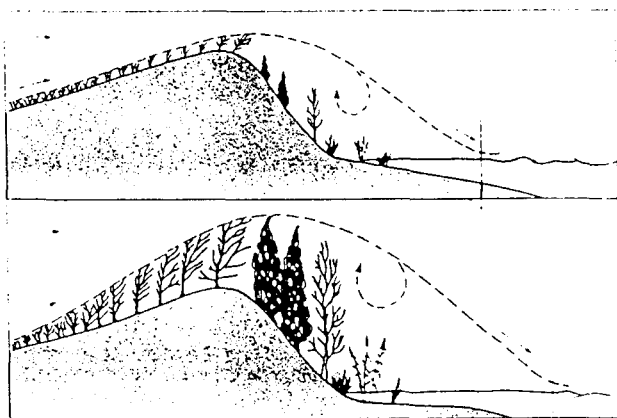


Figura 14.3. Espacio protegido del viento en función de la altura de la vegetación.

«El microclima de una localidad es el resultado de la modificación más o menos profunda del clima local bajo la influencia de las condiciones ecológicas propias de ese punto» (Lacoste, 1973). Aquí se considera aisladamente

el papel de la topografía en la definición del microclima, ahora bien, los caracteres microclimáticos dependen de la acción combinada de topografía, suelo y vegetación.

Los factores topográficos de influencia son:

- **Condiciones del relieve.** Pueden modificar los regímenes de vientos, precipitaciones, humedad edáfica y las temperaturas: barreras montañosas, valles y depresiones, variaciones altitudinales, etc.
- **Exposición.** Supone el incremento a la amortiguación de los factores climáticos según que la zona esté más o menos expuesta a ellos.
- **Orientación.** Es la posición de la zona respecto del norte geográfico. Modifica directamente la radiación y, a partir de ella, el resto de las características climáticas.
- **Altitud.** Actúa especialmente sobre la temperatura y la precipitación. La altitud provoca una disminución de la temperatura media de cerca de 1° C por cada 180 metros.
- **Pendiente.** Modifica las condiciones térmicas y de iluminación de la localidad.

El grado de pendiente determina además directamente el tipo de vegetación que va a ser capaz de desarrollarse en cada localidad. Cada especie tiene un límite máximo de pendiente por encima del cual no es capaz de arraigarse.

Otra acción importante de este factor es que el nivel de estabilidad del sustrato depende directamente de él. Los sustratos móviles, como escombreras y laderas muy pedregosas, son primero colonizados por comunidades pioneras, formadas por especies herbáceas especialmente adaptadas a este factor. Solamente cuando estas comunidades han conseguido estabilizar el sustrato, comienzan a aparecer otras especies más exigentes.

3. EL MEDIO TECNICO

Se denomina medio técnico al medio natural transformado por la actividad minera. Esta transformación es muy intensa, tanto que las condiciones del nuevo medio no tienen nada que ver con las del medio inicial y, además, suelen ser muy poco favorables para la vegetación.

Para describir el medio técnico hay que prestar atención a las modificaciones de tipo físico causadas en el suelo por la excavación y movimiento de tierras y a las dificultades para la implantación de vegetación que los nuevos materiales presentan.

3.1. Modificaciones de carácter físico

Tanto las operaciones de explotación como los trabajos de remodelación del terreno requieren el empleo de maquinaria pesada. Su paso por los suelos que van a ser objeto de revegetación es causa de *intensa compactación*, con la secuela de falta de la aireación mínima necesaria para el desarrollo de las plantas y el crecimiento de las raíces.

Además, la compacidad del terreno es una propiedad a conseguir expresamente, con el fin de que los taludes de escombreras y terraplenes sean estables. Lo mismo ocurre en las pistas y accesos, donde además de compactar el terreno, se elimina la materia orgánica para evitar la penetración del aire y el agua bajo los firmes.

En los desmontes y excavaciones el paso de tractores y volquetes contribuye a endurecer el corte y a configurar superficies lisas y poco porosas.

Otro efecto es que las superficies a restaurar cobran *pendientes* muy superiores a las que tenía el terreno antes de iniciar las acciones mineras. Esta circunstancia afecta tanto a las técnicas de revegetación como a las especies a emplear, y fundamentalmente, al uso final del terreno recuperado.

Como efecto derivado cabe apuntar que la fuerte pendiente de los taludes modifica los factores microclimáticos derivados de la exposición.

La *esterilidad* es uno de los problemas principales. Las explotaciones mineras requieren excavaciones más o menos profundas que generan vertederos de material desprovisto de materia orgánica o dejan al descubierto roca o suelo profundo igualmente estéril.

3.2. Características de los materiales

Los tipos de estériles que constituyen las escombreras son de origen diverso y presentan ciertos problemas físicos para la implantación de la vegetación.

Además de los suelos superficiales, existe un material de cobertera, generalmente inocuo con un cierto potencial de suelo. Su textura y estructura pueden ser malas, particularmente después de la compactación por la maquinaria, pero es posible mejorarlas para la revegetación mediante el ripado y la adición de materia orgánica.

Por otro lado, se encuentran de manera predominante las rocas estériles en forma de fragmentos y con unas propiedades que inicialmente no difieren demasiado de las de la roca intacta. La acción de la maquinaria y el paso del tiempo producen una degradación y meteorización de los materiales con una modificación de sus propiedades.

Seguidamente, se comentan las principales propiedades físicas y químicas de los materiales.

3.2.1. PROPIEDADES FÍSICAS

A — Granulometría

La distribución por tamaños de los trozos de roca es una de las propiedades físicas más importantes, ya que afecta a la retención y movimiento del agua, al volumen de huecos, a la estabilidad de los taludes, a la aireación y a la susceptibilidad a la erosión. Los intervalos de clase de los tamaños de los materiales y las denominaciones más comunes son las de la Tabla 14.1.

Para crear un sustrato edáfico se necesita un amplio rango de tamaños de partículas: arcillas y limos para la capacidad de intercambio iónico y para mantener la humedad, arenas para la porosidad y gravas para la aireación. Un exceso en una fracción determinada puede afectar negativamente la implantación de la vegetación.

TABLA 14.1

DIAMETRO EFECTIVO DE LOS MATERIALES	DENOMINACION
Mayor de 25 cm	Bolos
25 cm a 7,5 cm	Guijarros
7,5 cm a 2 cm	Gravas
2 mm a 0,05 mm	Arenas
0,05 mm a 0,002 mm	Limos
Menor de 0,002 mm	Arcillas

La modificación de las distribuciones granulométricas es difícil, por cuanto se requerirán una trituración y molienda parcial que podría resultar antieconómico. Por este motivo se recomienda la retirada de los materiales y la extracción selectiva de algunos estériles finos.

B — Densidad

Según la litología de los estériles, el peso específico del material oscila entre 2 y 2,8 t/m³. Sin embargo, el *peso específico seco*, in situ o aparente, de los materiales depositados depende del grado de compactación, que, a su vez, es función de la porosidad del conjunto, de la granulometría y la forma y tamaño de las partículas, con unos valores que varían entre 1,3 y 1,8 t/m³.

Las densidades aparentes próximas a las de las partículas son inadecuadas para que las raíces de las plantas penetren, por lo que en ocasiones se recomiendan operaciones de ripado y subsolado, así como la adición de mulch.

C — Porosidad y permeabilidad

Los materiales que se depositan en una escombrera presentan un porcentaje variable de huecos y poros que son ocupados por el aire o por el agua. La retención del agua aumenta cuando los poros son más pequeños.

La porosidad se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{Porosidad (\%)} = \frac{100(D_p - D_a)}{D_p}$$

siendo:

D_p = Densidad de las partículas.

D_a = Densidad aparente.

El porcentaje de huecos influye durante la construcción de las escombreras sobre la compresibilidad de los materiales. Se produce una migración de finos, el colapso de los contactos entre bloques por el propio peso de las estructuras, etc, que se manifiestan con unos asentamientos que oscilan entre el 0,5 y el 5 % de la altura.

Otro parámetro ligado al anterior es la permeabilidad, que influye, por un lado, sobre la estabilidad del talud y, por otro, sobre la disponibilidad de agua y nutrientes en los niveles superficiales. Si las condiciones de drenaje son deficientes se puede producir un aumento de las presiones

intersticiales en el interior de los depósitos que llegan a desembocar en fenómenos de inestabilidad. Si el agua percola excesivamente rápido, se puede producir una disolución de nutrientes y un lavado de los suelos en la zona de las raíces de las plantas.



Foto 14.1. Parcelas de experimentación con diferente materiales y especies vegetales.

D — Color

El color de los materiales es importante como ya se dijo, ya que afecta a la absorción y reflexión de las radiaciones solares, y condiciona las reacciones químicas de los estériles. Asimismo, si el color de los estériles contrasta con los del entorno se producirá una gran perturbación visual.

3.2.2. PROPIEDADES QUIMICAS

La composición química de los estériles varía ampliamente según la explotación minera de que se trate, no sólo depende de la naturaleza litológica de los propios materiales extraídos, sino también del método de tratamiento y vertido, de las condiciones climatológicas y de las reacciones de meteorización que se desarrollan dentro de los depósitos.

La composición química de los materiales en el depósito puede variar tanto en vertical como horizontalmente, debido a cambios en la calidad de los minerales y estériles, cambios en las leyes de corte por las fluctuaciones del mercado, cambios en los procesos mineralúrgicos de concentración, meteorización y lixiviación, particularmente en los desechos que contienen pirita.

Los problemas de acidez son muy frecuentes en las presas de lodos mineros y en algunas escombreras. Un caso típico lo constituyen las escombreras de pirita.

Muchos residuos mineros tienen en su composición metales, que aun estando presentes en pequeñas cantidades son tóxicos para las plantas, el hombre y los animales, y el grado de contaminación producido por las aguas superficiales de escorrentía y lixiviados puede llegar a ser muy alto.

La mayoría de las rocas estériles y residuos presentan deficiencias de *nutrientes*. Las concentraciones de nitrógeno son inadecuadas para el crecimiento de las plantas,

los niveles de fósforo son generalmente muy bajos y las deficiencias de potasio, calcio y magnesio también suelen presentarse.

En determinadas ocasiones se produce un incremento de la *salinidad* que puede ser debido a distintas causas: interacción de los productos de oxidación de la pirita y los carbonatos nativos; concentración de sales en los residuos como consecuencia del reciclado del agua; adición de sustancias a los lodos de las plantas mineras para ajustar el pH de los efluentes; y excesiva evaporación de la superficie. Todos esos procesos se ven acentuados al unirse a los reactivos y correctores de pH que se utilizan en los tratamientos mineralúrgicos.

Así pues, las características del medio técnico que van a determinar la viabilidad de la revegetación, la elección de especies y las técnicas de implantación son:

- Existencia de pendientes muy acusadas, de hasta 90° en el caso de las caras de banco.
- Existencia dentro de una misma explotación de condiciones de humedad y temperatura muy diversas y muchas veces extremas, como consecuencia de la exacerbación de los factores microclimáticos por efecto de la exposición.
- Suelos estériles y muy compactados, de características fisicoquímicas y estructurales totalmente distintas a las del suelo original.

4. FACTORES AMBIENTALES MODIFICADOS POR LA ACTIVIDAD MINERA

Al abordar la tarea de implantar una cubierta vegetal en terrenos afectados por la actividad minera hay que tener en cuenta que, debido a las particulares condiciones del medio técnico, hay una serie de factores ambientales que se presentan en estos lugares con matices muy específicos y configuran, aisladamente o en conjunto, una situación completamente distinta de la que habitualmente se presenta en siembras y plantaciones comunes.

4.1. Factores físicos

4.1.1. TEMPERATURA

La temperatura ambiente debe tenerse en cuenta en la elección de las especies a sembrar o plantar. Para cada especie existen ciertos umbrales de temperatura dentro de los cuales realizan su ciclo vital.

Sin embargo, la temperatura de la atmósfera no es un dato específico, ya que no señala con exactitud las condiciones que se dan en la capa superficial del suelo, donde se desarrolla la vida de la planta.

La temperatura del suelo es función directa de la *cantidad de radiación* solar recibida, y la cantidad de radiación, a su vez, depende del *ángulo de incidencia* de los rayos solares (cuanto más oblicuo sea menor es la cantidad de radiación) y de la *existencia de obstáculos* que intercepten la radiación antes de que llegue al suelo.

El ángulo con que los rayos de sol llegan a la tierra, para una determinada latitud, varía con una periodicidad diaria y anual, lo que se traduce en cambios cíclicos diarios y anuales en la temperatura del suelo.

Además de estas variaciones globales, hay algunos factores físicos que condicionan la cantidad de radiación al modificar el ángulo de incidencia. Son:

- Pendiente.
- Orientación.
- Exposición.
- Situación dentro del talud.

En general, puede decirse que al aumentar la pendiente el ángulo de incidencia de los rayos solares aumenta.

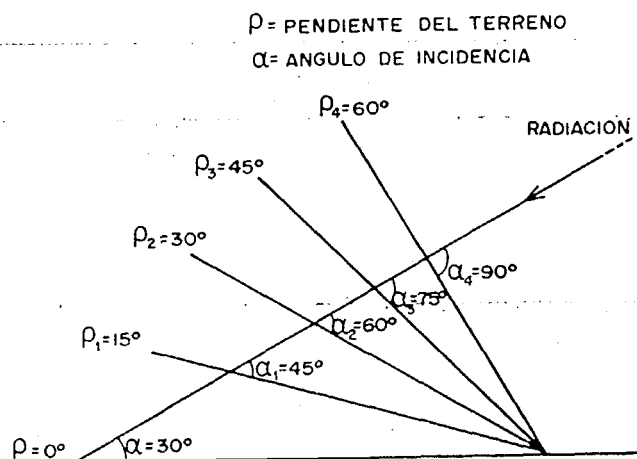


Figura 14.4. Variación del ángulo de incidencia al aumentar la pendiente.

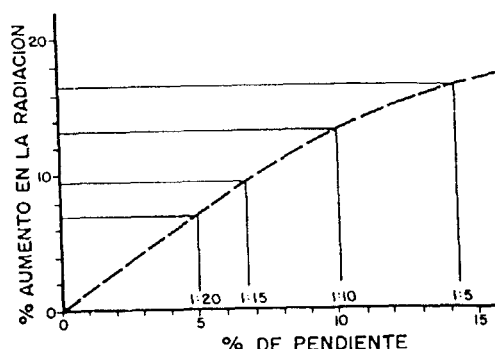


Figura 14.5. Relación entre pendiente y radiación recibida.

Ahora bien, la relación pendiente y cantidad de insolaación tiene distinto signo dependiendo de la orientación del terreno: en las orientaciones sur son directamente proporcionales, y en las norte inversamente.

Se define como *exposición* de una zona su accesibilidad a los distintos factores climáticos. Respecto de la radiación, las exposiciones de umbría son significativamente «menos accesibles» que los de solana. Fig. 14.6.

En las exposiciones de solana tanto la cantidad total de radiación que llega como la diferencia entre la máxima radiación recibida y la mínima son muy grandes, con lo cual en las solanas se alcanzan temperaturas máximas muy altas y la amplitud térmica diaria es grande. La temperatura en estas condiciones puede llegar a ser un factor limitante para la vegetación.

TABLA 14.II. VALORES MENSUALES TOTALES DE RADIACION SOLAR DIRECTA EN Kcal/cm² CON CIELO DESPEJADO PARA DIFERENTES PENDIENTES Y ORIENTACIONES EN LATITUD 50° N (Seamann, 1979)

MES	PENDIENTE	N	NE NO	E O	SE SO	S	DIFERENCIA ENTRE LADERA NORTE Y SUR
Diciembre	0° = llano	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	0,0
	10° = pendiente	0,7	1,2	2,0	3,0	3,5	2,8
	20°	0,0	0,6	2,0	4,0	5,0	5,0
	30°	—	0,1	2,0	4,8	6,0	6,0
	90° = acantilado	—	—	1,4	5,7	8,3	8,3
Marzo	0° = llano	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	0,0
	10° = pendiente	7,1	7,9	9,2	10,6	11,2	4,1
	20°	4,9	5,6	8,9	11,8	12,8	7,9
	30°	2,1	4,6	8,7	12,6	14,1	12,0
	90° = acantilado	—	1,2	5,6	8,8	12,2	12,2
Junio	0° = llano	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	0,0
	10° = pendiente	17,8	18,1	18,7	19,4	19,5	1,7
	20°	16,5	17,0	18,4	19,7	19,6	3,1
	30°	14,2	15,0	17,5	18,8	18,8	4,6
	90° = acantilado	2,0	5,4	8,8	8,0	7,0	5,0
Septiembre	0° = llano	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	0,0
	10° = pendiente	9,2	9,6	11,0	12,1	12,9	3,7
	20°	6,5	8,0	10,9	12,2	14,4	7,9
	30°	3,9	6,3	10,6	13,8	15,4	11,5
	90° = acantilado	—	1,8	6,3	9,9	11,2	11,2

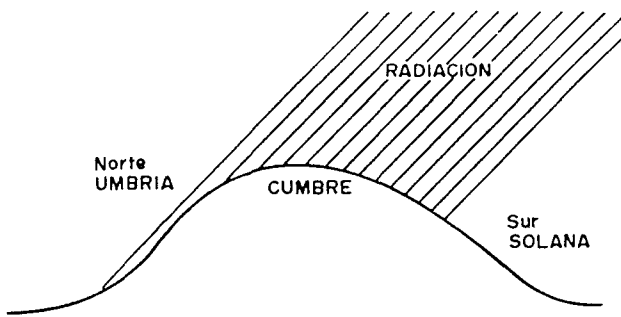


Figura 14.6. Relación cantidad de Radiación-Exposición.

En las exposiciones de umbria la cantidad total de radiación es mucho menor y la diferencia diaria entre radiación máxima y mínima muy pequeñas. Así, la umbria se caracteriza por tener temperaturas moderadas y oscilaciones diarias pequeñas. Esto se traduce en un menor movimiento del aire y, por tanto, una mayor concentración de CO₂ que en las solanas. Estas condiciones repercuten en el desarrollo y la sensibilidad a enfermedades de la vegetación.

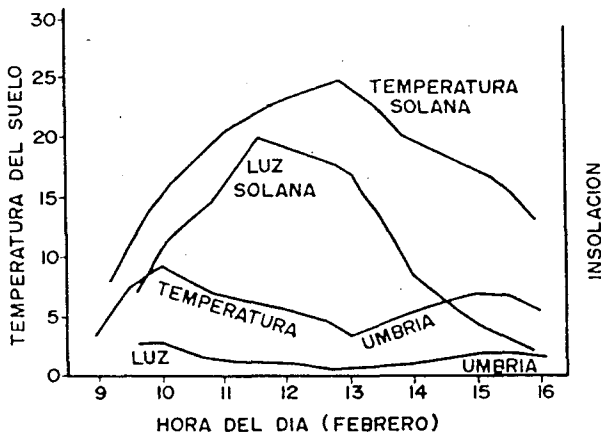


Figura 14.7. Relación entre la intensidad luminica y la temperatura del suelo.

El ángulo de incidencia también varía a lo largo del talud: en la cabecera se acerca a la perpendicularidad mientras que en el pie del talud es más oblicuo.

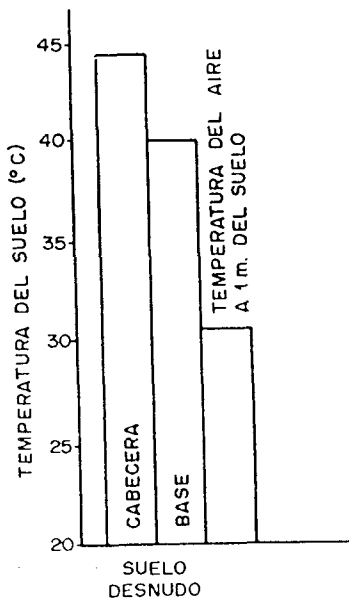


Figura 14.8. Variación de la temperatura con la altura del talud.

Hay una diferencia apreciable de temperatura entre la cabecera y la base del talud, y las condiciones en cabecera son más perjudiciales que en la base. Fig. 14.8.

Por otro lado, todo obstáculo en la incidencia de la radiación, una *cubierta vegetal natural o artificialmente implantada*, por ejemplo, se traducirá en una modificación de las temperaturas del suelo.

Las temperaturas se moderan si existe una cubierta vegetal, de forma que se hacen menos frías en invierno y menos cálidas en verano, mientras que los taludes desprovistos de vegetación las temperaturas son extremadas.

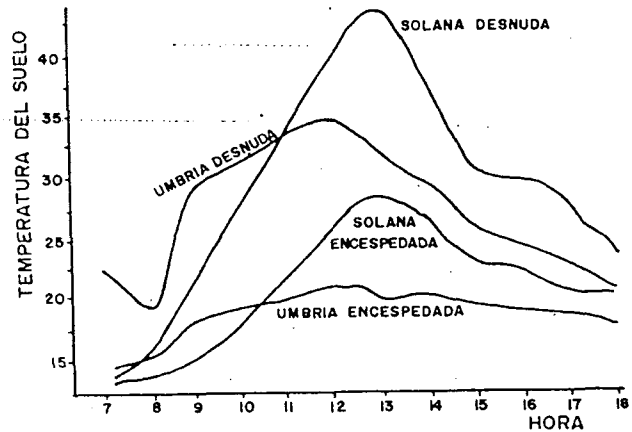


Figura 14.9. Efecto de la orientación y de la vegetación sobre la temperatura del suelo.

Del conocimiento de estas temperaturas se deducen las dificultades que para la implantación de la vegetación presenta un suelo desnudo.

Las variables de vegetación que condicionan la temperatura del suelo son:

- Porcentaje de superficie cubierta: al aumentar la cubierta vegetal, la amplitud térmica disminuye.
- Altura de la vegetación: hay una relación directa entre altura de la vegetación y temperatura del suelo.

Las dificultades derivadas de la temperatura del suelo pueden resumirse en:

- a) Grandes diferencias diarias de temperatura.
- b) En los taludes, por su gran altura y pendiente y por la inexistencia de una cubierta vegetal moderadora, la temperatura del suelo puede llegar a alcanzar valores de hasta 15 y 30° C por encima de la temperatura del aire, y condicionar la elección de especies (especies resistentes) y las técnicas de implantación, e incluso, en casos extremos, hacer inviable la revegetación,
- c) Las temperaturas sufren variaciones espaciales muy marcadas en este tipo de terrenos (diferencias entre base y cabecera del talud, diferencias de orientación y exposición), que, lógicamente, van a influir en el diseño de siembras y plantaciones y en los cuidados posteriores dedicados a cada zona, según sus condiciones térmicas.
- d) Temperaturas propicias para el desarrollo de enfermedades.

4.1.2. HUMEDAD

La humedad del suelo y la humedad ambiente son factores de influencia directa tanto en el momento de la siembra como en el posterior desarrollo de las plantas.

Respecto de la humedad del suelo, la disponibilidad de agua es la cantidad de líquido que puede ser aprovechada por los vegetales. Depende del agua suministrada (precipitación o riegos), y de la capacidad de infiltración y de retención del suelo.

La cantidad de agua que llega a infiltrarse en un suelo depende de la longitud y grado de inclinación del terreno, de su permeabilidad, y de la existencia y tipo de cubierta vegetal.

Las grandes pendientes ocasionan fuertes pérdidas de agua por escorrentía que repercuten desfavorablemente en el establecimiento de la cubierta vegetal. Por otro lado, los suelos muy compactados son poco permeables (tienen un índice muy bajo de porosidad) y el agua tiende a escurrir por ellos.

La existencia de vegetación aumenta la capacidad de infiltración del suelo y le protege de los agentes erosivos.

Pero las plantas no pueden acceder a todo el volumen de agua que se almacena en el suelo. Solamente está disponible el agua capilar, que es el agua retenida por capilaridad en poros de pequeño tamaño. La cantidad existente de este tipo de agua depende de la textura, estructura y contenido en materia orgánica del suelo.

La textura es la característica edáfica más directamente relacionada con la cantidad de agua absorbible. Fig. 14.10.

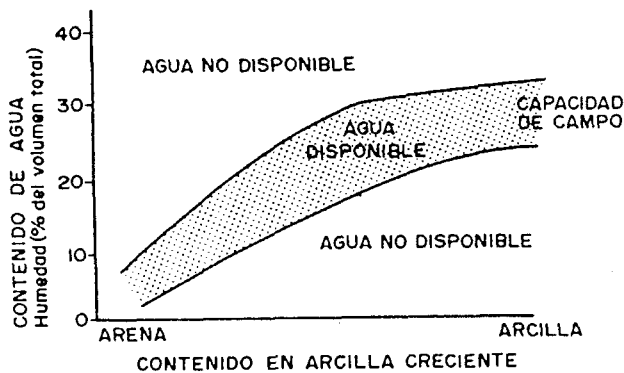


Figura 14.10. Relación entre la textura del suelo y la cantidad de agua disponible para las plantas (Briggs, 1977).

Los suelos con textura muy fina (arcillosos) presentan un volumen muy pequeño de poros, sobre todo si están compactados. La infiltración del agua es muy lenta, lo cual tiene la secuela de que la escorrentía aumente en los terrenos pendientes y que haya tendencia al encharcamiento en los llanos. Además, el agua queda fuertemente retenida debido al reducido diámetro de los poros y no es accesible para las plantas.

En los suelos de texturas gruesas el agua percola muy rápidamente, ya que los espacios que quedan entre las partículas son demasiado grandes para retenerla, y desciende a profundidades inaccesibles para la vegetación.

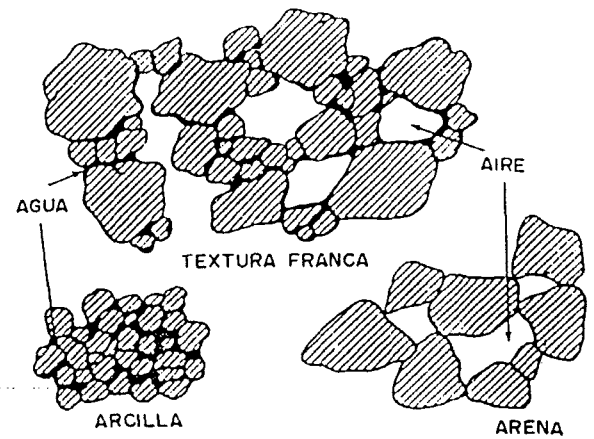


Figura 14.11. Los sustratos de textura arcillosa tienen mayor capacidad de retención de agua que los de textura franca. Las texturas arenosas son las de menor capacidad de retención.

Estructura y contenido en materia orgánica están muy relacionados. Las partículas de los distintos tamaños se agrupan como resultado de la materia orgánica presente y de la actividad de los microorganismos del suelo, para formar agregados que confieren buena porosidad, aireación y drenaje al suelo. La falta de materia orgánica y organismos adecuados condiciona una agregación mínima de las partículas y una carencia de estructura del material, lo cual influye negativamente en la capacidad de infiltración y retención del agua del suelo.

La temperatura también es un factor influyente en la humedad del suelo. Al incrementarse la temperatura aumenta la evaporación y disminuye el contenido en humedad.

La humedad del suelo es un factor límite en la revegetación de este tipo de espacios, ya que en ellos se reúnen casi todas las condiciones desfavorables para conseguir un buen suministro de agua para las plantas.

- Son terrenos muy compactados y con pendientes excesivas, por lo cual hay grandes pérdidas de agua por escorrentía.
- Generalmente, los suelos están desnudos de vegetación.
- Los suelos a tratar suelen tener texturas extremas:
- No hay materia orgánica.
- Las temperaturas alcanzadas en estos suelos superan hasta en 15 y 30° la temperatura de un suelo normal en iguales circunstancias.

4.1.3. AIREACION DEL SUELO

La atmósfera del suelo influye en todos los procesos que tiene lugar en su interior. De ella dependen la vida de los microorganismos del suelo y la de las raíces de las plantas superiores, así como todos los cambios químicos que se realizan en el suelo:

- La ausencia de O_2 inhibe el crecimiento de las raíces. Sin embargo, este crecimiento puede mantenerse con bajos niveles de oxígeno, hasta con sólo un 2 %, siem-

pre que el aporte sea constante y la concentración de CO_2 no exceda el 30 ó 35 %.

- Las concentraciones de O_2 y CO_2 afectan también a la germinación. La germinación disminuye en los suelos cuya capacidad de aireación es sólo del 10-12 %.
- La existencia de microorganismos, cuya vida depende también de la aireación, es necesaria desde el momento de la germinación.
- La cantidad de O_2 interviene en la absorción de elementos nutritivos.
- Los procesos de óxido-reducción del suelo. Son importantes por el hecho de que algunos de dichos compuestos pueden tomar forma tóxica para la vida de suelo.

El nivel de aireación del suelo depende de:

- Nivel de compactación.
- Textura y estructura del suelo.
- Contenido en materia orgánica.

La existencia de capas compactas próximas a la superficie impide el normal desarrollo de las raíces, tanto por falta de aireación como por resistencia mecánica a la penetración. Las capas compactas con alto contenido en arcilla, cuando están húmedas, son relativamente impermeables al agua y al aire. En suelos de textura gruesa la tasa de aireación es buena, a menos que exista una capa freática alta.

Cuando se rompe la estructura de la superficie del suelo por efecto del impacto de las gotas de lluvia, se forman unas costras que dificultan la aireación y la emergencia de la planta. Este efecto es muy frecuente en suelos alterados.

La presencia en el suelo de una cantidad suficiente de materia orgánica favorece la aireación y mejora las condiciones de penetración y respiración de las raíces. Además, la existencia de los microorganismos del suelo depende de la presencia de materia orgánica.

En las escombreras con alto porcentaje de materiales muy gruesos (> 20 cm de diámetro) es frecuente la formación de bolsas de aire de gran volumen que no pueden ser atravesadas por las raíces, con lo cual el crecimiento radicular se detiene al llegar la raíz a dichos lugares.

Esto tiene como consecuencia que en estas escombreras la vegetación leñosa con sistema radical más o menos desarrollado, tenga una tasa de crecimiento muy pequeña, e incluso, que sea imposible sus instalación.

4.2. Factores químicos

Tres son los factores que pueden afectar e incluso limitar severamente el desarrollo de la vegetación: presencia y disponibilidad de nutrientes, acidez y alcalinidad del suelo y toxicidad. Todos ellos son factores edáficos derivados de la desaparición del suelo superficial y del afloramiento de horizontes inferiores, como producto de las excavaciones.

4.2.1. PRESENCIA Y DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES

Las plantas necesitan disponer de una serie de elementos, esenciales para su desarrollo. Algunos, los macronutrientes son necesarios en grandes cantidades: nitrógeno, fósforo, azufre, calcio, magnesio y potasio; los micronutrientes, en muy pequeñas dosis: hierro, manganeso, boro, cinc y molibdeno; y otros pueden ser esenciales sólo para especies particulares: sodio, cloro, cobalto, vanadio y otros, Fig. 14.12.

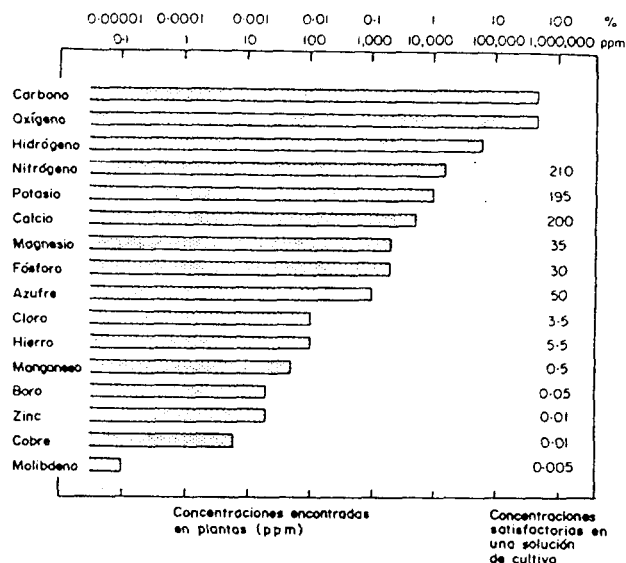


Figura 14.12. Concentraciones típicas de minerales, elementos nutritivos en plantas y concentraciones en soluciones para el crecimiento satisfactorio en tierras de cultivo (Bradshaw y Chadwick, 1980).

La ausencia o escasez de alguno de ellos provoca en las plantas retrasos en el crecimiento, malformaciones y otros síntomas de deficiencia.

Todos ellos son obtenidos directamente del suelo por las plantas, y es muy raro encontrar suelos alterados por la minería que no sean deficitarios en alguno de estos elementos esenciales, Fig. 14.13.

El nitrógeno es uno de los elementos más importantes que la planta obtiene del suelo, y casi constantemente falta en suelos alterados.

Prácticamente todo el nitrógeno del suelo tiene su origen en la atmósfera, por lo que los materiales procedentes de excavación no han podido desarrollar una reserva de este nutriente. Los nitratos, forma química en la que es asimilado el nitrógeno por las plantas, se constituyen a partir de los procesos naturales de fijación del N_2 atmosférico (principalmente en los nódulos radiculares de las leguminosas), y mediante la descomposición de la materia orgánica por los microorganismos del suelo.

El fósforo es parte esencial del sistema encimático de las plantas y su presencia es necesaria para la activación de las zonas de crecimiento.

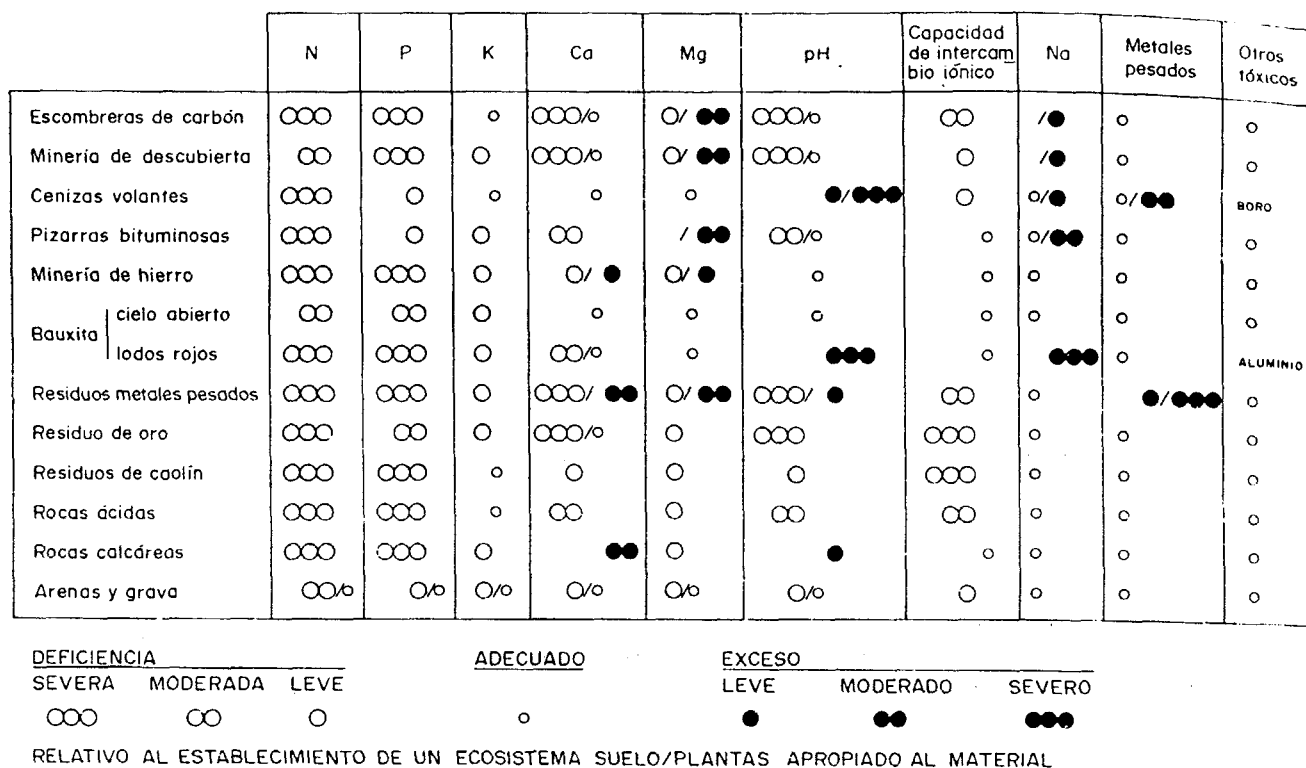


Figura 14.13. Características químicas de estériles mineros y áreas degradadas (Modificado de Bradshaw y Chadwich).

La característica más importante como componente del suelo, es que reacciona químicamente como fosfato y se combina con otros elementos para formar complejos insolubles, que no pueden ser absorbidos por las plantas. Así, muy poca cantidad del fósforo existente en el suelo es utilizable.

Su escasez tiene como consecuencia la disminución de la tasa de crecimiento de las raíces e influye negativamente en la multiplicación y desarrollo de las micorrizas de las leguminosas.

El resto de los nutrientes (excepto el azufre) requeridos por las plantas son absorbidos en forma de cationes. Los más importantes en el desarrollo de la vegetación son potasio y calcio (Ca^{++} , K^{++}).

En los horizontes profundos aflorantes y los materiales extraídos por la excavación, el sustrato sobre el que se va a realizar la revegetación no tiene las características de un verdadero suelo. Por un lado, hay escasez o falta total de algunos elementos esenciales, por ejemplo el nitrógeno, pero además, el resto de los elementos que están formando parte de los minerales de la roca madre del subsuelo se presentan en formas químicas no utilizables por la vegetación, y aunque se encuentren en grandes cantidades no son aprovechables.

La ausencia de materia orgánica es otro factor que agrava la deficiencia de nutrientes: es el puente entre la planta y el suelo en la obtención de estos elementos esenciales, y actúa como reserva de nutrientes en la que éstos son liberados, de forma que sean asimilables, al ritmo adecuado.

4.2.2. ACIDEZ Y ALCALINIDAD DEL SUELO

La importancia del pH como factor ambiental que afecta a la revegetación, se debe a *motivos directos*, por la influencia que el ambiente, más o menos acidificante o basificante, puede tener sobre las condiciones de desarrollo de las plantas, y a *motivos indirectos*, debido a su intervención sobre otras características del suelo:

- Influye en la velocidad y cualidad de los procesos de humificación y mineralización, a través de su influencia sobre los microorganismos del suelo.
- Influye en el estado de determinados nutrientes, caracterizando, por tanto, su grado de asimilabilidad por los vegetales.
- Condiciona la estructura del suelo y, por tanto, todas las propiedades edáficas que se derivan de aquélla.

Respecto a la acidez, la mayoría de los nutrientes son más solubles cuanto más bajo es el pH, es decir, se liberan con mayor facilidad. Sin embargo, si el pH es demasiado bajo, las pérdidas de nutrientes por lavado pueden aumentar y decrecer así su disponibilidad para las plantas. También, unas condiciones demasiado favorables para la solubilidad puede provocar la aparición de toxicidad. Fig. 14.14.

Los problemas más característicos que se presentan en suelos con pH por debajo de 4, son:

- Hay una concentración excesiva de aluminio y manganeso, que pueden llegar a ser tóxicas.



Foto 14.2. Zona en primer plano donde la acidez de las suelos ha impedido el establecimiento de la cubierta vegetal.

- Déficit de fósforo ya que los iones de hierro se combinan con los fosfatos y forman un compuesto insoluble inaccesible a las plantas.
- Se reduce la actividad microbiana, con lo que los niveles de nitrógeno y otros elementos son muy bajos y hay una considerable deficiencia de nutrientes.

En los suelos básicos con pH mayor de 8, se pueden producir deficiencias en micronutrientes (Fe, Mn y Bo) por la dificultad que tienen las plantas para absorberlos, y de fósforo por inmovilización en forma de sulfato cálcico. Además el nitrógeno puede pasar a estado gaseoso por acción de bases fuertes sobre las sales amoniacales.

Además, en este tipo de espacios, el pH puede llegar a alcanzar valores extremos, directamente tóxicos para la vegetación. Por ejemplo, en escombreras que contengan pirita se producen fenómenos de acidez espontánea por meteorización de los sulfuros, y se llegan a alcanzar niveles de pH de 2, y en escombreras de hidróxidos de Ca, Mg, Na y K, son frecuentes los pH de 10.

4.2.3. TOXICIDAD

Los problemas de toxicidad en escombreras y presas de residuos se deben principalmente a la presencia de metales pesados (cobre, cinc, plomo y níquel), y otros metales (aluminio, manganeso), que quedan como residuos de las plantas de concentración, o por ir como acompañantes del mineral extraído y ser abandonados «in situ».

A pesar de que el volumen representado por estos metales es muy pequeño respecto del resto del material, los niveles tolerados por las plantas son muy bajos y se alcanzan fácilmente niveles tóxicos, que pueden provocar la muerte de la vegetación existente e impedir el crecimiento de cualquier tipo de planta. El principal efecto es que inhibe el crecimiento de las raíces.

En climas áridos y semiáridos también puede producirse toxicidad en materiales con sulfatos cálcico y magnésico que, al ser solubles, ascienden por capilaridad a la superficie al evaporarse el agua del suelo, y provocan concentraciones de sal de hasta el 2 % (más alto que la concentración de sal del agua del mar) que muy pocas plantas resisten. Fig. 14.14.

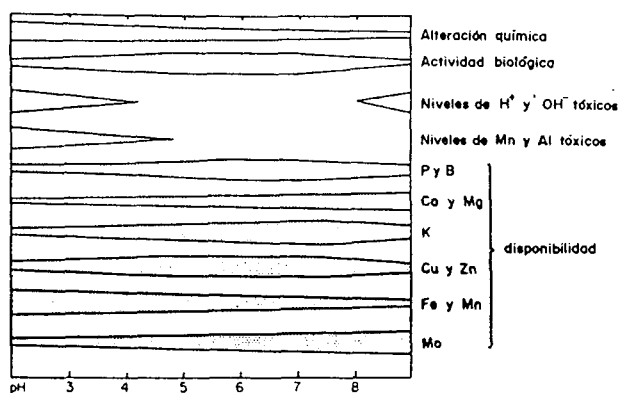


Figura 14.14. El pH de un suelo afecta a sus características químicas y biológicas, y por consiguiente al crecimiento de las plantas (Bradshaw y Chadwick, 1980).

Este último tipo de salinidad es frecuente en escombreras de minas metálicas (Fe, Cu, P) y también en minas de carbón cuando los desechos contienen sulfuros y carbonatos de calcio y magnesio.

BIBLIOGRAFIA

- AGUILO, M. et al.: «Guía para la elaboración de estudios del medio físico: Contenido y metodología». CEOTMA, Madrid, 1981.
- ANDRES, L. et al.: «Esquema metodológico integrado para la planificación, localización y ejecución de repoblaciones forestales». Cátedra de Planificación y Proyectos. ETSI de Montes. Madrid, 1987.
- BACHE, D. H. and MACASKIL, A.: «Vegetation in civil and landscape engineering». Granada Technical Books, London, 1984.
- BELLOT, F.: «El tapiz vegetal de la Península Ibérica». H. Blume Ediciones, Madrid, 1978.
- BILLINGS, W. D.: «Las plantas y el ecosistema». Serie Fundamentos de la Botánica. Herrero Hermanos Sucesores, S.A. México, 1977.
- BRADSHAW, A. D. and CHADWICK, M. J.: «The restoration of land. Studies in ecology». Volume 6. Blackwell Scientific Publications, 1980.
- ETSI de MONTES.: «Tratamiento funcional y paisajístico de taludes artificiales», 1983.
- GONZALEZ ALONSO, S.: «Recuperación para revegetación: descripción del medio. Factores que influyen en el reestablecimiento de la cubierta vegetal». II Curso sobre las Alteraciones en el Medio Ambiente y la Restauración de Terrenos en Minería a Cielo Abierto. Fundación Gómez-Pardo. Madrid, 1985.
- GROTTOLO, T.: «Il verde nella autostrada». Revista della Strada 1, 1972.
- HUETZ de LEMPS.: «La vegetación de la tierra». Akal/Universitaria, serie: Geografía. Madrid, 1983.
- JACKOBS, J. A. et al.: «Turi establishment on highway right of way slopes. A review». HRB, HRR 161: 71-103, 1967.
- LACOSTE, A. y SALANON, R.: «Biogeografía. Elementos de geografía». Oikos-Fau. Barcelona, 1978.
- MCKEE, W. H. et al.: «Mulches for steep cut slopes». HRB, HRR 53: 35-42, 1964.
- MCKEE, W. H. et al.: «Microclimate conditions found of highway slope facings as related to adaptation of species». HRB, HRR 93: 38-43, 1965.
- WEDDLE, A. E.: «Landscape with figures». Liverpool. Univ. Press, 1969.

ANALISIS Y PREPARACION DE LOS TERRENOS PARA EFECTUAR LA REVEGETACION

1. INTRODUCCION

Al analizar los terrenos sobre los que se quiere llevar a cabo la instauración de la vegetación, después de finalizada la explotación minera, se observa la dificultad o imposibilidad de desarrollar cualquier tipo de cubierta vegetal por presentar un sustrato inadecuado en el que sus características físicas, químicas y biológicas han sido alteradas.

En general, el sustrato puede presentar: escasez de materia orgánica y de nutrientes, baja proporción de elementos finos que da lugar a texturas gruesas y a una baja estabilidad de los agregados arcillo-húmicos, si es que existen, valores de pH extremos, existencia de elementos tóxicos y sales en concentraciones excesivamente altas para el desarrollo de la vegetación, entre las más significativas.

Esta situación crea la necesidad de «preparar el terreno» como paso previo y fundamental en el establecimiento de la vegetación, buscando las soluciones o métodos que ayuden a superar los problemas que dicho terreno presenta, y teniendo en cuenta el tipo de actividad extractiva desarrollada y el uso que se pretenda dar al terreno en la recuperación.

Los objetivos principales que han de tenerse en cuenta en los trabajos de preparación del terreno son:

- Proporcionar un buen drenaje.
- Descompactar el medio donde se instaura la vegetación para permitir un correcto desarrollo del enraizamiento.
- Reducir o eliminar la acidez o alcalinidad, así como la presencia de elementos tóxicos.
- Aumentar el suministro de nutrientes esenciales para las plantas.
- Integrar la morfología del terreno en el paisaje circundante.

En las Tablas 15.I y 15.II se pueden observar los problemas fundamentales que presentan las superficies alteradas por las actividades mineras y su tratamiento.

A continuación se describen las prácticas o métodos necesarios a considerar en la preparación del terreno, que van a ayudar a superar los problemas que impiden el establecimiento de la vegetación en los suelos afectados por explotaciones mineras:

- Manejo de la capa superficial del suelo.
- Tratamiento de la compactación. Descompactación.
- Enmiendas o mejoras edáficas.
- Tratamientos especiales de taludes para la preparación del terreno.

TABLA 15.I. RESUMEN DE LOS MATERIALES Y METODOS DISPONIBLES PARA MEJORAR LOS FACTORES ADVERSOS DEL LUGAR EN UNA SUPERFICIE Y SUS EFECTOS SOBRE LOS MISMOS

MEJORAS O ENMIENDAS	TEXTURA		RETENCION DE AGUA		FACTORES							
	Demasiado fina	Demasiado gruesa	Demasiado alta	Demasiado baja	Temperatura excesiva	Superficie inestable	Compactación	Acidez	Alcalinidad	Salinidad	Toxicidad	Deficiencia de nutrientes
Meteorización natural		+					+	(-)	+	+	(+)	(+)
Reducción de pendiente			(+)	(+)	+	+						
Compactación	-	+	(+)	-		+						
Ripado/escarificado	+			+		(+/-)	+		+			
Encalado (CaCO ₃ , Ca(OH) ₂)						(+)		-	(-)		(+)	(+)

- Efecto nocivo. + Mejora. ()Depende del lugar y material.

Tabla 15.I. (Continuación)

MEJORAS O ENMIENDAS	TEXTURA		RETENCION DE AGUA		FACTORES							
	Demasiado fina	Demasiado gruesa	Demasiado alta	Demasiado baja	Temperatura excesiva	Superficie inestable	Compactación	Acidez	Alcalinidad	Salinidad	Toxicidad	Deficiencia de nutrientes
Material inorgánico: residuos inertes	+	+	(+)	+	+	(+/-)	+	+	+	(-)	(+)	+
Enmienda edáficas: • Fertilizantes inorgánicos químicos (complejos minerales) • Fertilizantes orgánicos: abonos	-	+		+			+		+	(-)	(+)	+
Drenaje			+			+						
Riego				+						+	(+)	(+/-)
Vegetación			(+)		+	+	+		(+)			+

- Efecto nocivo. + Mejora () Depende del lugar y material.

TABLA 15.II. PROBLEMAS DE LOS TERRENOS ALTERADOS POR LA MINERIA Y SU TRATAMIENTO

PROBLEMAS DEL SUSTRATO	TRATAMIENTO INMEDIATO
<p>FISICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exceso de partículas o materiales gruesos. • Baja capacidad de retención. • Exceso de afloramientos rocosos. • Excesiva pedregosidad superficial. • Alta compactación. • Demasido suelto. • Inestabilidad/erosión. • Excesiva humedad (encharcamientos). • Demasiado seco. <p>NUTRICION</p> <ul style="list-style-type: none"> • Carencia de nitrógeno. • Carencia de otros macronutrientes. • Carencia de micronutrientes. <p>TOXICIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> • pH demasiado alto. • pH demasiado bajo. • Exceso de metales pesados. • Salinidad. <p>OTROS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exceso de polvo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aporte de elementos finos. • Aporte de materia orgánica. • Aporte de materia orgánica. • Sembrar sp. con raíces profundas en las escombreras capaces de llegar a la zona donde se acumula el H₂O. • Voladuras controladas: creación de rugosidades en la pared rocosa. • Aporte de elementos finos y materia orgánica en las zonas de menor pendiente. • Aporte de elementos finos. • Aporte de materia orgánica. • Ripar o escarificar. • Añadir materia orgánica. • Compactar. • Aporte de elementos finos. • Preparación de los hoyos. • Medidas estructurales (remodelado, drenajes). • Modificación de la pendiente. • Empleo de mulches o estabilizadores. • Obras de drenaje. • Modificar la pendiente. • Empleo de mulch orgánico (riego). • Abonado. • Siembras de especies leguminosas. • Abonado, enmienda caliza. • Abonado. • Añadir residuos con piritas o materia orgánica. • Implantar vegetación resistente. • Enmienda caliza. • Implantar vegetación tolerante. • Empleo de mulch orgánico. • Cubierta inerte o cultivadores tolerantes. • Meteorización. Riego. • Especies o cultivares tolerantes. • Riegos periódicos.

2. MANEJO DE LA CAPA SUPERFICIAL DEL SUELO

Conviene matizar el interés de una planificación a priori de la recuperación de las zonas alteradas por la minería, con el fin de conseguir una mayor rentabilidad económica y efectividad. En dicha planificación uno de los puntos a tratar es la retirada, antes de que se inicie la actividad, de las capas fértiles del suelo y su conservación para ser extendidas cuando se proceda a la recuperación del mismo. De esta primera medida va a depender el resto de las operaciones a realizar para conseguir un sustrato adecuado.

Después de proceder al análisis del suelo en el lugar que van a desarrollarse los trabajos, puede determinarse la conveniencia de separar únicamente la capa de tierra vegetal o, por el contrario, si la calidad de las capas subsuyacentes lo aconseja, éstas también serán retiradas selectivamente.

Cabe señalar que el mayor contenido de materia orgánica y elementos nutritivos se encuentra en la capa de tierra vegetal o cobertera, que generalmente tiene unos 30 cm de espesor, correspondiente al horizonte A, mientras que el resto de las capas infrayacentes (subsuelo y capas de estériles) situadas por encima de las masas de mineral son más pobres, Fig. 15.1, por lo que la capa de tierra vegetal siempre será conservada a no ser que se cuente con un sustituto de igual o mejor calidad, debidamente comprobado.

Son tres los tipos de operaciones que deben efectuarse con el suelo:

- Retirada y manejo de la capa o capas del suelo.
- Almacenamiento de las mismas, y
- Extendido.

a) y b) En la retirada, manejo de las capas y su almacenamiento posterior es muy importante observar las siguientes recomendaciones:

- Separar cada una de las capas identificadas para que no se diluyan las cualidades de la más fértil al mezclarse con otras de peores características. este procedimiento tiene el inconveniente del coste de la extracción selectiva.
- La retirada y almacenamiento deben efectuarse con cuidado, especialmente con la capa de tierra vegetal, para evitar su deterioro por compactación y de esta manera preservar la estructura del suelo, evitar la muerte de microorganismos aerobios, riesgo de contaminación por sustancias ácidas o tóxicas, alteración del ciclo normal de los compuestos nitrogenados, riesgo de la erosión eólica e hídrica, etc.

Como medidas básicas para prevenir esta compactación, se aconsejan, las siguientes medidas:

- Manipular la tierra cuando esté seca o cuando el contenido de humedad sea menor del 75 %.
- Evitar el paso reiterado de maquinaria sobre ella.

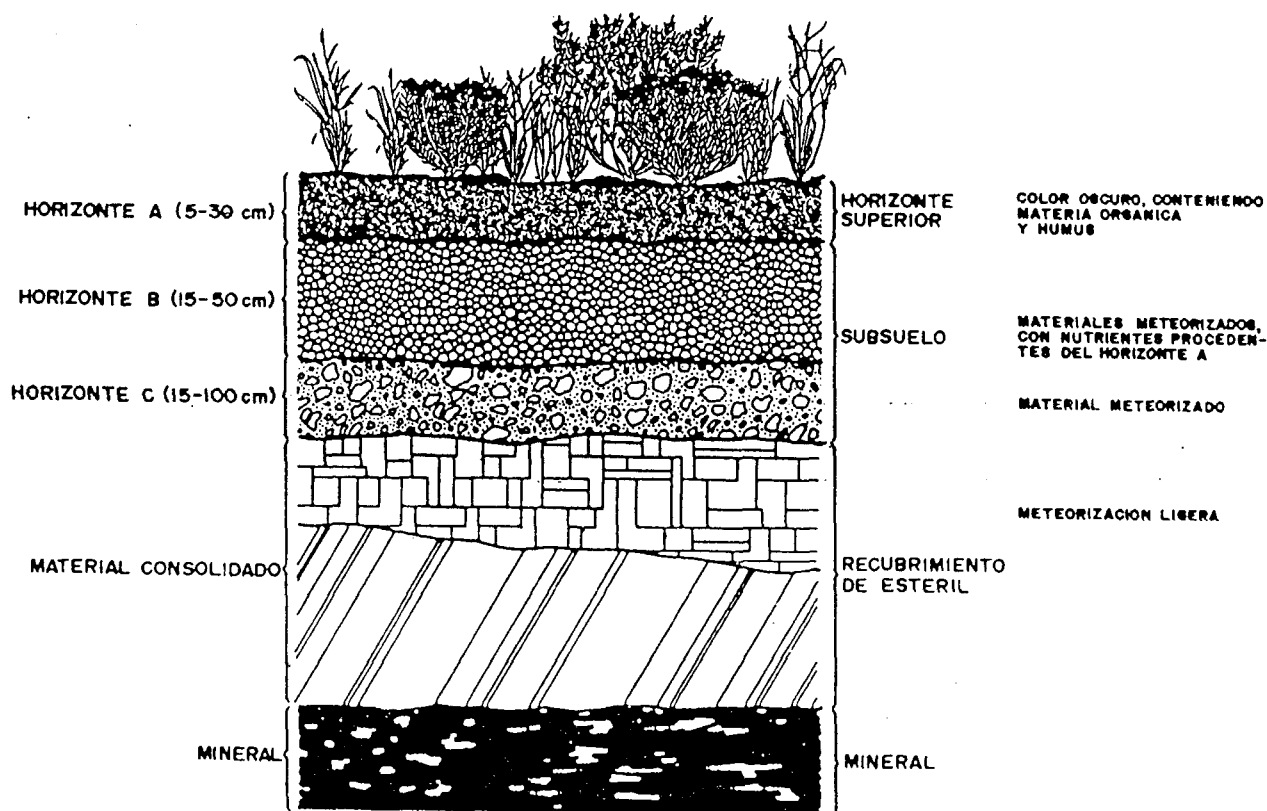


Figura 15.1. Perfil del suelo.

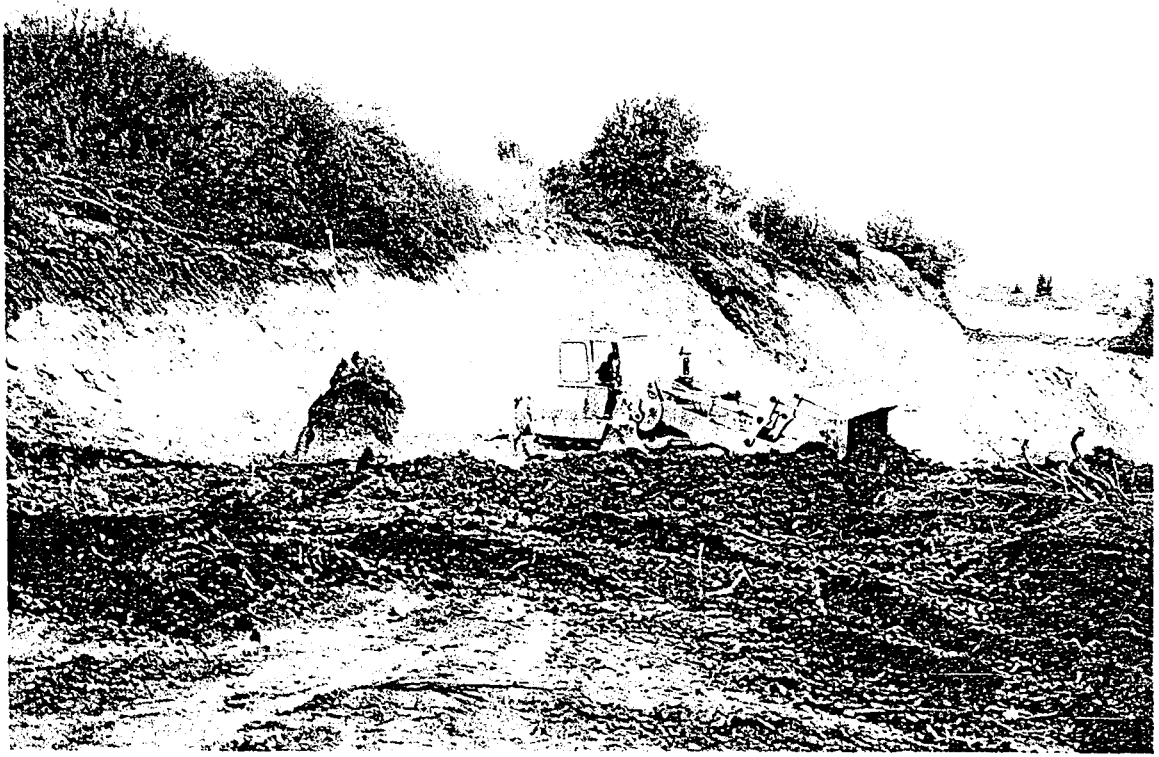


Foto 15.1. Retirada de la capa superficial del suelo.

- Depositar estos materiales en capas delgadas evitando la formación de grandes montones ($h < 3$ m). La altura de los mismos, así como el período de tiempo que pueden permanecer acopiados, dependen de la textura del terreno:

TABLA 15.III

	ALTURA DEL MONTON (m)	PERIODO DE TIEMPO (meses)
Suelos ligeramente arenosos	2,4	12
Suelos medianamente franco arcillosos	1,4	12
Suelos franco arcillosos	1,2	9
Suelos muy arcillosos	0,9	6

En cuanto al almacenamiento de la tierra vegetal y demás capas habrá que añadir las siguientes recomendaciones complementarias:

- Sólo deben apilarse cuando sea impracticable una recuperación progresiva del terreno que permita transferirlas continuamente desde su posición original a su nuevo emplazamiento, Fig. 15.2.
Este tipo de restauración progresiva es beneficiosa tanto desde un punto de vista económico como biológico,

ya que por un lado evita el incremento de coste que supone mover dos veces el mismo material, y por otro reduce el riesgo de deterioro de las características edáficas.

- En caso de almacenamiento, los materiales deben ser protegidos del viento y la erosión hídrica, de la compactación y de contaminantes que alteren su capacidad para sustentar la vegetación. Los suelos ligeramente arenosos sufrirán menos peligros en el apilamiento que los suelos arcillosos, ya que los primeros son menos compactables.
- Estudiar posibles sitios donde ubicar el acopio y proceder a su selección, teniendo en cuenta: el relieve, la longitud de la pendiente, inclinación, condiciones de drenaje superficial e interno, riesgo de inundación y susceptibilidad a deslizamientos.
- Si los montones acopiados no son utilizados para la reconstrucción del suelo en un período corto de tiempo (menos de un año) puede ser aconsejable sembrar dicha superficie con una mezcla de semillas, mayoritariamente de leguminosas, y añadir mulch para mantener la estructura del suelo en los montones, evitar la reducción del contenido de oxígeno y cambios adversos en la fertilidad, y protegerlos contra la erosión hídrica y eólica.

c) Una vez que vaya a procederse a la recuperación del terreno, las capas del suelo se extenderán de nuevo sobre el terreno seco, por orden de calidades, hasta obtener un perfil similar al original. Se recomienda lo siguiente:

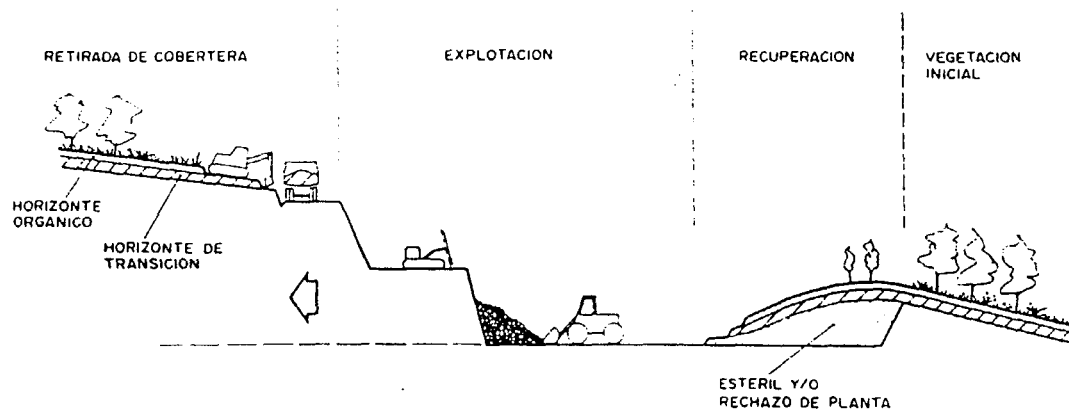


Figura 15.2. Extracción y recuperación progresiva.

— El extendido de la tierra debe realizarse sobre el terreno ya remodelado, con maquinaria que ocasione una mínima compactación.

Para proporcionar un buen contacto entre las sucesivas capas de material superficial se aconseja escarificar la superficie de cada capa (5-15 cm de profundidad) antes de cubrirla. Si el material sobre el que se va a extender estuviera compactado habría que realizar un escarificado más profundo (50-80 cm). Esto previene la laminación en capas, mejora la infiltración y el movimiento del agua, evita el deslizamiento de la tierra extendida, y facilita la penetración de las raíces.

— El material recolocado deberá adoptar una morfología similar a la original. El extendido de cada capa debe efectuarse de forma que se consiga un espesor aproximadamente uniforme en consonancia con el uso posterior del terreno, la pendiente y la red de drenaje.

— Debe evitarse el paso de maquinaria pesada sobre el material ya extendido.

Tanto la extracción del suelo como el apilamiento y el extendido del mismo no deben tener lugar en condiciones de humedad.

La estrategia o los pasos a desarrollar en el movimiento del suelo dependerá de la dedicación que se le dé al terreno en la restauración y de las necesidades que dicha aplicación solicite. Tabla 15.IV.

Una vez reconstruido el suelo, pueden tener lugar procesos de erosión hídrica y eólica. Este riesgo depende de la estación del año, longitud del talud y pendiente, erosionabilidad del material del suelo, y del tiempo que transcurra hasta que se establezca una cubierta permanente de vegetación. Para controlar esta erosión pueden emplearse mulches y estabilizadores del suelo, cortavientos, etcétera.

TABLA 15.IV. ESTRATEGIAS DEL MOVIMIENTO DEL SUELO FRENTE A LA CALIDAD DE LA RESTAURACION

ESTRATEGIAS A TENER EN CUENTA EN EL MOVIMIENTO DEL SUELO	+ CALIDAD DE LA RESTAURACION → -				
	Terrenos agrícolas cultivables de alta calidad	Pastizales agrícolas de alta calidad	Pastoreo agrícola extensivo en laderas	No agrícola, praderas o dehesas	No agrícola. Silvestre
Retirada de la tierra vegetal	xx	xx	x	x	
Retirada del subsuelo	xx	x			
Almacenamiento mínimo	xx	xx			
Manejo cuidadoso de la maquinaria	xx	xx	x	x	x
Cuidado con el grado de humedad del suelo	xx	x	x	x	
Ripado para superar la compactación	xx	xx	xx	x	x

x Aconsejable.
xx Necesario.

En el caso que vaya a procederse a la creación de un escombrera de estériles o sea necesario proceder a la remodelación de una ya existente ocupando un área mayor, debe retirarse también la tierra vegetal de la nueva superficie a ocupar de forma que pueda extenderse posteriormente sobre la escombrera.

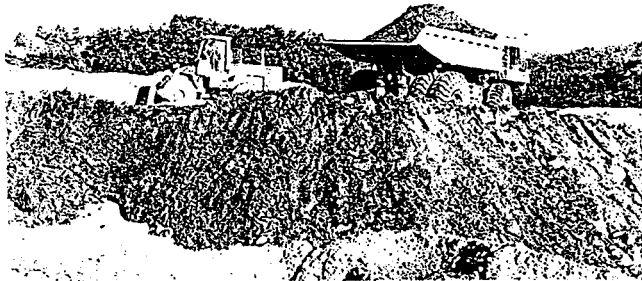


Foto 15.2. Extendido de los suelos sobre el estéril de mina.

miento de las plantas para suelos con diferentes texturas. Normalmente, el crecimiento de las raíces está limitado cuando la densidad del suelo llega a ser mayor de 1,5 g/cm³ en suelos de texturas finas (arcillas y limos). En suelos de textura gruesa (arenosos) las densidades por encima de 1,7 g/cm³ son las restrictivas.



Foto 15.3. Compactación de los materiales superficiales por el paso de la maquinaria.

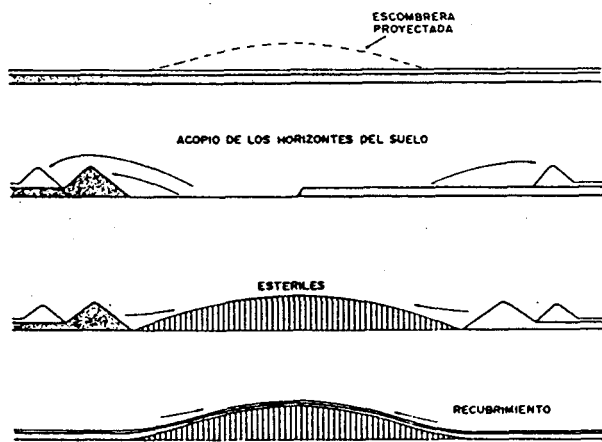


Figura 15.3. Retirada de los horizontes del suelo antes de la creación de una escombrera interior y posterior recubrimiento de esta.

TABLA 15.V. DENSIDADES DEL SUELO LIMITANTES Y DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA SUELOS DE DIFERENTES TEXTURAS (Lyle, 1987)

TEXTURA DEL SUELO	DENSIDAD DEL SUELO LIMITANTE (g/cm ³)	DISPONIBILIDAD DEL AGUA (cm/cm profundidad del suelo)
Franca arcillosa limosa (56-75 % de arcilla)	1,30	0,26
Franca	1,39	0,25
Muy fina franco arenosa	1,35	0,22
Fina franco arenosa	1,35	0,20
Franco arenosa	1,40	0,17
Arenosa franca	1,45	0,12
Arena fina	1,45	0,10
Arena	1,50	0,07
Arena gruesa	1,60	0,06

3. TRATAMIENTO DE LA COMPACTACION. DESCOMPACTACION

El laboreo o manipulación a que es sometido un suelo en su reconstrucción durante la preparación del terreno, anteriormente descrita, puede ocasionar una excesiva compactación del suelo, especialmente cuando los materiales contienen altas cantidades de arcilla y limo, como consecuencia del paso repetido de maquinaria sobre las capas de tierra extendidas sobre el terreno ya remodelado.

Los suelos compactados experimentan un aumento de su densidad, que restringe el crecimiento de las raíces y reduce el movimiento del aire y agua dentro de ellos. En la Tabla 15.V figura una lista, a modo de guía, que muestra las densidades del suelo que son limitantes en el creci-

El objetivo de la reconstrucción del suelo en la recuperación es crear horizontes que tengan una densidad equivalente a la que poseen capas similares en suelos no perturbados por las actividades mineras. Para ello, será necesario descompactar el terreno antes de proceder a instaurar la vegetación, Fig. 15.4.

Las condiciones de humedad del suelo para llevar a cabo la descompactación son similares a las exigidas para los movimientos de los suelos, es decir se efectuará sobre suelos no húmedos.

Existen tres maneras de descompactar el terreno, dependientes de la profundidad a la que se encuentren las capas compactadas: *escarificado*, *subsulado* y *ripado*. Las tres aumentan la capacidad de infiltración del agua a fin

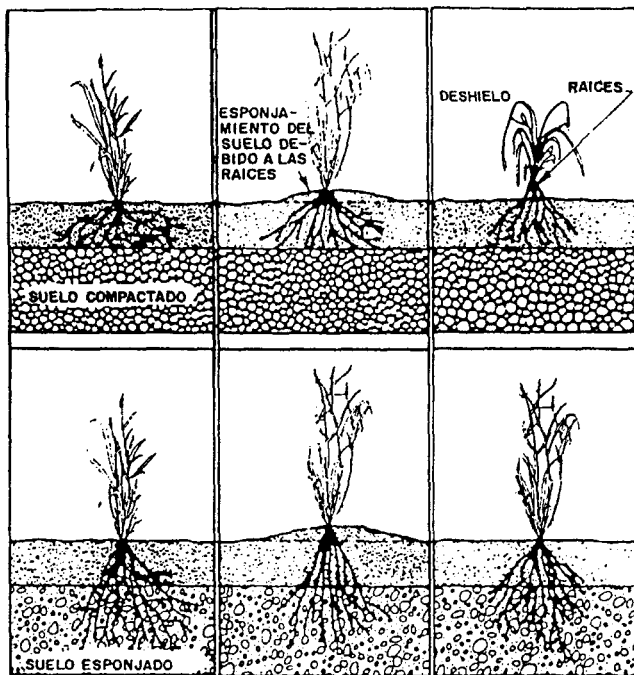


Figura 15.4. Comparación entre un suelo no compactado y un suelo compactado y sus efectos cuando se producen procesos de heladas y deshielos.

de obtener una reserva capaz de sostener el crecimiento de la vegetación, reducen la densidad del suelo y permiten una mayor penetración de la raíces, con lo que aumenta sustancialmente el crecimiento de las mismas, Tabla 15.VI.

TABLA 15.VI

OPERACION	PROFUNDIDAD
Escarificado	10-35 cm
Ripado y subsolado	35 cm-1 m ≈ 50 cm material con textura arcillosa ≈ 75 cm material con textura arenosa

El ripado descompacta el terreno a mayor profundidad que el subsolado, volteando los horizontes del suelo. Sin embargo, en el subsolado solo se remueven dichos horizontes.

Una buena infiltración del terreno no sólo depende de la compactación de éste, sino también de la suficiente inclinación del terreno que permita el movimiento vertical y lateral del agua a través del mismo. Por esta razón, para que tenga lugar una adecuada evacuación del agua, es aconsejable que la superficie cuente con una pendiente mínima del orden de 1:10 (5° - 6°) (Wilson, 1985). Aquellos lugares que no posean esta inclinación estarán mal drenados y el agua se acumulará, por lo que se puede proceder a crear lomas o pequeñas colinas de 30 a 40 m de ancho por 1,5 a 2 m de alto.

4. ENMIENDAS O MEJORAS EDAFICAS

Si la cobertera no ha sido previamente retirada antes de comenzar la actividad minera, o si las condiciones edáficas de la misma que ha de extenderse sobre las escombreras, no presenta los mínimos aceptables para que se desarrolle la nueva vegetación, puede ser sustituida por el subsuelo u otros materiales disponibles, que generalmente presentan una peor calidad, y añadir las enmiendas edáficas necesarias, encaminadas a mejorar las características físicas y químicas de los materiales que forman las escombreras y demás superficies a recuperar. Esta operación resulta más recomendable que el traer tierra vegetal de zonas alejadas del lugar a recuperar, debido a su alto coste.

La profundidad de la capa de cobertera dependerá del estado de la superficie que vaya a cubrir, lo ideal son 30-40 cm y lo mínimo 15 cm, en función del uso que se vaya a dar al terreno.

De igual modo, también resulta rentable utilizar, en lugar de tierra vegetal, material inorgánico adecuado (residuos inorgánicos) que esté disponible en las proximidades, o lo que es lo mismo suero procedente de préstamos: capas de estériles (siempre y cuando no sean tóxicos), residuos inertes procedentes de canteras o de cualquier explotación (calizas, limos, etc) que pueden mejorar las propiedades físicas del terreno a recuperar. Es así como las escombreras de textura gruesa, arenosa o con rocas, pueden ser acondicionadas añadiendo material fino como limos o arcillas, ya que mejoran la capacidad de recarga de agua y nutrientes, la capacidad de cambio, y se reducirá la lixiviación. Las escombreras de textura fina (arcilla) pueden mejorarse por la adición de material arenoso grueso. Normalmente, este tipo de material inorgánico necesita mejoras edáficas para suplir las deficiencias que en materia orgánica y nutrientes suelen presentar.

Las enmiendas o mejoras edáficas pueden ser incorporadas (mezcladas) o permanecer en la superficie, dependiendo de sus propiedades y de la cantidad. Si el terreno tiene una buena textura o si el sustrato es pedregoso o rocoso, entonces deberá permanecer en la superficie, en el resto de los casos se incorporarán, lo cual supone una mayor efectividad y una mejora en la profundidad del suelo.

Los criterios a tener en cuenta para determinar la clase y cantidad de enmiendas a utilizar son, según Vogel:

- Disponibilidad de nutrientes en las escombreras o suelos.
- Requerimientos de las especies vegetales a instaurar.
- Efecto de los fertilizantes en las propiedades del suelo minero.
- Coste.
- Requerimientos para refertilización y disponibilidad de agua.
- Uso a que vaya a destinarse la superficie a recuperar, de manera que un uso agrícola tendrá mayores exigencias que un uso forestal o de hábitat para la fauna. Las actuaciones más inmediatas han de dirigirse a proporcionar materia orgánica y elementos nutrientes, ya que si se logra el desarrollo de una cubierta vegetal que pueda irse incorporando al ciclo edáfico, se comenzará lentamente a desarrollar un suelo cada vez

más evolucionado. Para ello, es aconsejable el empleo de diferentes enmiendas edáficas de gran importancia en la preparación del suelo, cuyas aportaciones pueden efectuarse de dos maneras:

- A) INDIRECTA. Aporte de materia orgánica, fertilización orgánica o enmiendas orgánicas (tierra vegetal, turbas y abonos).
- B) DIRECTA. Fertilizantes inorgánicos (complejos minerales).

El resto de las actuaciones dependerán del tipo de mineral que se esté explotando y de la existencia o no de problemas de acidez/alcalinidad y toxicidad. Por tanto, las actuaciones irán encaminadas a efectuar:

- Mejoras de acidez o alcalinidad.
- Mejoras de toxicidad.

4.1. Fertilización

4.1.1. FERTILIZACION INDIRECTA. FERTILIZACION ORGANICA O ENMIENDAS ORGANICAS

La materia orgánica supone una excelente ayuda y tiene efectos importantes en las características físicas y químicas de las escombreras o superficies a recuperar.

La materia orgánica contiene nutrientes, mejora la capacidad de retención de agua y la capacidad de cambio (en suelos ligeramente arenosos o pedregosos), mejora la aireación y drenaje (en suelos pesados), mejora la estabilidad superficial, penetración del agua por alteración de la estructura, disminuye la escorrentía superficial y mejora la germinación y la emergencia de la siembra.

La materia orgánica puede ser proporcionada por una amplia variedad de fuentes apropiadas, además de la suministrada por la tierra vegetal. La elección dependerá principalmente de lo que se disponga en cantidades suficientes en las proximidades. Deberá ser incorporada en la superficie a recuperar a una profundidad de 15 cm o más.

Algunas de estas fuentes de materia orgánica son:

- **Abono** procedente de granjas: tiende a ser variable y puede tener alta relación C/N. Normalmente contiene gérmenes nocivos, como ocurre con el abono del cerdo que puede presentar altos niveles de cobre, o con el de pollo que puede llevar amonio. Es posible que causen contaminación, por lo que se requiere un estudio minucioso antes de su aplicación.
- **Residuos de los hongos**, buena calidad y con alto contenido en cal.
- **Residuos domésticos**, es una excelente fuente de materia orgánica y de algunos nutrientes (N, P). Pueden contener apreciables cantidades de elementos de metales pesados (Zn, Cu, Ni) y de gérmenes nocivos. Es necesario someterlo a análisis antes de aplicarlo. Su utilización en invierno deberá evitarse ya que el N es probable que pase a nitrato en el suelo y puede ser liberado por lixiviación.

— **Residuos procedentes del procesamiento de madera**, alta relación C/N, la corteza es bastante buena para impartir textura a los suelos.

— **Turba**, es muy variable, pero básicamente hay dos tipos: la turba alta, llamada musgo de pantano perteneciente al Género Sphagnum, y la turba baja, formada predominantemente por especies del Género Carex. Este último tiene un alto contenido de nutrientes pero menor capacidad de retención del agua y es más compacta. El musgo de pantano es más esponjoso, no posee alto contenido de nutrientes, aunque es excelente para mejorar la capacidad de retención en suelos arenosos, y la permeabilidad de suelos pesados. La turba es limpia y fácil de manejar.

— También puede utilizarse el **mulch** (mulch de paja, de heno) para suministrar materia orgánica y nutrientes, fundamentalmente en aquellas superficies con fuertes pendientes que presenten inestabilidad y riesgo de erosión.

4.1.2. FERTILIZACION DIRECTA. FERTILIZANTES INORGANICOS

Los fertilizantes inorgánicos constituyen una manera fácil y barata de suministrar los nutrientes. Son un componente esencial para que la restauración tenga éxito, aunque es aconsejable su empleo junto con el aporte de materia orgánica ya que de esta manera aumenta la capacidad de retención de nutrientes y estimula el ciclo de nutrientes.

El **nitrógeno** es uno de los elementos nutritivos fundamentales para el desarrollo de la vegetación. Los fertilizantes nitrogenados deben añadirse más a menudo que cualquier otro fertilizante que contenga otros nutrientes, y de manera que la planta pueda disponer de nitrógeno a lo largo de todo su ciclo vegetativo. Al comienzo de la siembra sería conveniente añadir nitratos (NO_3) (fácilmente lixiviables si la planta no los asimila rápidamente), para posteriormente ir añadiendo urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), nitrato amónico (NH_4NO_3) u otras formas de nitrógeno que contenga a éste en forma de catión amonio, de asimilación más lenta y que, por lo tanto, se pierde menos por percolación.

En la Tabla 15.VII figuran algunos ejemplos de fertilizantes nitrogenados.

El nitrógeno también puede ser proporcionado a través de la siembra de leguminosas, que favorecen la presencia de nitrógeno en el suelo al tener la propiedad de fijar nitrógeno atmosférico en los nódulos de sus raíces, donde se alojan las bacterias pertenecientes al género Rhizobium (Fig. 15.5). Estos microorganismos son esenciales en el establecimiento de la vegetación en tierras afectadas por las labores mineras.

Sin embargo, es interesante destacar, que ha sido comprobado el hecho de que las leguminosas pueden reducir la cantidad total del nitrógeno del suelo si dicha cantidad era alta antes del crecimiento de esas especies. Bajo estas circunstancias parece razonable añadir la menor cantidad de fertilizantes nitrogenados que sea posible mientras se desarrollan las leguminosas.

Cada especie de leguminosas se asocia con una especie determinada de Rhizobium con el fin de producir la máxima cantidad de nitrógeno útil (ver Tabla 15.VIII). La bacteria que necesita la leguminosa sembrada en un de-

TABLA 15.VII. EJEMPLOS DE FERTILIZANTES NITROGENADOS
(Johnson and Bradshaw, 1982 y Lyle, 1987)

PRODUCTO	DESCRIPCION
Nitrato amónico	Contiene $\approx 34\%$ N. A menudo se utiliza en fertilizantes compuestos. Debe almacenarse con cuidado, ya que coge humedad del aire y puede llegar a apelmazarse.
Urea	Contiene 46% N, altamente soluble. No se mezcla con superfosfato.
Sulfato de amonio	Contiene $\approx 21\%$ N. Buena calidad de mantenimiento. Mezcla bien con superfosfato.
Cloruro amónico	Contiene 26% N.
Nitrato de sodio	Contiene 16% N, la base de sodio conserva la cal. Se usa como abono aplicado a la superficie.
Amoniaco	Contiene $\approx 82\%$ N. Debe ser aplicado al menos a 10 cm de profundidad para evitar la pérdida por volatilización.

terminado suelo puede estar ya presente en el suelo. Sin embargo, es más seguro inocular la semilla con la propia

bacteria antes de la siembra. Estas bacterias están disponibles comercialmente y pueden ser adquiridas por la misma empresa que vende las semillas de leguminosas.

Las semillas de leguminosas se inoculan mojándolas ligeramente con agua, jarabe, latex, u otro adhesivo. Deben ser humedecidas lo suficiente como para permitir que la bacteria se fije a las semillas, pero no tanto que las semillas se lleguen a pegar entre sí.

El inóculo, que contiene la bacteria, se esparce sobre las semillas húmedas para que se mezclen. La inoculación debe hacerse antes de que las semillas se siembren o al mismo tiempo. Esto es mejor ya que la bacteria si no puede morir por desecación o por altas temperaturas.

Para retener la humedad del suelo y bajar la temperatura superficial se puede aplicar un mulch.

Cuando el pH es mayor de 5 puede ser fijado más cantidad de nitrógeno.

Mediante la sembradora o la siembra a voleo la semilla de leguminosa debe mezclarse con la bacteria y una pequeña cantidad de agua que las envuelva:

— Para 25 Kg de semilla hay que añadir:

- 2 litros de agua si la semilla es pequeña ó $1/4\text{ litro}$ si la semilla es más grande.
- 100 g de bacteria.

Si se hidrosiembra, el inóculo puede añadirse directamente a la suspensión semilla-agua, a razón de 100 g por 4.500 litros ó 100 g por $1/4 - 1/6\text{ ha}$.

Si las raíces de las leguminosas no tienen bacterias fijadoras de nitrógeno, las raíces obtienen el nitrógeno del suelo, de igual modo a como lo hacen las plantas no leguminosas.

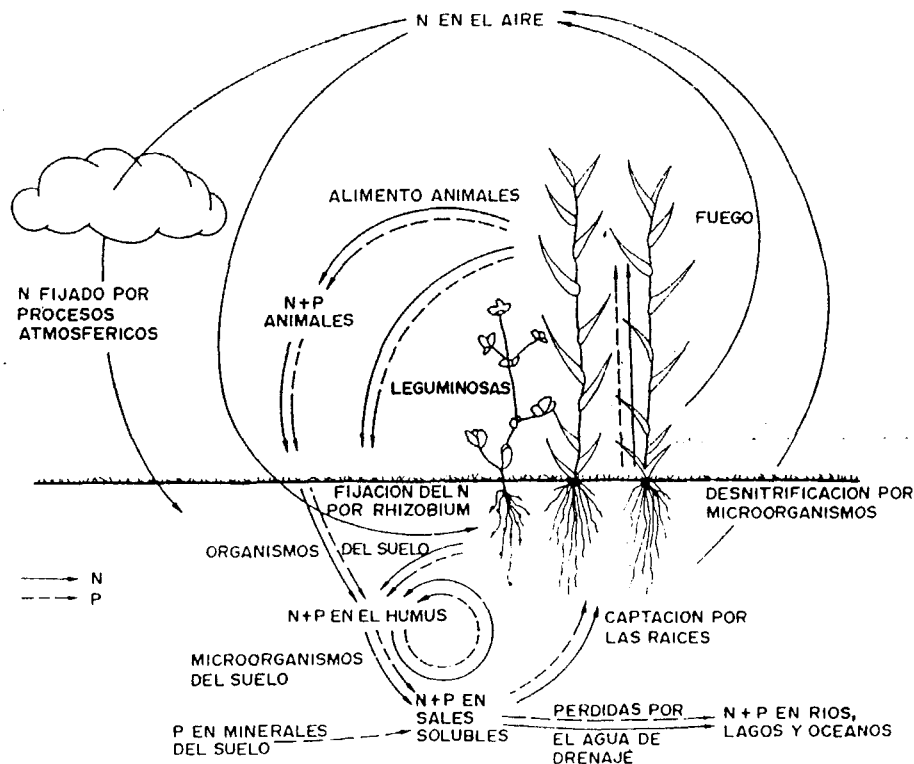


Figura 15.5. Ciclo de los nutrientes en el ecosistema planta/suelo. (Bradshaw y Chadwick, 1980.)

De forma similar a lo que ocurre con el Rhizobium sucede con las micorrizas. Estas son asociaciones simbióticas que surgen bajo condiciones naturales entre algunos hongos y las raíces de especies vegetales, favoreciendo la absorción de nutrientes.

TABLA 15.VIII. ESPECIFICIDAD ENTRE LOS DISTINTOS TIPOS DE LEGUMINOSAS Y LAS DIFERENTES CLASES DE BACTERIAS RHIZOBIUM (Lyle, 1987)

BACTERIA (Nombre científico)	LEGUMINOSA (Nombre genérico)
R. meliloti	Medicago
R. meliloti	Melilotus
R. meliloti	Trigonella
R. trifolii	Trifolium
R. leguminosarum	Pisum
R. leguminosarum	Vicia
R. leguminosarum	Lathyrus
R. leguminosarum	Lens
R. phaseoli	Phaseolus
R. lupini	Lupinus
R. lupini	Ornithopus
R. japonicum	Glycine
R. japonicum	Arachis
R. japonicum	Phaseolus

En cuanto el fósforo cabe decir que la cantidad del mismo disponible en el suelo es a menudo baja. Tiende a estar más disponible en suelos que tienen un pH de 6.

El fósforo no presenta pérdidas por lixiviación como ocurre con el nitrógeno y con el potasio, de manera que la mayor parte del fósforo que no ha sido absorbido por las plantas (70 a 90 %) forma compuestos insolubles de hierro o aluminio en suelos ácidos, y en suelos básicos da lugar a compuestos insolubles de fosfato de calcio. Esto significa que grandes cantidades de fósforo pueden acumularse en un suelo que es repetidamente fertilizado con fósforo. Por tanto, cuando estas acumulaciones ocurren no debería añadirse más fertilizantes de fósforo.

En la Tabla 15.IX se observan algunos de los fertilizantes de fósforo que se utilizan normalmente en la recuperación. El más insoluble de todos es la roca fosfática y el más frecuente de utilización el superfosfato.

El potasio es el tercer elemento importante en el suelo para el crecimiento de las plantas. Al igual que el fósforo, la mayor parte del potasio está en forma poco disponible para las plantas, aunque con el tiempo llega a estar disponible mediante un proceso muy lento.

Hay varias fuentes de fertilizantes de potasio, alguna de estas fuentes son las indicadas en la Tabla X:

TABLA 15.X. EJEMPLOS DE FERTILIZANTES DE POTASIO (Lyle, 1987)

FERTILIZANTE	K ₂ O (%)
Cloruro potásico	60
Sulfato potásico	50
Sulfato de magnesio potásico	22
Nitrato potásico	44
Carbonato potásico	57

TABLA 15.IX. EJEMPLOS DE FERTILIZANTES DE FOSFORO (Williamson et al., 1982, y Lyle, 1987)

FERTILIZANTES	P ₂ O ₅ (%)	P (%)	SOLUBILIDAD EN AGUA (%)
— Mineral o roca fosfática (aplicado generalmente a largo plazo. Actúa más rápidamente en suelos ácidos y en sitios húmedos)	27-28	12-18	Muy baja 0
— Superfosfato normal (actúa rápidamente en suelos con pH cercano al neutro)	18-20	9	Soluble 85
— Superfosfato triple	44-47	19	85
— Fosfato de amonio (monobásico)	48	21	92
— Fosfato de amonio (dibásico)	46	18	190
— Acido fosfórico	54	32	100

En la práctica, cuando se utilizan 2 ó 3 elementos nutritivos (N, P, K) se utilizan los denominados abonos complejos o abonos NPK (15-15-15 ó 18-18-18) que son mezclas de fertilizantes que contienen varios de dichos elementos en las proporciones necesarias.

TABLA 15.XI. COMPUESTOS NPK (Coppin and Bradshaw, 1982)

COMPUESTOS NPK	% COMPOSICION			OBSERVACIONES
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
17-17-17	17	17	17	Adecuados para la mayor parte de los usos. La mayoría son solubles, rápida liberación.
20-10-10 (alto N)	20	10	10	
10-25-15	10	25	15	

4.2. Enmiendas para corregir la acidez o alcalinidad del suelo

Los suelos *ácidos* causan problemas a la vegetación, liberan metales tóxicos, como aluminio, manganeso, cobre, plomo y zinc; metales pesados como selenio, cromo, níquel y cadmio, y producen una disminución en la disponibilidad de fósforo.

En minería, el problema de la acidez puede presentarse en las escombreras procedentes de explotaciones de carbón, graveras, areneros y de rocas ácidas constituidas por rocas arcillosas sedimentarias, granitos, cuarcitas, etc.

En general, presentan una baja capacidad de retención de agua, deficiencias en elementos nutrientes y materia orgánica, y baja proporción de elementos finos. Es conveniente, por tanto, el aporte de tierra vegetal, y si no se

dispone de ella de cualquier otro compuesto orgánico que suministre materia orgánica y nutrientes. También se aconseja añadir fertilizantes.

El método más común para mejorar la acidez de los suelos mineros y elevar el pH hasta la neutralidad es mediante la enmienda caliza o encalado. Los materiales más comunes son: cal viva (CaO), carbonato cálcico (CO₃Ca), dolomías (carbonato cálcico-magnésico, muy utilizado cuando hay deficiencias en magnesio en la solución del suelo), e incluso restos de escombros o productos de construcción, siempre y cuando el transporte desde zonas distantes no la encarezcan demasiado. La enmienda caliza debería ser incorporada a 15 cm de profundidad y antes de que se proceda a extender la tierra vegetal o abonos, etc.

En la Tabla 15.XII se puede observar los requerimientos de caliza para cada diferente textura y pH del suelo.

Hay que añadir, que aparte de corregir los valores bajos de pH, la cal también actúa de la siguiente forma:

- Añade calcio al suelo.
- Favorece la descomposición rápida de la materia orgánica y aumenta el N.
- Aumenta la eficacia de los fertilizantes.
- Aumenta la disponibilidad de nutrientes.
- Disminuye la toxicidad del aluminio y del hierro.
- Mejora las condiciones físicas del suelo.

En cuanto a la *alcalinidad* del suelo (pH > 7) cabe decir que incluso las escombreras más básicas, como son las pertenecientes a las canteras de caliza, no suelen presentar pH mayores de 8. Si por cualquier motivo alcanzan niveles superiores por la composición en materiales muy calcáreos, será conveniente cubrir el material con materia orgánica o suelo natural.

TABLA 15.XII. REQUERIMIENTOS DE CALIZA (t/ha) EN DIFERENTES TEXTURAS DEL SUELO PARA ELEVAR EL pH A 5 Y 6 (Coppin and Bradshaw, 1982)

pH SUELO	ARENOSA, ARENOSA FRANCA		FRANCO ARENOSA		FRANCO LIMOSA, FRANCO ARCILLOSA, ARENOSA, FRANCA		FRANCO ARCILLOSA, FRANCO ARCILLOSA LIMOSA, ARCILLOSA		ALTO CONTENIDO EN MATERIA ORGANICA	
	5,5	6	5,5	6	5,5	6	5,5	6	5,5	6
4	3,7	5	4,5	6	6,1	8,1	7,5	10	8,9	11,9
4,2	3,2	4,5	4,2	3,5	5,2	7,2	6,5	9	7,7	10,7
4,4	2,7	4	3,4	4,9	4,3	6,5	5,5	8	6,5	9,5
4,6	2,2	3,5	2,7	4,2	3,6	5,6	4,5	7	5,4	8,4
4,8	1,7	3	2,1	3,6	2,9	4,9	3,5	6	4,1	7,1
5	1,2	2,5	1,5	3	2	4,1	2,5	5	3	6
5,2	0,8	2	1	2,5	1,2	3,2	1,5	4	1,7	4,7
5,4	0,3	1,5	0,4	1,9	0,4	2,5	0,5	3	0,6	3,6
5,6	—	1	—	1,2	—	1,6	—	2	—	2,4
5,8	—	0,5	—	0,6	—	0,9	—	1	—	1,2

4.3. Mejora de la toxicidad

Los problemas de toxicidad que pueden presentar las escombreras y los residuos de plantas de tratamiento, debido principalmente a la existencia de metales pesados (Cu, Pb, Ni, Zn, Hg, etc.) u otro tipo de metales (Al, Mn), pueden solucionarse mediante el aporte de materia orgánica, fundamentalmente, así como de caliza y fosfatos.

La materia orgánica tiene la capacidad de formar quelatos metálicos estables y de eliminar de esta forma la toxicidad hasta la mineralización de la materia orgánica. La eliminación a largo plazo de la toxicidad se conseguirá mediante la constitución de una cubierta vegetal estable que forme una capa sostenida de materia orgánica fértil.

El sulfato y la caliza elevan el pH, lo cual produce una disminución en la solubilidad de los metales, pero en el caso del aluminio y del zinc la solubilización puede producirse en ambos extremos de la escala de pH.

La salinidad constituye otro tipo de toxicidad cuyos efectos suelen ser letales para la mayoría de las especies, por lo que será necesario:

- Mejorar el drenaje de los materiales de la escombrera adecuando la estructura y la textura.
- Añadir una superficie de mulch para controlar la fluctuación de temperatura en la superficie.
- Regar los residuos que tienen adecuadas filtraciones del agua, de manera que los suelos sean lavados a horizontes inferiores.
- Dar tiempo a los procesos atmosféricos naturales y lixiviaciones, en climas húmedos.

El uso de plantas resistentes puede ser una forma de conseguir el establecimiento de la vegetación en lugares con problemas de toxicidad, sobre todo en los casos de salinidad.

5. TRATAMIENTOS ESPECIALES DE LOS TALUDES EN LA PREPARACION DEL TERRENO

La topografía final que presenta la superficie después de haberse efectuado la explotación minera influirá en gran manera en el éxito del establecimiento de la vegetación. Dicha topografía debe cumplir dos objetivos principales que son el integrarse armoniosamente en el paisaje natural circundante y el facilitar el drenaje natural del agua superficial.

Se puede hacer una distinción entre dos tipos de topografía que van a determinar el tratamiento a seguir en cada caso, para preparar un sustrato capaz de soportar la revegetación:

- Áreas llanas y taludes suaves.
- Taludes de fuertes pendientes.

5.1. Áreas llanas y taludes suaves

Aquí están comprendidas todas las superficies llanas y aquellas que poseen pendientes inferiores a 20°.

Como anteriormente se ha dicho, para una correcta evacuación del agua la pendiente ha de ser superior a 1:10 (5°-6°), cuando ésta sea inferior será aconsejable crear lomas o pequeñas colinas con esta inclinación.

En este tipo de topografía las labores de preparación del terreno consistirán en las enunciadas anteriormente: eliminación de elementos gruesos más destacables, refino o escarificado del terreno, cuando este lo necesite y según el tipo de suelo, hasta obtener una superficie fina y nivelada e incorporación de las enmiendas edáficas que sean necesarias.

El acceso de la maquinaria a estas topografías no presenta dificultad.

5.2. Taludes escarpados o con fuertes pendientes

Muchas de las escombreras resultantes de la minería y terraplenes de caminos de acceso y, por supuesto, los propios frentes de explotación, presentan taludes superiores a 20°, que van a dificultar los trabajos de adecuación del terreno para acoger una determinada vegetación.

En este tipo de taludes puede ser necesario adoptar medidas estructurales de corrección o de protección del talud (antes de proceder a la descompactación, o al aporte de materia orgánica, etc.) para vencer los problemas de erosión o inestabilidad que, normalmente, presentan y que hacen técnicamente inviable la implantación de la vegetación.

Estas medidas, en muchos casos, pueden agruparse y resumirse en tres grandes grupos:

- Remodelación.
- Drenajes.
- Protección superficial.

5.2.1. REMODELACION

Supone fundamentalmente el movimiento de tierras para reducir el grado de pendiente y conseguir superficies más tendidas que favorezcan posibles tratamientos posteriores. Se trata de medidas costosas y en muchas ocasiones de difícil ejecución por el necesario empleo de maquinaria pesada y el difícil acceso que, frecuentemente,



Foto 15.4. Reducción del ángulo de talud en una escombrera

presentan las zonas a remodelar. Algunas de estas medidas, efectuadas en depósitos de estériles o en taludes excavados en materiales blandos, se concretan en:

- Reducir el ángulo del talud. Foto 15.4.
- Construir diferentes ángulos de pendiente. Este método puede utilizarse cuando hay dos tipos diferentes de materiales, por ejemplo la capa de arriba es más consistente que la de abajo.
- Aterrazado o abancalamiento. Reduce la superficie de erosión, ya que controla la escorrentía superficial, por disminución de la velocidad de las aguas, lográndose una mayor retención de humedad por parte del suelo. Sin embargo, la construcción de terrazas presenta inconvenientes estéticos que pueden paliarse adoptan-

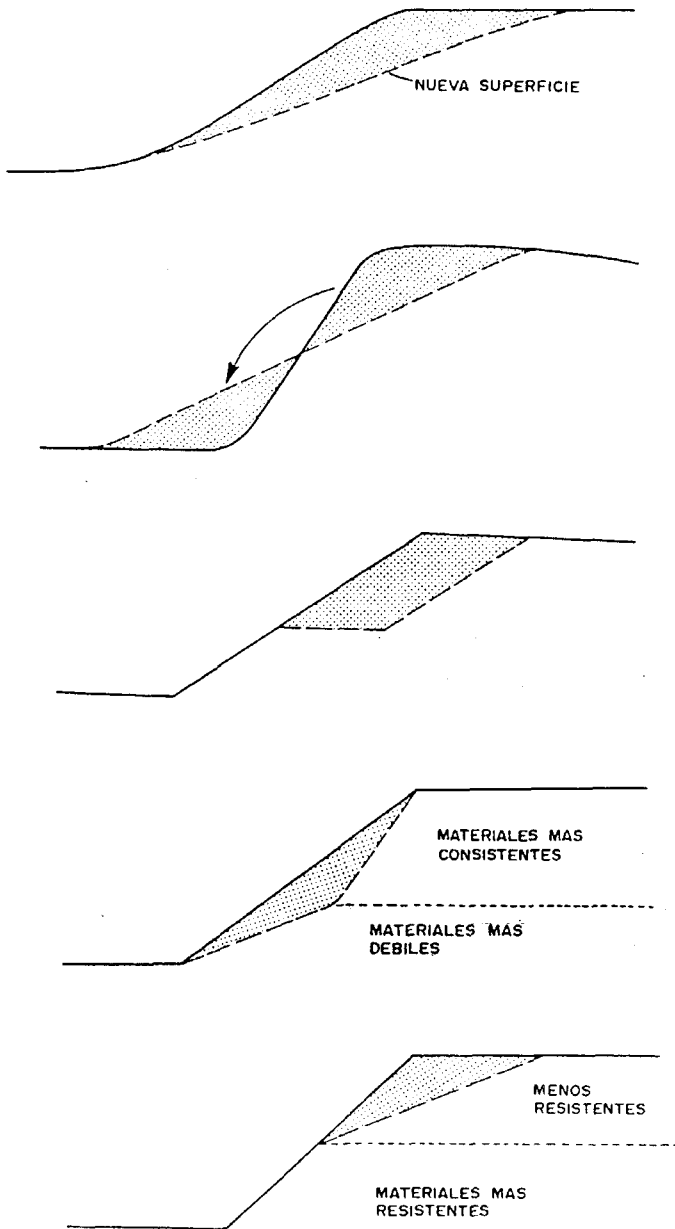


Figura 15.6. Algunos ejemplos de remodelación (adaptado de Hackett, 1972).

do un procedimiento mediante el cual la zanja o terraza, de reducidas dimensiones, se rellena con tierra vegetal. Dentro de la misma se procede a enterrar un haz de varillas, de forma que sobresalgan los ápices terminales. En la Fig. 15.7 pueden verse tres técnicas de aterrazado basadas en el procedimiento anteriormente descrito. El haz de varillas puede fijarse al talud mediante una estaquilla, que contribuye también a retener la tierra vegetal de relleno.

En el caso de taludes y bermas en roca compacta, el modelado se reduce al arranque parcial del material, con medios mecánicos o con perforación y voladura, tal como se ha indicado anteriormente en el Capítulo 12. Los fragmentos de roca arrancados de los frentes se suelen dejar sobre las bermas, pasando a constituir el sustrato sobre el que se realizan las labores posteriores de implantación directa de la vegetación o extendido de los suelos fértiles.

En ocasiones, sobre las bermas se efectúan voladuras puntuales con el objetivo doble de abrir los hoyos necesarios para la plantación y aumentar la fracturación de las rocas para facilitar el desarrollo radicular de las especies vegetales.

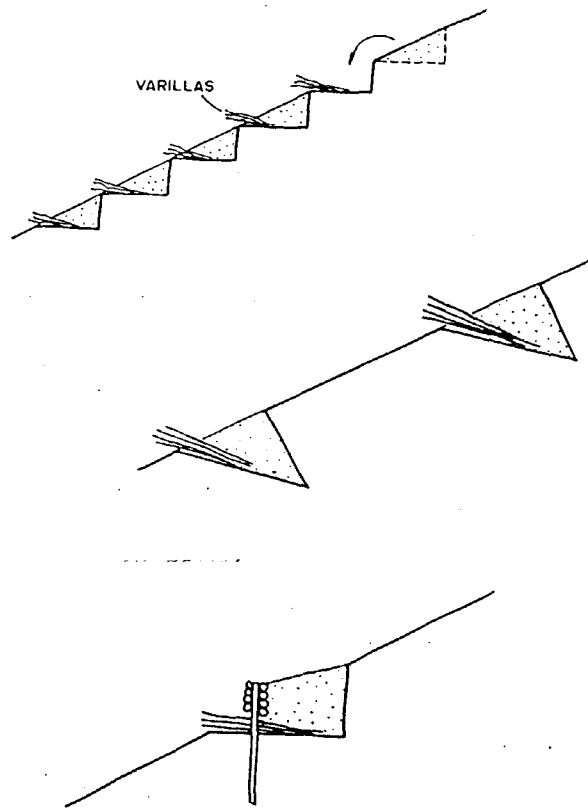


Figura 15.7. Técnicas de aterrazado (Hackett, 1972).

5.2.2. ESTABILIZACION DE TALUDES. DRENAJES

Los deslizamientos y la inestabilidad general de un talud tienen lugar por un aumento en el contenido de agua en los materiales cohesivos del suelo, que producen un debilitamiento y un mayor esfuerzo cortante.

Las propiedades resistentes de los materiales pueden ser mejoradas mediante una reducción de su contenido en humedad.

Estas mejoras se pueden llevar a cabo de dos formas:

- Eliminación o extracción del agua del interior del talud.
- Interceptación del agua superficial antes de que llegue al talud.

A. Extracción del agua del interior del talud

A1. Pinchado o drenaje del talud.

Para evitar los problemas que pudiera producir el agua infiltrada, se necesita en muchos casos adoptar sistemas de drenaje profundo que se encarguen de recoger la mayor cantidad posible del agua que no escurre superficialmente. El método consiste en «pinchar» el talud con una tubería porosa que puede ser de distintos materiales: fibrocemento poroso, de plástico con taladros, etc.

Es conveniente complementar estos sistemas con la construcción de unas bajantes superficiales que conduzcan el agua drenada hasta el desagüe principal.

A2. Contrafuertes de drenaje

Son extensivamente usados como remedio contra los deslizamientos producidos por un exceso de humedad. Sirven además como colectores del agua infiltrada o superficial.

Su gran peso distribuido arriba y abajo del talud y normal a las líneas de nivel reduce la posibilidad de deslizamientos rotacionales, siendo especialmente recomendados para los taludes más inestables. Además de la función de drenaje que realizan, su construcción en masa da soporte físico al conjunto, Fig. 15.8.

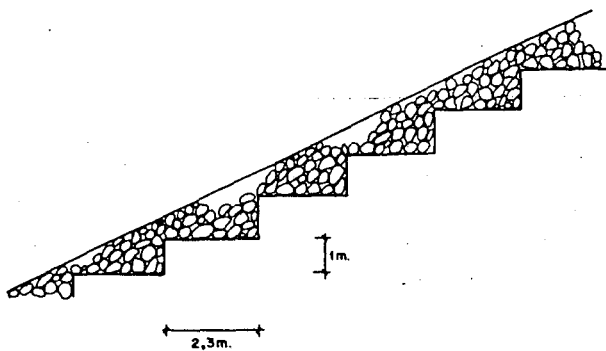


Figura 15.8. Contrafuertes de drenaje (Hackett, 1972).

El surco o zanja está escalonado y corre en ángulo recto respecto a la longitud del talud, extendiéndose más allá del plano de deslizamiento (ver Fig. 15.8). Para el caso de taludes 1:2,5 los escalones o bancos podrían ser de 2,3 m y la altura de cada uno de ellos de 1 m.

B. Interceptación del agua superficial para que no invada el talud

Esto no sólo reduce la acumulación de agua en el interior del talud, sino que también reduce el peligro de erosión causado por el discurrir del agua pendiente abajo de la superficie del talud.

B1. Instalación de canales o cunetas de guarda en la parte superior del talud

Recogen y desvían el agua de escorrentía e impiden que discurra por el talud.

La cuneta o canal de desagüe deberá diseñarse con un gradiente adecuado y una sección transversal lo suficientemente grande como para transportar el agua de escorrentía a velocidades no erosivas.

La recogida de los caudales drenados, al igual que en el caso del «pinchado» del talud, se puede hacer por medio de bajantes superficiales o enterradas.

Las primeras, en forma de cascada pueden construirse con piezas prefabricadas de hormigón u otro tipo de materiales más rústicos como tejas, lajas de pizarra, etc., que conduzcan el agua hasta una cuneta o colector general.

En la zona inmediata a la cuneta y situada entre ésta y el talud, deberá crearse, cuando sea posible, una pequeña contrapendiente recubierta con plantas que eviten la erosión, Fig. 15.9.

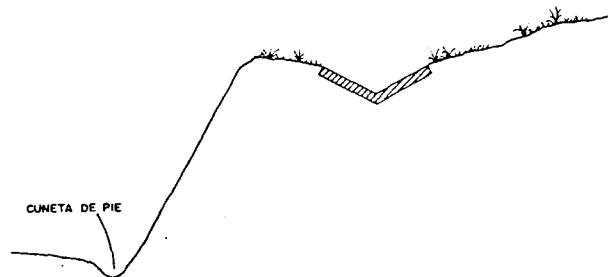


Figura 15.9. Cuneta de guarda en la cabeza de un talud.

Los problemas de erosión y excesiva sedimentación en el cauce de la zanja, pueden solucionarse reforzando el lecho y los laterales, bien sembrándolos con herbáceas o revistiéndolos de piedra y ladrillo para formar un desagüe convencional.

Si la cuneta resultase demasiado inclinada podrían construirse represas, o efectuar plantaciones con especies adecuadas que contribuyan a hacer más lento el flujo intermitente de las aguas de avenida (Orive, 1986).

Según las características de la ladera podría excavar más de una cuneta, Fig. 15.10. De esta manera la primera serviría no sólo de desagüe, sino además como freno de los materiales de aporte de la ladera.

B2. Drenajes auxiliares

Tienen como misión, recoger el exceso de agua superficial que pueda encontrarse en el talud. No disminuyen el contenido de humedad de los materiales del suelo.

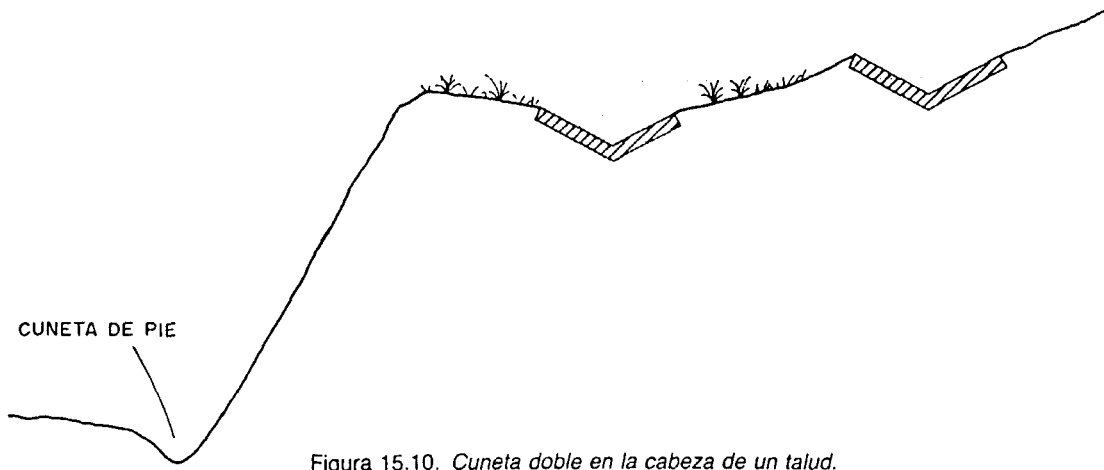


Figura 15.10. Cuneta doble en la cabeza de un talud.

Los diseños de estos sistemas varían según las necesidades.

- Drenaje uniforme. Se utiliza cuando las necesidades de drenaje son uniformes en todo el área.
- Drenaje irregular. Se emplea cuando porciones irregulares de una superficie requieren drenaje.

B3. Bajantes, bordillos y cunetas al pie de talud

Pueden complementar las medidas anteriores.

5.2.3. PROTECCION SUPERFICIAL

A. Estaquillado

Método de aplicación en taludes de inclinación pronunciada, destinado a estabilizar terrenos sueltos en lugares sometidos a una fuerte erosión hídrica. Por la acción de sujeción que ejerce, contribuye a un mejor establecimiento de la cubierta vegetal a implantar por hidrosiembra o plantación.

El método consiste en la colocación, en unos surcos previamente excavados en el suelo, de unos haces compuestos por varas de sauce o chopo, que se sujetan al terreno mediante unas estaquillas clavadas en el mismo.

La instalación del estaquillado se efectúa siempre en sentido ascendente, es decir comenzando en la base de la ladera y terminando en la parte superior. El procedimiento comienza introduciendo la estaquilla en el terreno, en dirección perpendicular a la pendiente; por encima de ella se abre un surco en donde se colocará el haz de varillas, que se fija al suelo mediante una estaquilla que lo atraviesa transversalmente. A continuación se cubre el haz con tierra, que habrá de compactarse adecuadamente.

Las varillas habrán de colocarse alternativamente de forma que la mitad de los ápices terminales figuren en cada uno de los extremos del haz. Este ha de prepararse como mucho dos días antes de su implantación en el talud, excepto si se mantiene en un lugar húmedo y templado donde podrá permanecer hasta siete días antes de su instalación definitiva en el terreno.

En la Fig. 15.11 puede observarse un diagrama esquemático del proceso de instalación del estaquillado, así

como una visión perspectiva de una sección de talud ya tratado.

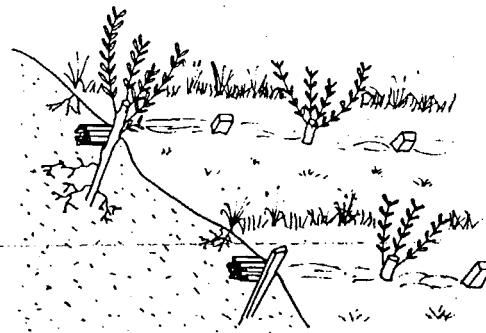
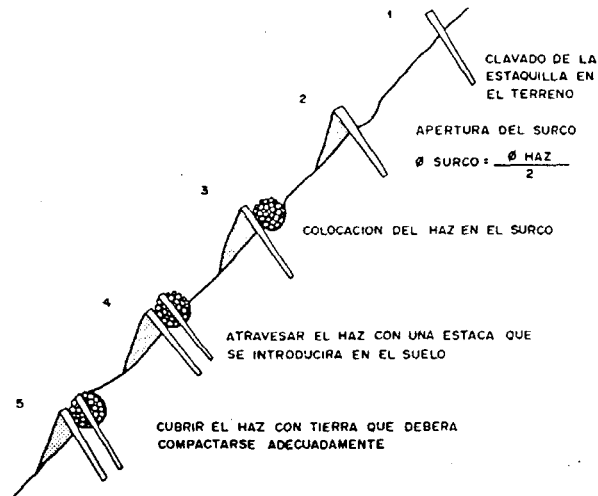


Figura 15.11. Técnicas de estaquillado.

B. Muros y muretes de contención

Se utilizan para reducir la altura efectiva y el grado de pendiente del talud.

Los posibles inconvenientes estéticos pueden paliarse mediante diseños adecuados: utilización de materiales autóctonos, relleno de los huecos existentes con tierra vegetal y plantación en ellos de herbáceas, ramillas de sauce, etc. Sin olvidarse de los drenajes adecuados.

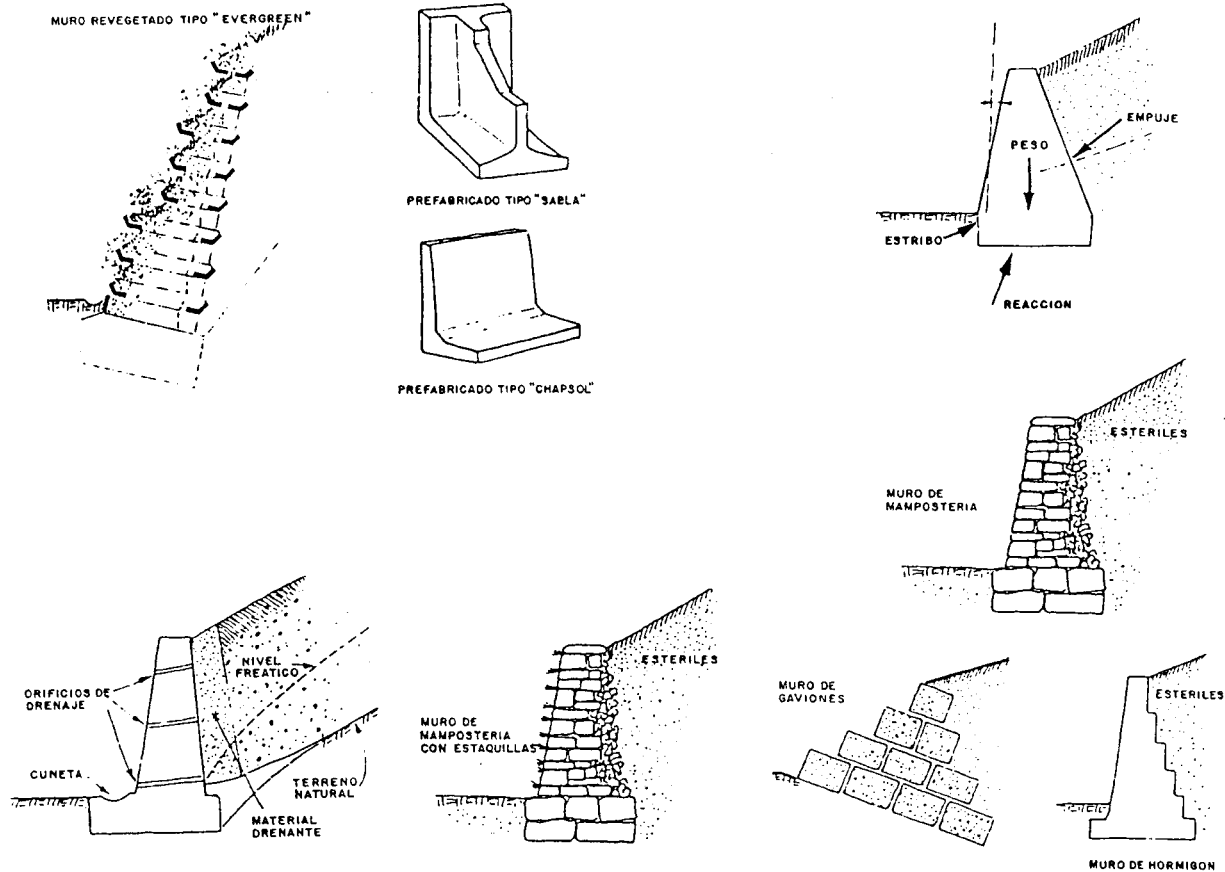


Figura 15.12. Detalle de muros de contención y diques de consolidación.

C. Diques de consolidación

Se suelen utilizar en las zonas donde el arrastre de partículas producido por el agua de escorrentía da lugar a regueros o cárcavas que poco a poco pueden producir importantes problemas de desestabilización o desprendimiento.

— Gaviones metálicos:

En los lugares de mayor dificultad donde la erosión es más pronunciada, se pueden colocar gaviones metálicos de mayor o menor consistencia y superficie. Hay que resaltar la gran capacidad de drenaje de los gaviones.

— Enrejado metálico galvanizado (mallas metálicas de protección):

Útiles en zonas en que los afloramientos rocosos ocupan una superficie amplia del talud con una pendiente superior a 45°. El efecto estético negativo que provoca la malla deberá ser mitigado, siempre que sea posible, mediante hidrosiembra y plantaciones en pie de taludes, bermas, etc.

— Entramado de mimbre y matorral:

Este método de estabilización consiste en el uso de entramados de mimbres y matorral sobre los que se deposita una capa de tierra vegetal, recubriéndose el conjunto con una malla de alambre. Se necesita mano de obra especializada.

— Bloques huecos de hormigón:

Implica el uso de unos bloques prefabricados que, una vez depositados sobre el talud, se rellenan con tierra para ser posteriormente sembrados o plantados. Es una medida muy cara, limitada a pendientes muy fuertes y para lugares cercanos a centros urbanos. En la Fig. 15.13 se pueden observar algunos diseños.



Foto 15.5. Colocación de un entramado de mimbre prefabricado.

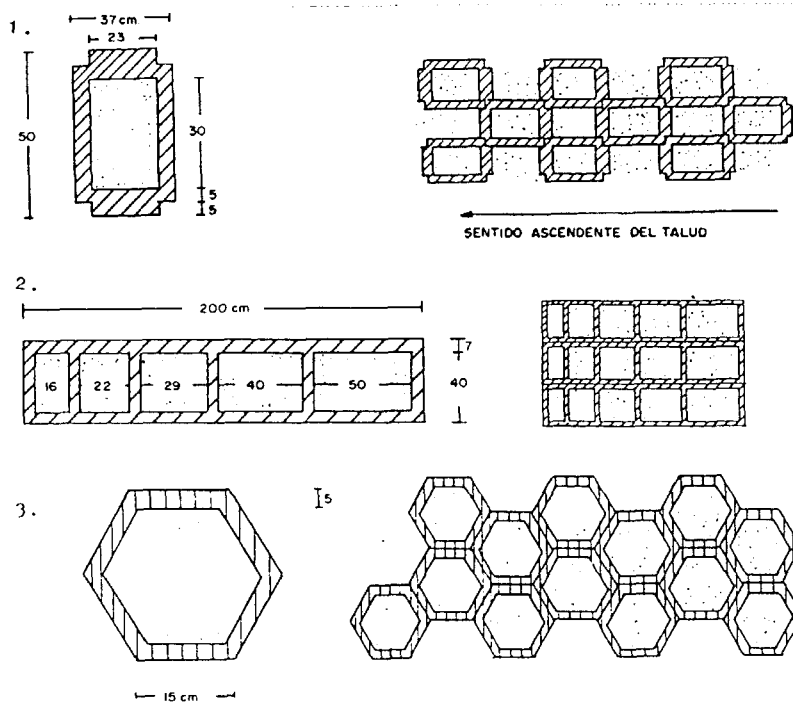


Figura 15.13. Diseños de bloques huecos de hormigón. (Hackett, 1972).

6. ESQUEMA SOBRE LA PREPARACION DEL TERRENO EN DISTINTOS TIPOS DE EXPLOTACIONES MINERAS

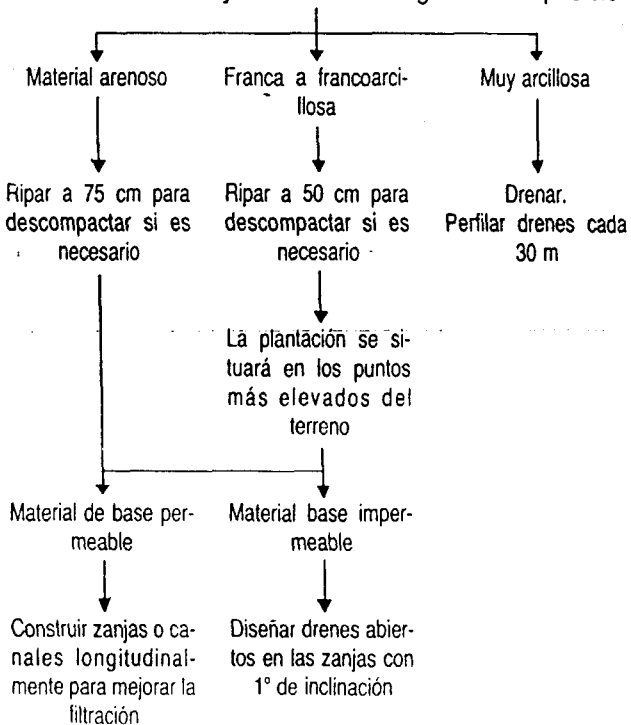
En las siguientes tablas se puede observar un resumen de las técnicas de preparación del terreno a recuperar, atendiendo al tipo de minería efectuada y a la textura del sustrato, según Wilson, 1985:

- Tabla 15.XIII. Refleja el tratamiento estándar en la preparación del terreno, diferenciando entre distintos tipos de pendiente y materiales. Aplicable, prácticamente, a todos los tipos de explotaciones: arcilla, caolín, graveras, arenos, carbón.
- Tabla 15.XIV. Refleja el tratamiento a seguir para el caso de las canteras de roca dura.
- Tabla 15.XV. Hace referencia a la preparación del suelo en aquellos tipos de minería que generen lagunas o encharcamientos.
- Tabla 15.XVI. Indica el tratamiento a llevar a cabo en las explotaciones de metales no ferrosos, haciendo una distinción entre los residuos tóxicos y no tóxicos que aquí se producen.

TABLA 15.XIII. TRATAMIENTO ESTANDAR

I. Taludes menores de 5°

Formar lomas o colinas (30 m × 1,5 m) con los residuos de las minas y añadir tierra vegetal si es posible.



II. Taludes de 6°-10°

Estos lugares tienen suficiente pendiente para permitir el movimiento del agua, no hay necesidad de construir lomas.

- Reparar o subsolar cuesta abajo a 75 cm de profundidad en suelos arenosos y francos, a 50 cm en suelos francoarcillosos y arcillosos.
- A continuación debería disponerse un sistema de drenes abiertos con 1° ó 2° de pendiente a 8 cm de profundidad y distanciados 20 m para taludes de 6° y 30 m para los de 10°.

III. Taludes entre 10° y 20°

- En estos sitios deberán hacerse bermas cada 20 m para reducir el riesgo de erosión, con la anchura aproximada de un tractor, y ligeramente en pendiente hacia el interior de la ladera.
- Reparar o subsolar (reduce riesgo de erosión) a:
 - 75 cm en suelos arenosos y francos.
 - 50 cm en suelos francoarcillosos y arcillosos.

IV. Taludes por encima de 20°

Alto riesgo de erosión y difíciles de trabajar:

- Remodelar estos taludes donde sea posible con el fin de reducir la pendiente, incluyendo medidas estructurales si es que las necesitan.
- En suelos de arena gruesa, como las escombreras de caolín, se plantará directamente sin efectuar el modelado.
- El material necesario para cubrir el terreno procederá de los residuos y estériles de la mina, o de material de relleno importado.
- Para drenar la zona encharcada hay que proceder a la ruptura del muro de retención del agua embalsada, o bien destinar estas lagunas a la conservación de la naturaleza.
- Las nuevas lagunas deberían ser diseñadas de forma que permitieran la eliminación de las aguas embalsadas.

TABLA 15.XIV. CANTERAS DE ROCA DURA
(Rocas ígneas, granitos, areniscas, cuarcitas, calizas)

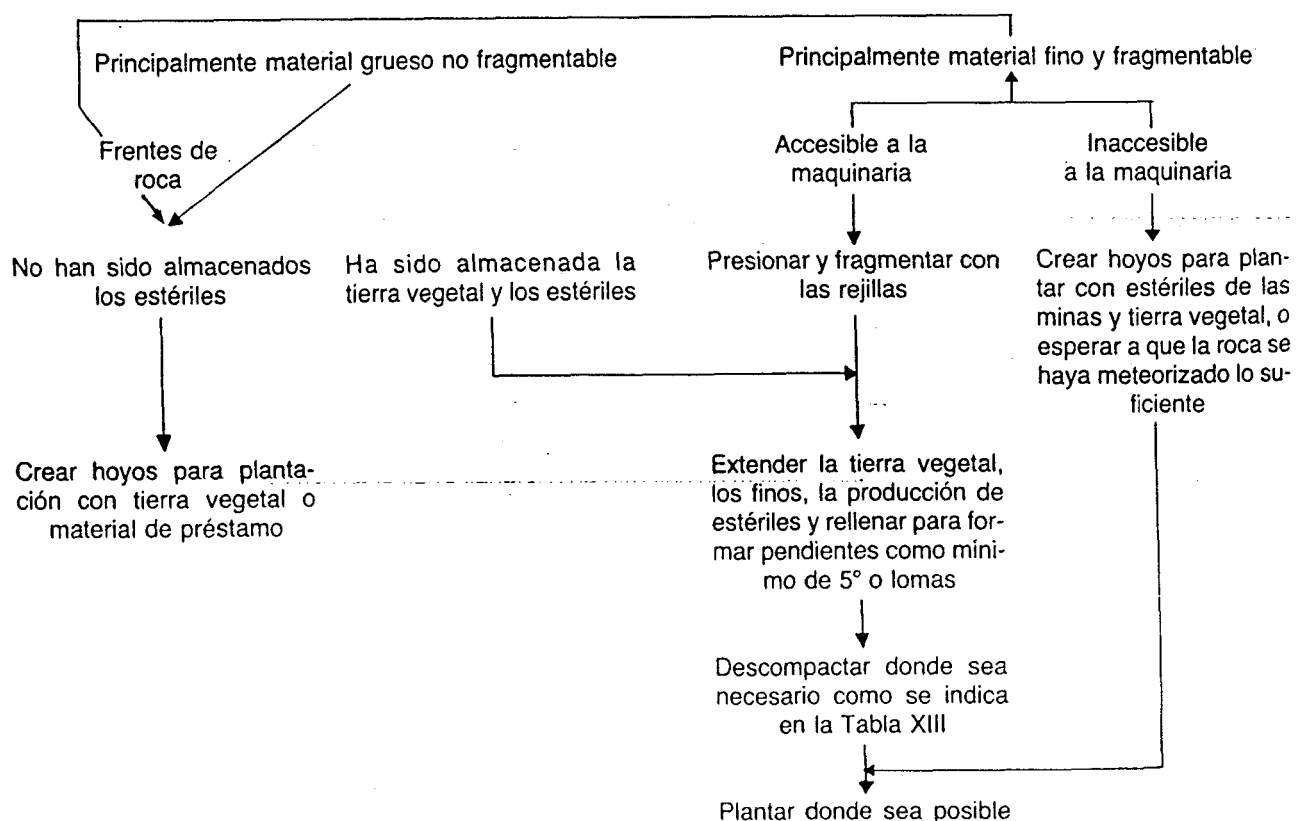


TABLA 15.XV. LAGUNAS Y BALSAS DE DECANTACION PROCEDENTES DE LOS LAVADEROS EXISTENTES EN ALGUNOS TIPOS DE EXPLOTACIONES MINERAS (Caolín, graveras, metales no ferrosos)

Condiciones para la restauración:

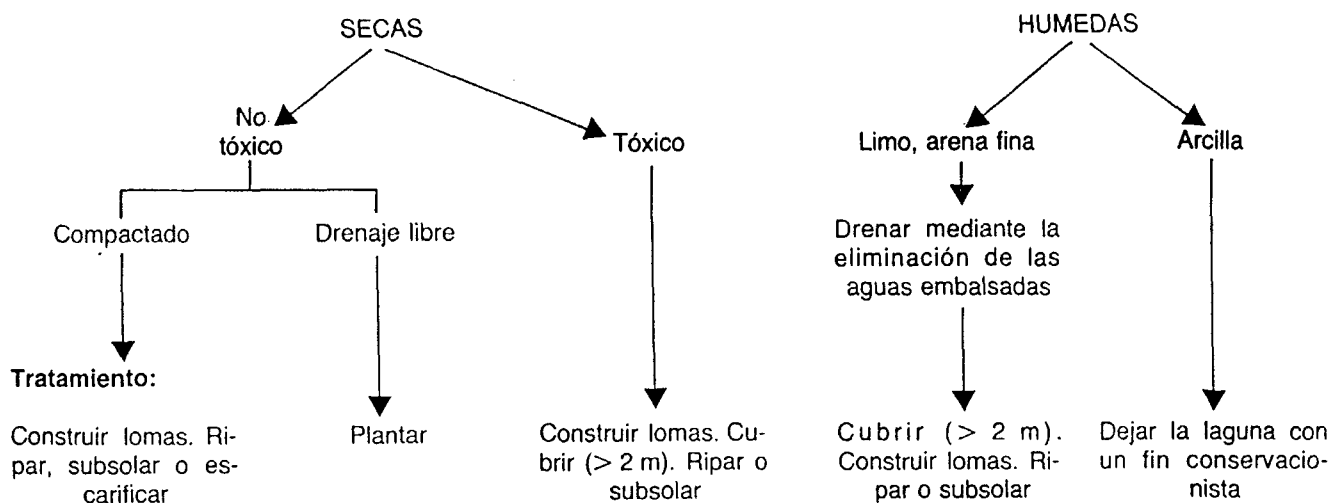
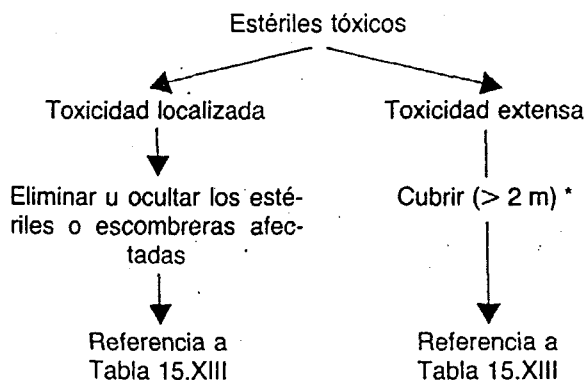


TABLA 15.XVI. METALES NO FERROSOS

- El tratamiento para los estériles no tóxicos es el mismo que el referido en la Tabla 15.XIII.
- El tratamiento para los estériles tóxicos (poco probable que los soporten la vegetación) es el siguiente:



* Si las pendientes son menores de 6° deberían formarse lomas o colinas antes de aplicar la cubierta.

El uso de la tierra vegetal o de otro tipo de material, por ejemplo procedente de estériles o residuos, es a menudo esencial, pero hay que tener en cuenta que algunos materiales tóxicos pueden ser tratados con una proporción de cal o de mineral de fosfato para reducir la solubilidad de los iones de metal pesado.

7. MAQUINARIA UTILIZADA EN LA PREPARACION DEL TERRENO

Hay que distinguir diferentes tipos de máquinas y accesorios a utilizar en la preparación del suelo, dependiendo

de la función que deberá realizar, de la naturaleza y características físicas del terreno, de los usos posteriores y del rendimiento que se obtenga.

Los ejemplos de maquinaria que figuran a continuación pretenden dar una idea sobre el tema, pero simplemente a título orientativo. Tabla 15.XVII.

- A. Maquinaria empleada en los movimientos del suelo, es decir en la carga y transporte de las diferentes capas de suelo, así como en su extendido. También se incluyen aquí la carga y transporte de materiales estériles generados en la explotación minera.

Carga:

- Pala cargadora:
 - De orugas (baja presión sobre el terreno, tracción alta, más cara que las de ruedas, menor capacidad de carga).
 - De ruedas (mayor presión sobre el terreno, son las más utilizadas).

Excavadoras:

- Hidráulicas.
- De cables.

Rotopalas.

Dragalinas.

Mototraillas:

- Remolcadas.
- Autopropulsadas.

Transporte:

- Volquetes, son los camiones extraviales. Cuanto mayor es el tamaño, menores son los costes de acarreo.
- Camiones convencionales.

TABLA 15.XVII. MAQUINARIA UTILIZADA EN LA PREPARACION DEL TERRENO

FUNCION A REALIZAR	TIPO DE MAQUINARIA
<p>A. Movimientos del suelo:</p> <p>Carga</p> <p>Transporte</p>	<ul style="list-style-type: none"> — Palas cargadoras: orugas, ruedas. — Excavadoras: hidráulicas y de cables. — Rotopalas. — Dragalinas. — Mototraillas: remolcadas, autopropulsadas. — Volquetes. — Camiones convencionales.
<p>B. Descompactación:</p> <p>Ripado</p> <p>Subsolado</p> <p>Escarificado</p> <p>Labores complementarias</p>	<ul style="list-style-type: none"> — Tractor de orugas: <ul style="list-style-type: none"> • Fragmenta a gran profundidad. • Voltea los horizontes. — Subsolador: <ul style="list-style-type: none"> • Ripados menos profundos. • No voltea horizontes, remueve el suelo. — Escarificador: tipo chisel, trabaja a menos profundidad que las anteriores. No hay volteo. — Arado de discos: sí hay volteo. — Gradas de púas. — Cultivadores. — Rastras. — Equipos de despedregado. — Gradas de discos, etc.

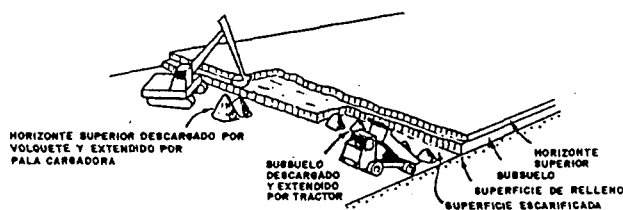


Figura 15.14. Manipulación de horizontes del suelo.

B. Maquinaria empleada en la descompactación del terreno.

La compactación que tiene lugar en los niveles superiores, causada por la excesiva presión que ejerce el paso de la maquinaria durante la actividad minera y durante los trabajos de recuperación, es tratada mediante el uso de un determinado tipo de máquinas en función de la profundidad a la que haya que descompactar los materiales y de la naturaleza del sustrato.

- **Tractor de ripado.** Es un tractor de orugas de determinada potencia, normalmente entre 300 y 400 HP, e incluso inferior. La herramienta de trabajo (riper) consta de 3 ó 5 brazos o rejonnes separados 1-1,2 m que profundizan aproximadamente 0,8 m en el suelo. Es

en estos brazos donde va la vertedera que provoca el volteo de los horizontes. Fig. 15.13.

Uso: Se utiliza en aquellos sustratos que están compactados a gran profundidad. Puede romper rocas duras y competentes. Este ripado profundo puede extraer materiales no deseables a la superficie y mezclarlos, por lo que no es adecuado cuando sean muy ácidos y/o alcalinos, o cuando la pendiente pueda producir el deslizamiento de masas inestables de tierras porque se saturan con el agua filtrada.

- **Subsolador o arado subsolador,** tirado por un tractor de orugas similar al anterior.

El subsolador también consta de brazos o rejonnes pero sin vertederas.

Uso: Trabaja a menos profundidad que el anterior; es adecuado en terrenos libres de piedras. Lo normal es que alcance 30-50 cm de profundidad. No extrae materiales ni mezcla horizontes en terrenos vírgenes. Debe evitarse el subsolado en capas arenosas o permeables en las que el nivel freático puede descender rápidamente en épocas de sequía.

- **Escarificador o arado escarificador tipo chisel:**

Uso: Es más ligero y trabaja a menos profundidad que los subsoladores. No mezclan los materiales superficiales, solo los remueven. Puede llegar a 30 cm de profundidad.

Muy utilizado en los trabajos de revegetación de superficies alteradas por las actividades mineras.

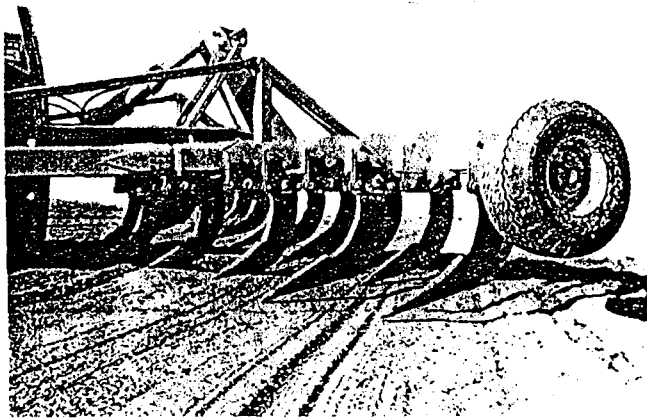


Foto 15.6. Subsolador.

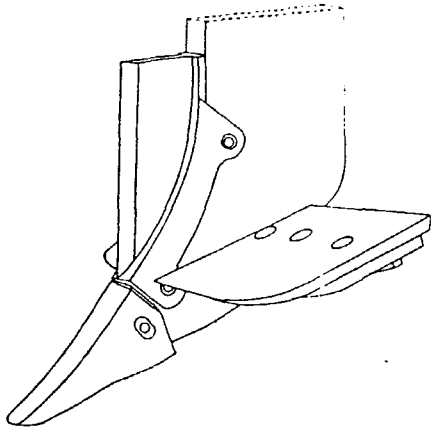


Figura 15.15. Brazo de ripado con vertedera.

— Arado de disco:

Uso: Rompe la costra superficial y también se utiliza para incorporar la caliza y mezclar un estabilizador de la cubierta vegetal en el suelo.

El terreno preparado por este tipo de máquinas es más sensible a la erosión que el preparado con el anterior.

Se emplea fundamentalmente en terrenos secos y duros, pesados, con gran contenido de piedras y raíces.

Produce volteo en el suelo.

Hay otro tipo de equipos que se utilizan en labores complementarias y auxiliares como son: romper terrones, alisar el suelo, cerrar bolsas de aire, etc. Estas unidades son:

- Gradas de puas.
- Cultivadores.
- Gradas de discos.
- Rastras, etc.

C. Maquinaria empleada en el despedregado del terreno:

La pedregosidad, referida a la proporción relativa de piedras gruesas (el límite puede fijarse en unos 25 cm de diámetro) que se encuentran dentro o en la superficie del suelo, tiene una gran influencia en el uso del suelo, puesto que puede suponer un impedimento en el desarrollo normal de las actuaciones a realizar en el mismo.

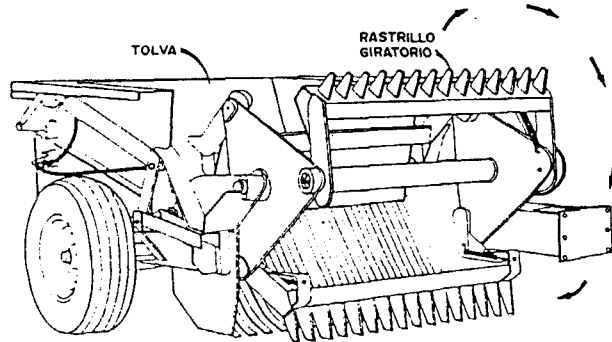
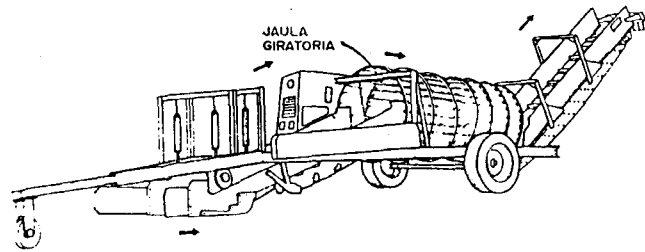


Figura 15.16. Equipos para el despedregado.

En líneas generales, afecta al establecimiento de la cubierta vegetal, impide una filtración adecuada del agua y también dificulta el paso de la maquinaria necesaria para llevar a cabo los trabajos de preparación del terreno.

A este respecto, existe un tipo de maquinaria específica para el despedregado de los terrenos, Fig. 15.16. Su uso resulta adecuado en superficies secas, llanas o con ligera inclinación donde las piedras están en la superficie o a escasa profundidad.

BIBLIOGRAFIA

- BRADSHAW, A. D.: «Ecological principles and land reclamation practice». Landscape Planning, 1984.
- BRADSHAW, A. D. and CHADWICK, M. J.: «The restoration of land». Blackwell, Oxford, 1980.
- COPPIN, N. J. and BRADSHAW, A. D.: «Quarry reclamation». Mining Journal Books. Mineral Industry Research Organisation, London, 1982.
- E.P.M.: «Programa nacional de estudios geoambientales aplicados a la minería. Provincia de León». Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 1988.
- FERNANDEZ GOLFÍN, J. J.: «Fases elementales de trabajo en las actividades extractivas a cielo abierto», 1978.
- HACKETT, B.: «Landscape development of steep slopes». Oriol Press Ltd, Newcastle Upon Tyne, England, 1972.
- IGLESIAS, E.: «Recuperación de zonas alteradas». In: Curso sobre la práctica de las estimaciones de impactos ambientales. Cátedra de Planificación y Proyectos. ETSI de Montes, Madrid, 1987.
- LYLE, J. R.: «Surface mine reclamation manual». Elsevier, 1987.
- NAVARRO, M.: «Técnicas de forestación». Monografías 9. ICONA. Ministerio de Agricultura, Madrid, 1975.
- ORIVE, L. y PINEDO, A.: «Medidas estructurales para la estabilización de taludes». In: Curso monográfico sobre restauración del paisaje. Fundación Conde del Valle de Salazar, ETSI de Montes, Madrid, 1986.
- VOGEL, G. W.: «A manual for training reclamation». Inspectors in the Fundamentals of Soils and Revegetation, 1987.
- WILLIAMSON, N. A.; JOHNSON, M. S. and BRADSHAW, A. D.: «Mine wastes reclamation». Mining Journal Books. Mineral Industry Research Organisation. London, 1982.
- WILSON, K.: «A guide to the reclamation of mineral workings for forestry». Forestry Commission Research and Development Paper, 141. Forestry Commission, Edinburgh, 1985.

SELECCION DE ESPECIES VEGETALES

1. INTRODUCCION

La mayoría de las publicaciones que tratan sobre la recuperación de los terrenos o zonas degradadas dedican un capítulo, al menos, a la selección de plantas o especies vegetales, y en casi todas están situados por el final, como en este, una vez que se conoce la actuación minera, las alteraciones ambientales que pueden producirse y las posibilidades de recuperación y objetivos fijados para esa recuperación.

Se considera un capítulo obligado y se presupone que en la buena selección de las especies vegetales está la clave del éxito de la restauración. Es el momento de apuntar que no siempre en las especies vegetales está dicha clave, como queda claro en la lectura de este manual; incluso si toda la integración ecológico-paisajística se centrara en las plantas su importancia real dentro del conjunto de tareas básicas, más o menos secuenciales en el espacio y en el tiempo, se circunscribiría a una selección «sensata» de especies y el resto del éxito, a la preparación del terreno, a los métodos de implantación, etc. En definitiva cabe decir que la selección de especies vegetales es importante en la medida que éstas son relevantes y entran a formar parte de los medios necesarios para alcanzar los objetivos de restauración del proyecto en cuestión.

El propósito de conocer qué uso o usos se quieren desarrollar en una zona actualmente ocupada por una explotación minera resulta básico para desarrollar un esquema de trabajo que permita plantear la selección de especies vegetales, Fig. 16.1. El cambio de uso para la zona alterada se debe plantear a su vez bajo unos criterios particulares de restauración directamente relacionados con la explotación, Fig. 16.2. Cabe entonces hacerse las siguientes cuestiones:

- ¿Se va a recuperar la zona en cuestión de forma simultánea a la explotación o, por el contrario, se va a llevar a cabo una vez finalizada ésta?
- ¿Se van a plantear remodelaciones de la zona alterada con el fin de adecuarla al nuevo uso?, y por tanto,

- ¿Se facilitará y preparará el medio para el desarrollo de la vegetación?, o
- ¿El uso planteado se deberá adaptar a la situación final de la explotación sin más?

Según esta casuística parcial planteada la selección de especies toma unos derroteros u otros, y hay que pensar en especies duras (frugales) y resistentes a las características ambientales, que se presentan en la explotación, o dirigir la mirada hacia otras especies menos exigentes.

Esta decisión permite establecer en el tiempo y a «grosso modo» la evolución de la restauración de la explotación.

Lo normal, según la extensión de los terrenos degradados, es que se presente la casuística expuesta, y se puedan comenzar labores de restauración inmediatamente después de iniciar la explotación, se pueden también realizar labores temporales de aclimatación y adaptación de especies en áreas adyacentes que no estorben al proceso extractivo, incluso pueden establecerse, con carácter temporal, labores de adecuación con fines paisajísticos, para disminuir la intensidad de ruidos, etc., que a su vez no estén directamente relacionados con los usos finales propuestos, aunque sí se ajusten a los objetivos de la recuperación y se puedan integrar finalmente en la restauración global.

El éxito de la restauración depende, pues, en gran medida de la elección de las especies, de los métodos de establecimiento y de la consideración de tres grupos de factores que se relacionan directamente con dicha elección, unos de carácter general, los relacionados con la naturaleza de las zonas mineras a restaurar, los aspectos macroclimáticos y el destino del uso futuro (Tabla 16.I); otros son los factores locales que se corresponden con los aspectos relativos a las enfermedades, las plagas, la respuesta a las alteraciones de sequía, etc. (Tabla 16.II), y un tercer grupo relacionado con las exigencias de las propias plantas (Tabla 16.III); en relación con esto se puede «manipular» el medio en un cierto grado para adecuarlo a las necesidades de las especies vegetales que se van a utilizar.

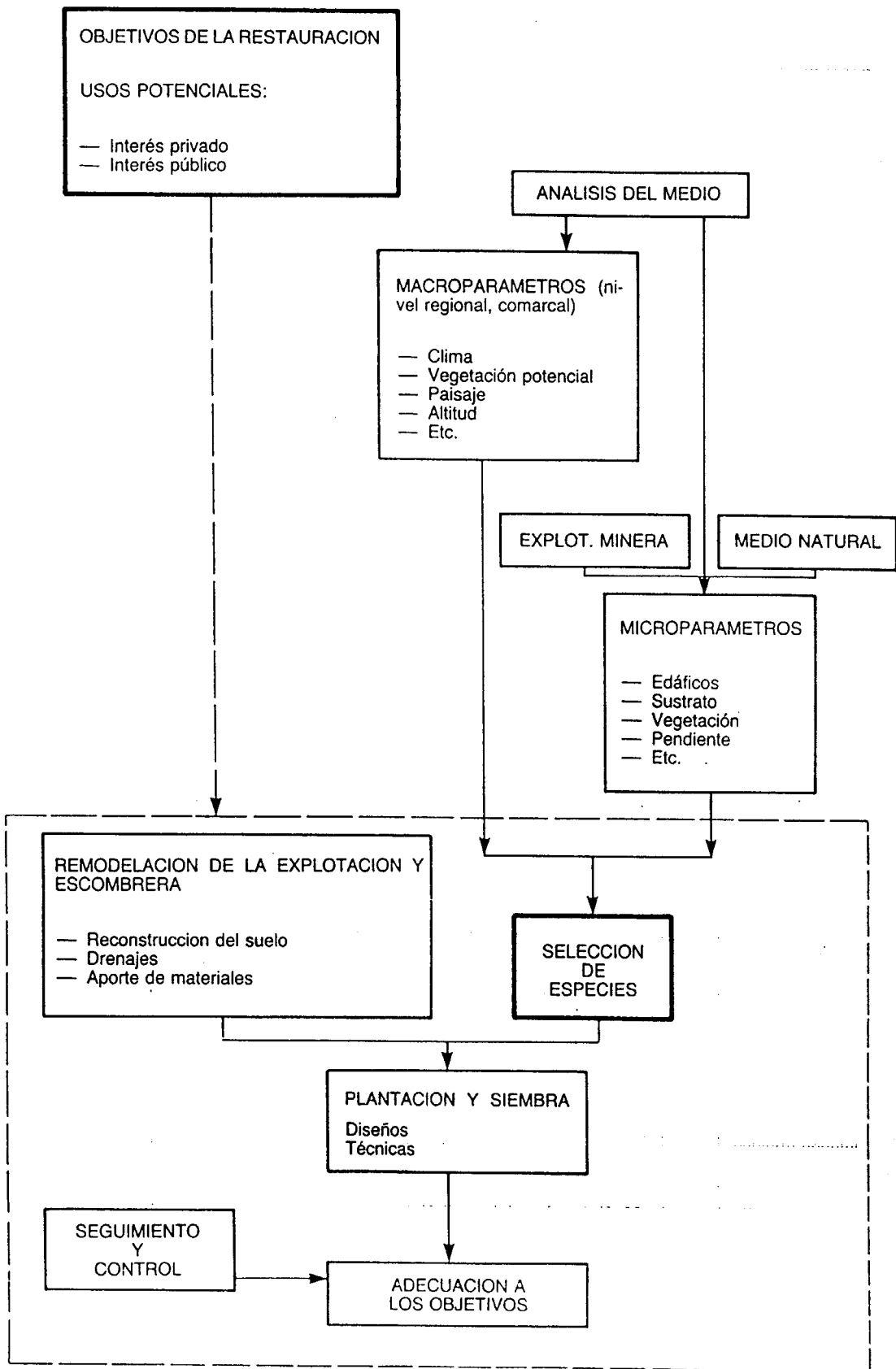
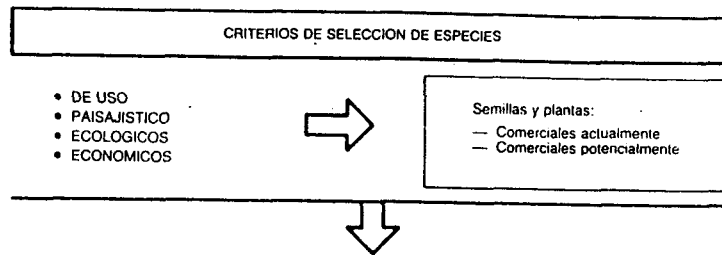


Figura 16.1. La selección de especies y la restauración del medio.



Utilización de las especies vegetales con criterios de diseño espacial en relación con los principios y fundamentos fisiológicos y ecológicos de las plantas.

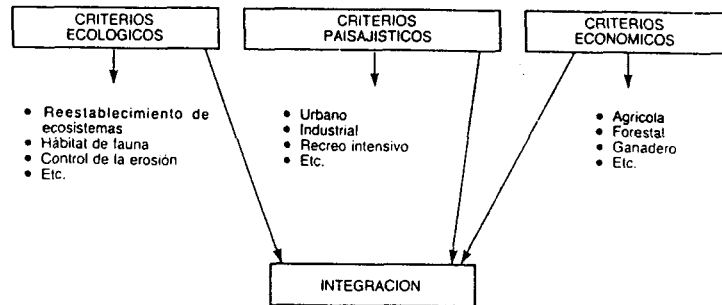


Figura 16.2. Criterios de restauración en relación con la selección de especies.

TABLA 16.I. CONSIDERACIONES GENERALES PARA LA SELECCION DE ESPECIES

FACTOR	CRITERIO DE SELECCION	FACTOR	CRITERIO DE SELECCION
NATURALEZA DEL SUBSTRATO			
Altas concentraciones de metales tóxicos.	Selección de spp. tolerantes a los metales. Utilización y fomento de las spp. que invaden de forma natural las escombreras.	Zonas áridas y semiáridas.	Especies nativas o naturalizadas. Transplantes y repiques de especies de bajo crecimiento.
Metales tóxicos transportados por la vegetación herbácea.	Especies no palatables, sin interés pascícola. Colocación de plantas espinosas alrededor de la escombrera para impedir el paso a los animales.	Temperatura.	Especies comerciales agrícolas forestales u otras. Especular según el uso futuro.
Extrema alcalinidad o acidez.	Especies invasoras selectivas de tales condiciones.	USO POTENCIAL	
Alto contenido en sales.	Especies tolerantes a las sales. Especies invasoras selectivas de tales condiciones.	Establecimiento rápido de cubierta vegetal.	Especies agrícolas.
Condiciones de sequedad.	Especies tolerantes a la sequía. Cultivos tolerantes a la sequía.	Fauna.	Buscar una alta variedad de especies naturales productoras de frutos, semillas, especies con interés pascícola, susceptibles de albergar especies animales cuando crían.
Bajo contenido en nutrientes.	Uso de leguminosas u otras especies fijadoras de nitrógeno. Especies que crecen en áreas pobres en nutrientes.	Usos tradicionales.	Especies naturales. Cultivos de alimentos y producción de madera. Especies adaptadas a la existencia de fuegos. Especies adaptadas a las prácticas forestales. Especies exóticas adaptadas a la zona. Baja productividad. Calidad paisajística.
CLIMA		Usos recreativos.	
Período de crecimiento de las plantas y bajo unas grandes deficiencias de agua.	Especies naturales o naturalizadas. Especies que crecen y se desarrollan rápidamente: alto crecimiento y producción de biomasa.		

TABLA 16.II. CONSIDERACIONES PARTICULARES DE CARACTER LOCAL PARA LA SELECCION DE ESPECIES

<ul style="list-style-type: none"> ● Resistencia al ataque de insectos (plagas). ● Resistencia a las enfermedades provocadas por hongos. ● Integración en el paisaje local y circundante. ● Poder de adaptación a los cambios y variaciones ambientales que se presenten en el medio. ● Producción alta de propágulos de distinto origen (semillas, rizomas, estolones, etc.). 	<ul style="list-style-type: none"> ● Resistencia a la competición interespecífica que permitan la ubicuidad de las especies en diferentes composiciones y mezclas. ● Disponibilidad en el mercado o facilidad de recolección o producción en vivero fácil. ● Resistencia al manejo y producción en vivero. ● Adaptación a los objetivos y susceptibilidad de adaptarse a los usos previstos.
---	--

TABLA 16.III. RECOMENDACIONES PARA FACILITAR LA RECUPERACION VEGETAL EN LAS EXPLOTACIONES MINERAS TENIENDO EN CUENTA LAS EXIGENCIAS DE LAS PLANTAS

EXIGENCIAS	CONDICIONES DEL MEDIO A MANTENER	PUNTOS DE VIGILANCIA Y CONTROL	RECOMENDACIONES
Penetrar ↙ LAS RAICES DEBEN PODER ↘ Respirar	<ul style="list-style-type: none"> ● Físicos. ● Ausencia de obstáculos. ● Hídricos. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Substratos pedregosos y compactados. ● Encharcamiento o ausencia de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Descompactación de suelo (ripado, subsolado, etc.). ● Evitar la circulación de vehículos pesados para que no compacten los suelos. ● Efectuar un estudio hidrogeológico. ● Realizar obras de drenaje. ● Disponer las plataformas y fondos de explotación con una pequeña pendiente.
	<ul style="list-style-type: none"> ● Suelos porosos 	<ul style="list-style-type: none"> ● Evitar la compactación superficial. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Prohibir la circulación de vehículos con neumáticos. ● Trabajar en tiempo seco.
Captar agua ↙ EL VEGETAL DEBE PODER ↘ Captar elementos nutrientes	<ul style="list-style-type: none"> ● Presencia moderada de agua (es el vehículo de los elementos nutritivos). 	<ul style="list-style-type: none"> ● Profundidad suficiente de la capa del sustrato para el desarrollo de las raíces. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Examen de los suelos in-situ antes del inicio de la explotación. ● Determinar la profundidad en la que viven las raíces de las plantas si es posible durante la apertura de las minas, utilizando los procedimientos clásicos de la edafología.
	<ul style="list-style-type: none"> ● Fertilidad del suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Preservar la fertilidad de los suelos y evitar la pérdida de ésta. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Examen de los suelos in-situ antes del inicio de la explotación. ● Conservar los horizontes ricos en materia orgánica. ● Apilar cuidadosamente la tierra vegetal y el sustrato aceptable manteniendo una altura reducida; si es preciso resembrarlo. ● Reducir el tiempo de almacenamiento de la tierra vegetal. ● Aportar materia orgánica y otros elementos químicos (abonos inorgánicos).

El planteamiento de partida para la selección de especies se estructura en 3 etapas. La primera corresponde a la definición del uso o los usos propuestos para el área afectada por la explotación minera susceptible de recuperarse; la segunda conjuga la búsqueda de información bibliográfica sobre las comunidades vegetales regionales y locales, la propuesta de una cierta investigación que se pueda plantear con los medios que se dispone en cada caso u otros para los que se dispongan fondos especiales, y la experiencia de la persona o del equipo responsable que desarrolle el proyecto de restauración. La tercera de las etapas corresponde a la recopilación de datos y el análisis de las características de la zona, tanto a nivel general (clima, litología, etc.), como a nivel particular (red de drenaje superficial, microexposición, textura de los materiales que constituyen el sustrato, etc.) (Fig. 16.3).

punto más controvertido es el concepto de *sucesión vegetal*. Así, las distintas teorías existentes sobre la sucesión han propiciado las posturas extremas, que van desde considerar a los estudios de ésta como la panacea para la selección de especies (por estimar que es un proceso simple, convergente y determinista), hasta negar por completo su interés al considerarlo un proceso complejo, divergente e imprevisible.

Parece aconsejable, por tanto, antes de hablar de las posibles aplicaciones a la selección de especies del estudio de las comunidades vegetales y su dinámica, aclarar y puntualizar las bases sobre las que se asienta este estudio, es decir, precisar en lo posible el concepto de sucesión.

La sucesión vegetal se entiende, en general, como las secuencias naturales por las cuales un individuo o comu-

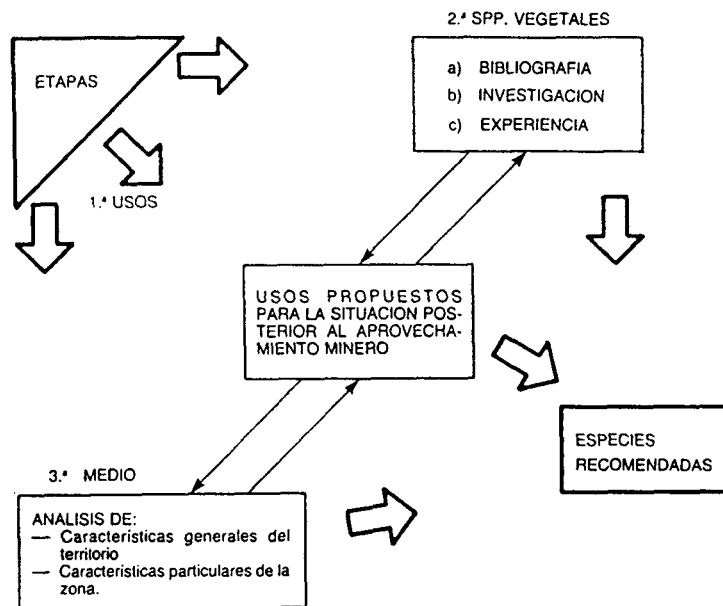


Figura 16.3. Planteamiento general de la selección de especies.

2. DINAMICA DE LA VEGETACION Y SELECCION DE ESPECIES

2.1. Selección vegetal

2.1.1. INTRODUCCION

La práctica de la selección de especies se fundamenta en el conocimiento que se tiene de la dinámica de la vegetación.

Para la acertada comprensión de una comunidad vegetal, resultaría de gran utilidad el poder determinar la forma y el ritmo de cambio de su componente vegetal, tanto en el caso de alteraciones naturales como cuando son debidas al hombre: permitirá, por ejemplo, formarse una idea de los factores implicados en el funcionamiento del ecosistema, de su reversibilidad, estabilidad, etc.

Más valioso aún resultará el poder predecir con estos datos la dinámica que se desarrolla en un terreno con la implantación de distintas especies y sus efectos sobre el medio.

La viabilidad o posibilidad de tales determinaciones ha sido, y es aún, una cuestión muy debatida, cuya base y

nidad de individuos reemplaza a otra en un hábitat con el paso del tiempo, o el proceso mediante el cual tiene lugar esta sustitución. La sucesión así definida, sin más implicaciones que la evolución en el tiempo o aspecto dinámico de la vegetación, es un fenómeno cuya existencia parece ampliamente constatada y admitida. Son innumerables, sin embargo, las teorías que se han esgrimido sobre la naturaleza de estos cambios, su dirección, sus causas, efectos y ámbito de aplicación.

Para este tema las preguntas clave son: ¿este cambio está organizado de tal manera que constituye una secuencia predecible de etapas en la sucesión? y, ¿esta secuencia conduce a un estado final estable o clímax, en el sentido más amplio de este término? Para Whittaker (1974) es posible sintetizar la mayor parte de las respuestas que se han esgrimido a estas cuestiones en tres teorías que interpretan de distinta forma el concepto de clímax, y que se resumen a continuación. Las referencias citadas pueden encontrarse en Whittaker (1974):

Teoría del «monoclimax». Promovida principalmente por Clements (1916, 1928, 1936). En ella se establece que todas las sucesiones que se presentan en las distintas co-

comunidades de un área convergen hacia una única comunidad estable y madura o clímax, cuyas características están determinadas exclusivamente por el clima. El proceso de sucesión y la modificación del medio llevada a cabo por las comunidades implicadas en él permite, según Clements, establecer una correspondencia directa entre las comunidades clímax y las regiones climáticas. Las comunidades clímax pueden reconocerse a dos niveles: formaciones o biomas definidas por la estructura y fisionomía de la comunidad y características de grandes áreas geográficas; y, dentro de ellas, «asociaciones» definidas por géneros o especies dominantes, características de áreas más pequeñas.

La presencia de otras comunidades estables dentro de áreas distintas a la comunidad clímax es reconocida e interpretada por los defensores de esta teoría como «proclímax». La necesidad de encajar en el ideal simplificado, un único clímax, es lo que obliga, según Whittaker, a la definición de un gran número de tipos de proclímax. Dentro de éstos merecen mención por su amplia utilización los conceptos de:

- Preclímax y postclímax, que pueden presentarse respectivamente en los hábitat menos o más favorables de un área (por ejemplo, zonas más secas o más húmedas en una plataforma).
- Subclímax, que corresponde a la estabilización de la comunidad vegetal en una etapa anterior a la clímax (cuando una zona se prepara para un uso y no se quiere que evolucione para continuar con él).
- Disclímax, cuya diferencia de la clímax climática se debe a alteraciones producidas por el hombre o los animales.

Teoría del «poli-clímax» a la que se ajustarían las ideas de Tansley (1935, 1939, 1941), quien argumenta que las sucesiones no conducen a un clímax único sino a un mosaico de comunidades clímax determinadas por el mosaico de hábitat existentes. Existen varios factores que pueden resultar determinantes en el establecimiento de las características de la clímax; por ejemplo, las diferencias establecidas por las distintas situaciones topográficas o por las distintas litologías pueden seguir siendo significativas a pesar de la sucesión.

Además de admitir la existencia de estados subclimáticos, Tansley reconoce «plagioclímax», o estados estables equivalentes a los disclímax antes definidos, que pueden alcanzarse tras una alteración siguiendo una serie de estados diferentes a los de la serie natural.

La escuela fitosociológica de Braun-Blanquet y otros ha hecho valer el concepto de «paraclímax» o clímax edáficos para un amplio número de comunidades cuyas características están determinadas por el factor suelo, y no exclusivamente por el climático.

Asociados a algunos de los conceptos apuntados aparecen frecuentemente los siguientes términos:

- Sucesión o serie primaria, utilizada para nombrar la sucesión que comprende el desarrollo de los tipos de vegetación desde la denudación hasta la estabilización cuando ésta ha seguido un proceso natural de evolución, es decir, sin que exista ningún agente que altere su desarrollo. Por ejemplo, es la que tiene lugar en los frentes de los taludes de una cantera.

TABLA 16.IV. FASES EN LOS PROCESOS DE SUCESION PRIMARIA (Clements, 1916)

FASES	CONSECUENCIA
1. ALTERACION	Establecimiento de un área sin vegetación.
2. MIGRACION	Introducción de una spp. en nuevos hábitat.
3. ESTABLECIMIENTO (ECESIS)	Adaptación de las plantas a su nuevo medio (germinación, crecimiento, reproducción).
4. COMPETICION	Entre los organismos presentes y el hábitat (INTER-INTRA)
5. MODIFICACION	Reacción de plantas y animales en un hábitat, e. g. a la sombra. Materia Orgánica aportada por los árboles (COMPETICION y REACCION ocurren simultáneamente).
6. ESTABILIZACION FINAL	La comunidad alcanza el clímax en equilibrio (DINAMICO) con su medio ambiente.

- Sucesión secundaria, que, por oposición a la primaria, se utiliza para designar la sucesión que tiene lugar tras una alteración de los ecosistemas. Por ejemplo, se presenta en la tierra vegetal una vez extendida sobre una escombrera.
- Procesos climáticos, que por oposición a los dos anteriores que presentan carácter continuo, se refiere a la secuencia de fases que se sucede ordenadamente por repetición periódica en tiempos parecidos o variables. Por ejemplo, la que tiene lugar en dunas, turberas o la que provoca el incendio natural.
- Vegetación potencial, o comunidad vegetal estable que existiría en un área dada como consecuencia de la sucesión natural si el hombre dejara de influir y alterar los ecosistemas vegetales. En la práctica se la considera como sinónimo de clímax. Algunos autores distinguen entre *vegetación potencial* y *vegetación natural potencial actual*, definiendo esta última como el estado final que es posible alcanzar partiendo de las condiciones actuales del medio frente a la vegetación que habría bajo unas condiciones del medio nunca modificadas por el hombre.

Hay que advertir que la terminología relacionada con los conceptos de sucesión y clímax es bastante confusa debido, por una parte, a su amplitud, y por otra a la falta de acuerdo en su utilización (es frecuente que el mismo vocablo sea utilizado por distintos autores con significados diferentes y viceversa). Es aconsejable, por tanto, siempre que se utilice o critique alguno de estos conceptos precisar su contenido o hacer referencia al autor.

Hipótesis del «clímax estructural», defendida por el propio Whittaker; se basa en los siguientes puntos:

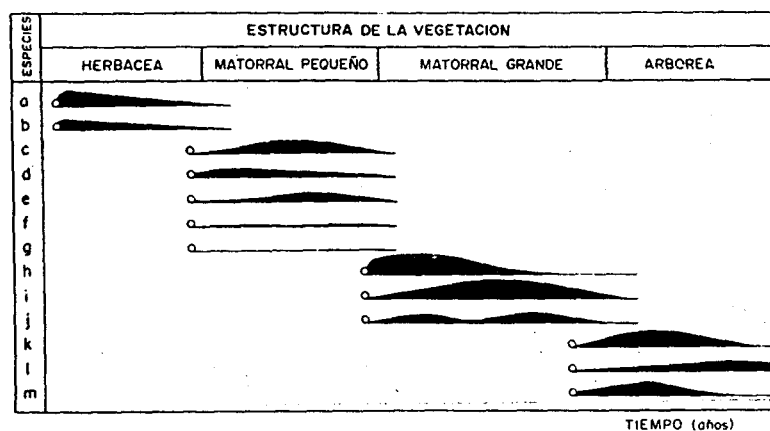
1. El medio natural y artificial de un territorio forma un complejo mosaico de gradientes ambientales. Caso típico de las explotaciones mineras.
2. En cada punto del mosaico territorial las comunidades evolucionan hacia un clímax. Las características de la serie sucesional y del clímax están determinadas por los factores ambientales presentes en un momento dado en ese punto, y no de forma abstracta por el clima regional. El clímax se entiende como una comunidad estable adaptada a su propio ambiente o hábitat, por lo que diferencias de los factores ambientales (situación topográfica, roca madre, etc.) suelen llevar asociadas diferencias en la composición de las comunidades clímax.
3. Las variaciones de los factores ambientales a lo largo de gradientes implica normalmente una intergradación continua de comunidades clímax adaptadas a las distintas posiciones a lo largo del gradiente.
4. Entre los tipos de comunidades clímax suele haber una más ampliamente representada, a la que puede llamarse comunidad clímax del territorio.

Whittaker apunta las ventajas prácticas que tiene la utilización del concepto de clímax y que están directamente indicadas para el manejo de terrenos alterados que se quieren restaurar independientemente del objetivo buscado.

Desde un punto de vista práctico, como es el caso de este manual, cabe decir que los enfoques dados a los estudios de sucesión en distintos trabajos de recuperación varían con la escala de tiempo o espacio sobre la que se analiza el problema, por ejemplo así sucede en un proyecto de restauración de una cantera con un volumen de explotación pequeño y que no se presta, por no exigirse, a un seguimiento de la evolución del proyecto.

En realidad lo que sucede en la evolución vegetal de una mina restaurada con criterios generales de conservación, es decir, imitando la vegetación natural, es una interrelación de todo un poco lo que se ha expuesto hasta aquí. De una parte hay que abandonar la idea de las teorías clásicas (Fig. 16.4), tanto en la «florística del relevo» como de la «florística inicial» (Egler, 1953) y apuntar que los cambios sufridos por las comunidades en el espacio y en el tiempo son mucho más complejos, algo así como la suma de las dos «florísticas» y están bajo la influencia de cinco procesos iterativos; cambios en el suelo, migracio-

a) FLORÍSTICA DE RELEVO



b) FLORÍSTICA INICIAL

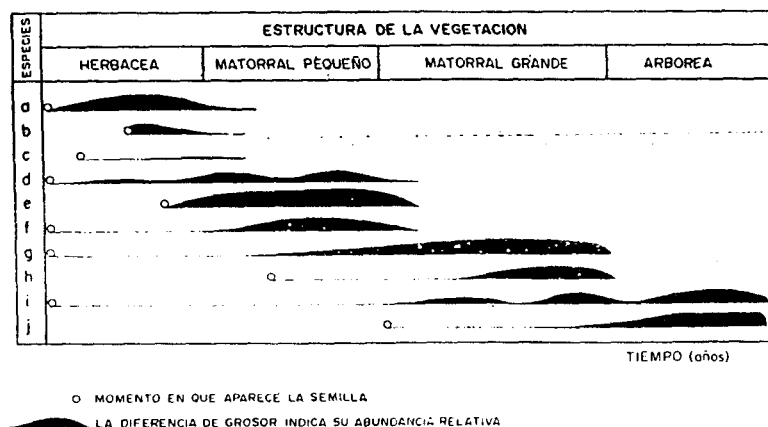


Figura 16.4. Proceso de recubrimiento vegetal en ecosistemas alterados. Sucesión primaria.

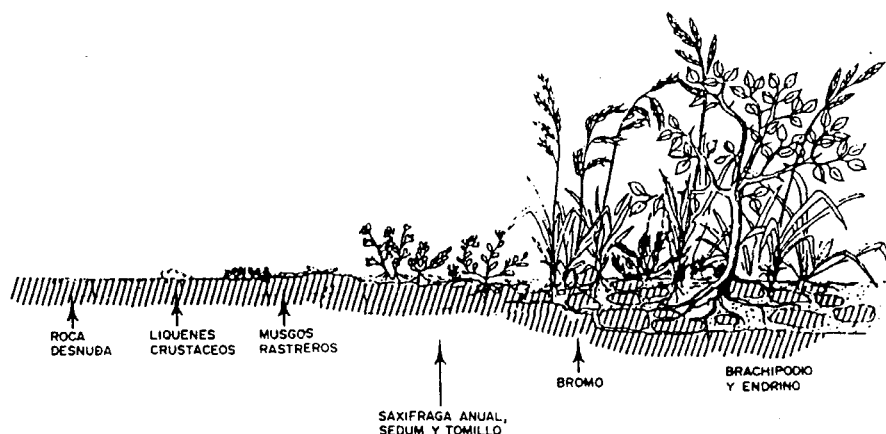


Figura 16.5. Evolución espontánea de la vegetación sobre un sustrato calcáreo compacto.

nes, ecies, competición y estabilización (Aguilo, et al, 1984). La búsqueda del modelo único es imposible de establecer «a priori» dado el gran número de variables que se relacionan.

Para cada mina a restaurar se podría desarrollar, de una forma más o menos fácil, una teoría de sucesión a nivel local, pero la perspectiva de una teoría única y monolítica podría dar un modelo muy lejos del real y por tanto resultar un esfuerzo inútil. La amplia variedad de circunstancias que se presentan en la realidad, donde se conjugan la casuística minera con las múltiples propiedades dinámicas de los diferentes ecosistemas, hacen que el estudio de la sucesión vegetal no deba abordarse siempre igual. De la misma forma el planteamiento práctico de la combinación y proporción de especies que se deben mezclar para sembrar o plantar no debe ser siempre el mismo y cada caso deberá analizarse a la luz de los conceptos y principios de la dinámica de la vegetación expuestos, de los estudios de las diferentes comunidades vegetales presentes en la explotación minera (variedades homogéneas) y de los nuevos usos que se proponen para ella.

2.1.2. ESPECIES INDICADORAS

Las investigaciones sobre la sucesión vegetal en la actualidad están encaminadas al estudio del significado de los atributos de especies importantes o indicadoras y su correlación con determinados factores ambientales y distintos tipos de alteraciones, a una escala espacio-temporal concreta, para explicar el funcionamiento y la dinámica de los ecosistemas.

La determinación de especies indicadoras de gradientes o características ambientales se basa fundamentalmente en la investigación y en la experiencia, es frecuente encontrar en tratados sobre el medio natural listas de especies que se sabe con más o menos seguridad de su relación con algún factor ambiental o alguna característica del medio, por ejemplo relación de especies que viven en suelos ácidos, básicos, que toleran la presencia de metales pesados, etc. (Tablas 16.V y 16.VI).

TABLA 16.V. RELACION DE ESPECIES QUE PUEDEN USARSE COMO INDICADORAS DE LAS CARACTERISTICAS EDAFICAS

ACIDAS	BASICAS
<i>Agrostis canina</i> <i>Agrostis tenuis</i> <i>Betula pendula</i> <i>Deschampsia flexuosa</i> <i>Digitalis purpurea</i> <i>Galium saxatile</i> <i>Pteridium aquilinum</i> <i>Rumex acetosella</i> <i>Ulex europaeus</i> <i>Vaccinium myrtillus</i>	<i>Achillea millefolium</i> <i>Brachypodium pinnatum</i> <i>Briza media</i> <i>Festuca rubra</i> <i>Fraxinus excelsior</i> <i>Helictotrichon pratensis</i> <i>Trisetum flavescens</i>
NEUTRAS	ENCHARCAMIENTO
<i>Agropyron repens</i> <i>Aira caryophyllea</i> <i>Arrhenatherum elatius</i> <i>Bromus mollis</i> <i>Atriplex hastata</i> <i>Cirsium arvense</i> <i>Cirsium vulgare</i> <i>Hordeum murinum</i> <i>Poa annua</i> <i>Poa pratensis</i> <i>Tussilago farfara</i>	<i>Agrostis stolonifera</i> <i>Ainus glutinosa</i> <i>Caltha palustris</i> <i>Deschampsia caespitosa</i> <i>Filipendula ulmaria</i> <i>Juncus articulatus</i> <i>Juncus effusus</i> <i>Phalaris arundinacea</i> <i>Phragmites australis</i> <i>Salix atrocinerea</i> <i>Salix fragilis</i> <i>Typha angustifolia</i> <i>Valeriana dioica</i>
SALINAS	METALES PESADOS
<i>Agropyron junceum</i> <i>Atriplex littoralis</i> <i>Cakile maritima</i> <i>Festuca rubra</i> <i>Hippophae rhamnoides</i> <i>Honckenya peploides</i> <i>Puccinellia maritima</i>	<i>Agrostis tenuis</i> <i>Agrostis stolonifera</i> <i>Festuca ovina</i> <i>Festuca rubra</i> <i>Minuartia verna</i> <i>Silene vulgaris</i>

TABLA 16.VI. ESPECIES INDICADORAS DE CIERTO TIPO DE pH DEL SUELO (Williamson et al 1982 Modificado)

pH	TIPO DE SUELO	ESPECIE (*)
8	Moderadamente básico. Medianamente básico.	<i>Populus deltoides.</i> <i>Fraxinus excelsior.</i> <i>Juniperus virginiana.</i>
7	Neutro.	<i>Juglans nigra.</i> <i>Maclura pomifera.</i>
6	Ligeramente ácido. Medianamente ácido.	<i>Quercus rubra.</i> <i>Liriodendrom tulipifera.</i> <i>Magnolia grandiflora.</i>
5	Fuertemente ácido. Muy ácido.	<i>Acer sacharinum.</i> <i>Pinus banksiana.</i> <i>Pinus rigida.</i>
4	Extremadamente ácido.	<i>Pinus strobus.</i> <i>Liquidambar styraciflua.</i>
3		<i>Pinus taeda.</i>

(*) Las especies que se relacionan, salvo el *F. excelsior*, no están presentes de forma natural en la Península Ibérica. Se recomienda su uso cuando la recuperación tiene carácter de ajardinamiento.

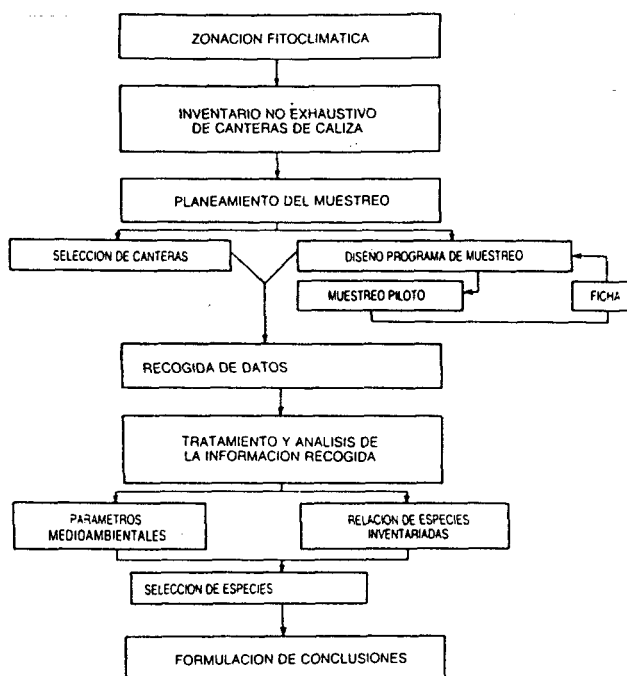


Figura 16.6. Plan de selección de especies en las canteras calizas de la región mediterránea (ITGE, 1989).



Foto 16.1. Terraplén de pista minera con material calcáreo en el que ha comenzado la colonización vegetal.

TABLA 16.VII. ESPECIES SELECCIONADAS PARA LA RECUPERACION DE CANTERAS EN EL AREA MEDITERRANEA MEDIANTE UN PLAN DE INVESTIGACION (ITGE, 1989)

	LEÑOSAS	ARBOL	ARBUSTO	SUBARBUSTO
<i>Pinus halepensis</i>		x		
<i>Populus nigra</i>		x		
<i>Prunus mahaleb</i>			x	
<i>Pistacia lentiscus</i>			x	
<i>Pistacia terebinthus</i>			x	
<i>Chamaerops humilis</i>			x	
<i>Coriaria myrtifolia</i>				x
<i>Rosmarinus officinalis</i>				x
<i>Cistus albidus</i>				x
<i>Thymus vulgaris</i>				x
<i>Helichrysum stoechas</i>				x
<i>Rumex scutatus</i>				
<i>Teucrium polium</i>				x
<i>Ononis spinosa</i>				x
<i>Ononis viscosa</i>				x
<i>Dorycnium pentaphyllum</i>				x
HERBACEAS	LEGUMINOSAS	GRAMINEAS	OTRAS	
<i>Psoralea bituminosa</i>	x			
<i>Anthyllis cytisoides</i>	x			
<i>Rubia peregrina</i>				x
<i>Brachypodium retusum</i>			x	
<i>Brachypodium pinnatum</i>			x	
<i>Bromus rubens</i>			x	
<i>Dactylis hispanica</i>			x	
<i>Avena sterilis</i>			x	
<i>Cynosurus echynatus</i>			x	

La interpretación de estas listas de especies tiene varias lecturas, de una parte que la existencia en el terreno de la especie en cuestión informa que el suelo es de tal o cual característica o bien que para una explotación minera en que se presentan ciertas características ambientales o un tipo de gradiente (composición del sustrato: pH, contenido en sales, presencia de metales pesados, contenido de materia orgánica, altitud, pendiente, exposición, etc.) se deben utilizar algunas de las especies presentes en esas listas para su recuperación.

En ocasiones, y según el problema de restauración minera, la selección de especies se debe plantear a través de un proceso de investigación. En la Fig. 16.6 se presenta el esquema seguido en la determinación de especies posibles a utilizar en la recuperación de canteras en la región mediterránea.

En los estudios de sucesión vegetal (ver 2.1) se presenta también la necesidad de saber detectar, de «visu» a través de especies o de agrupaciones vegetales indicadoras en qué nivel de evolución se encuentra la comunidad vegetal que se analiza y su estado de progresión hacia la clímax o de regresión, separación de ella. En la Tabla 16.VIII se presentan los esquemas de regresión climáti-

ca de las principales especies forestales (Ceballos) recogidas en el libro «Tratado del medio Natural», editado por la Universidad Politécnica de Madrid. En la Tabla 16.IX se presentan otros esquemas relativos a la regresión o progresión según se lean, de otros ecosistemas forestales realizados por Pedro Monserrat y recogidos en el mismo libro anteriormente citado.

TABLA 16.VIII. REGRESION CLIMATICA
(L. Ceballos, J. L. Ramos)*

I Optimo Bosque denso	HAYA (<i>Fagus silvatica</i>)	CASTAÑO (<i>Castanea sativa</i>)	ROBLE (<i>Quercus pedunculata</i>)	ROBLE (<i>Quercus sessiliflora</i>)
II Bosque aclarado con abundante intervención de arbustos. Sotobosque con numerosas plantas Leguminosas.	<i>Ilex aquifolium</i> <i>Rhamnus alpina</i> <i>Sorbus aucupar.</i> <i>Fraxinus excels.</i> <i>Sambucus racem.</i> <i>Vaccinium myrt.</i> <i>Genista hispán.</i> <i>Erica vagans</i> <i>Rubus idaeus</i>	<i>Acer pseudopl.</i> <i>Coryllus avell.</i> <i>Adenocarpus grandifl. conm.</i> <i>Genista flor. lept.</i> <i>Cytisus kunz. R.</i>	<i>Rhamnus frang.</i> <i>Ilex aquifolium</i> <i>Acer pseudoplat.</i> <i>Pirus communis</i> <i>Genista leptocl.</i> <i>Ulex europaeus</i> <i>Vaccinium myrt.</i> <i>Erica arborea</i>	<i>Acer opulifol.</i> <i>Tilia grandifolia</i> <i>Prunus mahaleb</i> <i>Ligustrum vulg.</i> <i>Sorbus aucupar.</i> <i>Coronilla emerus</i> <i>Cytisus sessilif.</i> <i>Daphne laureola</i> <i>Clematis flamm.</i> <i>Lonicera etrusca</i>
III Invasión de matorral heliófilo. Etapa de los pinares. Invasión de matorral colonizador a base de Ericácea o de Cistáceas.	↓ BOJEDAS (<i>Buxux semp.</i>) BREZALES (<i>Erica aragon.</i>) (<i>Rodod. ferr.</i>) <i>Pinus silvestris.</i> <i>Calluna vulgaris.</i>	↓ HELECHAR (<i>Pterid. aquil.</i>) AULAGARES (<i>Ulex boivini</i>) <i>Pinus pinaster</i> <i>Cistus hirsutus</i> <i>Cistus ladanif.</i>	↓ TOJARES (<i>Ulex europaeus</i> <i>Ulex nanus</i>) <i>Pinus pinaster</i> <i>Pinus silvestris</i> RETAMARES <i>Genista leptocl.</i> <i>Sarotham. pat.</i>	↓ BOJEDAS (<i>Buxux semp.</i>) HELECHARES (<i>Pteridium aq.</i>) <i>Pinus silvestris</i> <i>Pinus laricio</i> <i>Cistus monspel.</i> <i>Calluna vulg.</i>
IV Matorral en estado avanzado de degradación. Frecuencia de plantas espinosas. Predominio de labiadas.	↓ <i>Genista horrida</i> <i>Sarotham. pur.</i> <i>Juniperus comm.</i> <i>Erinacea anth.</i>	↓ <i>Genista triac.</i> <i>Prunus spinosa</i> <i>Lavand. stoech.</i> <i>Lavandula ped.</i> <i>Thymus mastich.</i> <i>Calluna vulgaris</i> <i>Juniperus comm.</i>	↓ BREZALES <i>Erica umbellata</i> <i>Calluna vulgaris</i> <i>Pterospartum tridentatum</i>	↓ <i>Lavandula vera</i> <i>Thymus vulgaris</i> <i>Genista scorpius</i> <i>Erinacea anthyll.</i> <i>Fumana proc.</i> <i>Aphyllantes monspeliensis</i>
V Asociaciones herbáceas del último estado de regresión. Pseudo-estepas de gramíneas.	↓ <i>Achillea-Helleb.</i> <i>Nardus stricta</i>	↓ <i>Dianthus</i> <i>Rumex</i> <i>Cynosurus-Brom.</i> <i>Aira</i>	↓ <i>Agrostis-Nardus</i> <i>Corynephorus sp.</i>	↓ <i>Teucrium pol.</i> <i>Plantago-</i> <i>Bromus-Koel.</i> <i>Festuca</i> <i>Brachypodium</i>
VI Desierto.	↓	↓	↓	↓
Tendencia a la regresión ↓				

* Nomenclatura no actualizada.

TABLA 16.VIII. (Continuación)

QUEJIGO (Q. Mirbecki)	REBOLLO (Q. toza)	QUEJIGO (Q. faginea)	ALCORNOCQUE (Q. suber)	ENCINA (Q. ilex)	
				sobre terreno silíceo	sobre terreno calizo
<i>Rhamnus frang.</i> <i>Laurus nobilis</i> <i>Phillyrea latifol.</i>	<i>Acer campestre</i> <i>Acer monspess.</i> <i>Sorbus aria</i> <i>Crataegus mon.</i>	<i>Fraxinus angust.</i> <i>Amelanchier ov.</i> <i>Crataegus mon.</i>	<i>Arbutus unedo</i> <i>Rhamnus alat.</i> <i>Phillyrea media</i>	<i>Fraxinus angust.</i> <i>Arbutus unedo</i> <i>Juniperus oxic.</i>	<i>Ceratonia sil.</i> <i>Celtis australis</i> <i>Juniperus phoen.</i> <i>Pistacia tereb.</i>
<i>Cytisus triflorus</i> <i>Viburnum tinus</i> <i>Sarothamnus baeticus</i>	<i>Genista florida</i> <i>Rubus discolor</i> <i>Genista tinctoria</i> <i>Adenocarpus hispánicus</i> <i>Rosa canina</i>	<i>Viburnum lont.</i> <i>Lonicera hisp.</i> <i>Adenocarp int.</i> <i>Spartium junc.</i>	<i>Mirtus communis</i> <i>Cytisus linifolius</i> <i>Cytisus candic.</i>	<i>Ruscus aculeatus</i> <i>Lonicera etrusca</i> <i>Daphne gnidium</i> <i>Rosa sempervir.</i> <i>Genista florida</i>	<i>Coronilla glauca</i> <i>Spartium junc.</i> <i>Anthyllis cytis.</i> <i>Smilax aspera</i> <i>Jasminum frutic.</i>
↓	↓	↓	↓	↓	↓
ALTABACARES (<i>Inula viscosa</i>) LENTISCARES (<i>Pistacia lent.</i>) BREZALES (<i>Erica arborea</i>) Pinus pinaster	CAYUBARES (<i>Aretostaphylos uva-ursi</i>) ESCOBONALES (<i>Sarothamnus scoparius</i>) Pinus silvestris Pinus laricio Pinus pinaster	ESCOBONALES (<i>Genista cin.</i>) (<i>Sarothamnus scoparius</i>) Pinus silvestris Pinus laricio Pinus pinaster	BREZALES (<i>Erica umbell.</i>) (<i>Erica australis</i>) ROULLILLARES (<i>Quercus hum.</i>) Pinus pinaster	RETAMARES (<i>Retana sphaerocarpa</i>) Pinus pinea Pinus pinaster	LENTISCARES (<i>Pistacia lent.</i>) ROMERALES (<i>Rosmar. off.</i>) COSCOJARES (<i>Quercus cocc.</i>) Pinus halepensis Pinus laricio
<i>Cistus salvifolius</i> <i>Erica scoparia</i>	JARALES <i>Cistus laurifolius</i> <i>Cistus ladanif.</i>	JARALES <i>Cistus laurifolius</i> <i>Cistus ladanif.</i>	JARALES <i>Cistus monspel.</i> <i>Cistus ladanifer.</i> <i>Cistus salvifolius</i> <i>Cistus populifol.</i> <i>Halimium erioc.</i>	JARALES <i>Cistus ladanif.</i> <i>Cistus laurifolius</i>	JARALES <i>Cistus albidus</i> <i>Cistus libanotis</i>
↓	↓	↓	↓	↓	↓
<i>Calycotome vill.</i> <i>Ulex scaber</i> <i>Rhamnus oleoid.</i> <i>Thymus mastich.</i>	<i>Lavandula ped.</i> <i>Thymus mastich.</i> <i>Calluna vulgaris</i> <i>Juniperus oxic.</i> <i>Juniperus comm.</i> <i>Genista scorpius</i> <i>Helichrysum stoechas</i>	<i>Rhamnus infect.</i> <i>Prunus spinosa</i> <i>Genista scorpius</i> <i>Santolina rosm.</i> <i>Lavandula latif.</i> <i>Lavandula ped.</i> <i>Satureja abovata</i> <i>Thymus zygis</i>	<i>Lavand. stoech.</i> <i>Ulex parviflorus</i> <i>Calluna vulgaris</i> <i>Lithospermumfr.</i>	<i>Artemisia glutin.</i> <i>Helychrysum st.</i> <i>Santolina rosm.</i> <i>Lavandula ped.</i> <i>Thymus zygis</i>	<i>Phlomis purpurea</i> <i>Teucrium capit.</i> <i>Lavandula vera</i> <i>Rhamnus lycioid.</i> <i>Ruta bracteosa</i>
↓	↓	↓	↓	↓	↓
Senecio-Carduus	Asphodellus- Andryala	Thapsia- Vervascum	Pulicaria-Aspar. Rumex Brochypodium	Filago Andryala Eringium	Euphorbia- Plantago
<i>Brachypodium</i> <i>Piptatherum</i>	<i>Corinephorus</i> <i>Festuca-Nardus</i>	<i>Corinephorus</i> <i>Festuca-Stipa</i>	<i>Andropog.-Aira</i> <i>Vulpia</i>	<i>Stipa-Coryneph.</i> <i>Bromus</i>	<i>Brachypodium ramosum</i> <i>Stipa tenaciss.</i>
↓	↓	↓	↓	↓	↓

TABLA 16.IX. TABLA DE REGRESION
(P. Monserrat en J. L. Ramos)

I OPTIMO NATURAL (Climax)	ROBLE (<i>Q. pubescens</i>)	ABETO (<i>Abies alba</i>)	PINO NEGRO (<i>Pinus uncinata</i>)
II a) BOSQUE ACLARADO b) BOSQUE MEZCLADO (con el pino de la serie)	<i>Amelanchier ovalis</i> <i>Sorbus aria</i> <i>Sorbus torminalis</i> <i>Prunus avium</i> <i>Rhamnus cathartica</i> <i>Viburnum lantana</i> <i>Rhamnus alpina</i> <i>Cornus mas</i> <i>Cornus sanguinea</i> <i>Ligustrum vulgare</i> <i>Evonymus europaeus</i> <i>Cotoneaster toment.</i> <i>Lonicera xylosteum.</i>	<i>Fagus sylvatica</i> <i>Salix caprea</i> <i>Acer platanoides</i> <i>Faxinus excelsior</i> <i>Sorbus aucuparia</i> <i>Sambucus racemosa</i> <i>Genista florida</i> <i>Sorbus chamaemesp.</i> <i>Vaccinium myrtillus</i> <i>Rubus caesius</i> <i>Daphne mezereum</i> <i>Luzula nivea</i> <i>Rosa pendulina</i> <i>Lonicera, spp.</i> <i>Pirola, spp.</i>	<i>Pinus sylvestris</i> <i>Sorbus aucuparia</i> <i>Amelanchier ovalis</i> <i>Betula pubescens</i> <i>Rhamnus alpina</i> <i>Sorbus chamaemespilus</i> <i>Arctostaphyllum uva-ursi</i> <i>Lonicera nigra</i> <i>Rubus idaeus</i> <i>Vaccinium myrtillus</i> <i>Rosa pendulina</i>
III ETAPA DE LOS PINARES a) MONTE RASO b) PINAR	BODEJAS (<i>Buxus sempervirens</i>) <i>Pinus nigra</i> <i>Pinus sylvestris</i> BREZALES <i>Erica vagans</i> <i>Calluna vulgaris</i> AULAGARES <i>Genista hispanica</i> <i>Genista horrida</i>	BOJEDAS (<i>Buxus sempervirens</i>) HELECHARES (<i>Pteridium aquilinum</i>) PIORNALES (<i>Cytisus purgans</i>) <i>Pinus sylvestris</i> <i>Pinus uncinata</i> <i>Calluna vulgaris</i> <i>Rhododendron</i> <i>ferrugineum</i>	BODEJAS (<i>Buxus sempervirens</i>) PIORNALES (<i>Cytisus purgans</i>) <i>Pinus sylvestris</i> <i>Calluna vulgaris</i> <i>Rhododendron</i> <i>ferrugineum</i>
IV MATORRAL DEGRADADO	<i>Satureja montana</i> <i>Ononis fruticosa</i> <i>Teucrium pirenaicum</i> <i>Lavandula angustifolia</i> <i>Onobrychis saxatilis</i> <i>Berberis vulgaris</i>	<i>Juniperus communis</i> <i>Cotoneaster integerrimus</i>	<i>Juniperus nana</i> <i>Juniperus communis</i>
V PSEUDO-ESTEPA DE GRAMINEAS	<i>Nardus-Agrostis</i>	<i>Nardus stricta</i> <i>Deschampsia flexuosa</i> <i>Gallium rotundifolium</i> <i>Helleborus occidentalis</i> <i>Festuca heterophylla</i>	<i>Deschampsia flexuosa</i> <i>Gallium marchandi</i> <i>Festuca scoparia</i> <i>Helictotrichom montanum</i> <i>Valeriana montana</i> <i>Pulsatilla alpina</i>
VI. DESIERTO: Roquedo Arenales Karst			

En la Tabla 16.X se presentan los diferentes estudios de evolución de la vegetación para la comunidad de Madrid, según la agrupación vegetal presente en el estudio evolutivo queda definido por la formación vegetal: «BOSQUE,

GARRIGA, PASTIZAL» y por algunas especies significativas para esos casos (*Stipa gigantea* para PASTIZALES del grupo de los BERCIALES; *Rhamnus lycioides* para GARRIGAS del grupo de los COSCOJARES, etc.).

TABLA 16.X. EVOLUCION DE LA VEGETACION
(R. Martínez, 1982)

VEGETACION SUPRAMEDITERRANEA DE MADRID				
BOSQUE CLIMAX	ESTADIO DE LAS GARRIGAS	ESTADIO DE LOS PASTIZALES	ESTADIO DE LOS JARALES	SUBSTRATO LITOLOGICO
Encinares sobre calizas ↓ <i>Q. ilex rotundifolium</i> <i>Bupleurum rigi.</i> ↑ Encinares sobre yesos	Coscojares ↓ <i>Rh. lycioides</i> <i>Q. coccifera</i> ↑ Coscojares	Espartales y atochares en calizas ↓ <i>Stipa tenacissima</i> <i>Arrhenatherum album</i> ↑ Espartales y atochares en yeso	Tomillares en calizas ↓ <i>Linum suffruticosum</i> <i>Salvia lavandulifolia</i> <i>Gysophila sthruthium</i> <i>Centaurea hyssopifolia</i> ↑ Tomillares en yeso	CALIZAS
← SUCESION VEGETAL →				
Encinares guadarrámicos ↓ <i>Juniperum oxycedus</i> <i>Q. ilex rotundifolium</i> <i>Pyrus bourgeana</i> ↑ Encinares Extremadurensis	Retamares guadarrámicos ↓ <i>Cytisus scoparius</i> <i>Retama sphaerocarpa</i> <i>Cytisus multiflorus</i> ↑ Retamares	Berciales guadarrámicos ↓ <i>Arrhenatherum bulbosum</i> <i>Stipa gigantea</i> ↑ Berciales	Rurales ↓ <i>Rosmarinus officinalis</i> <i>Cistus ladanifer</i> <i>Genista luésuta</i> ↑ Jarales	GRANITOS GNEIS ARCOSAS

2.1.3. OTRAS HERRAMIENTAS

La utilización de otras herramientas para el estudio de la dinámica de la vegetación (análisis polínico, modelos matemáticos de simulación, etc.), no significa que se le haya restado importancia a la fitosociología en este campo. El estudio de las comunidades vegetales y sus relaciones con el medio se sigue empleando como base científica y medio de comprobación de cualquier metodología de estudio o aplicación de la sucesión vegetal; puede, por tanto, proporcionar información básica de gran utilidad para la selección de especies.

El estudio fitosociológico de la zona minera a restaurar tiene múltiples aplicaciones, además de la ya comentada del estudio de la sucesión. El análisis de las comunidades vegetales puede conducir al descubrimiento de alelopatías, poner de manifiesto factores que contribuyen a la estabilización o degradación de la vegetación, etc., pero sobre todo, y como aplicación más generalizada, puede ayudar a caracterizar el medio si se conoce su valor indicador. Determinadas agrupaciones de especies caracterizan estadísticamente, por presencia o sistemática ausencia, una propiedad del medio o una forma de explotación o alteración de éste: existen agrupaciones vegetales ligadas a la red de drenaje subsuperficial o a aguas freáticas accesibles, a ciertas sustancias minerales y a las características de los materiales geológicos, etc.

Algunos autores defienden además su valor indicador para estimar la calidad de la estación, e incluso los efectos de ciertas actuaciones como es el caso de la minería: «como cada comunidad se encuentra siempre bajo condiciones determinadas y persistentes, y aparece allí donde se realizan estas condiciones, su valor indicador permite ver los resultados de las interferencias humanas» (Braun Blanquet, 1979).

Cuando en la práctica no existan estudios sobre la zona que reúna las condiciones apuntadas o no sea posible abordarlos, habrá que renunciar a utilizar este instrumento como base de la elección de especies. Sin embargo, la información que pueda tenerse de la vegetación a otras escalas menos detalladas no es en ningún caso despreciable; sirve como base de estudios más exhaustivos y, en caso de que éstos no se realicen, como orientación sobre las características generales en la zona, que luego habrá que comprobar y matizar.

2.2. Estrategias de las plantas

Frente a las alteraciones naturales o artificiales que se suceden en los ecosistemas, en este caso por las explotaciones mineras, los organismos que en él habitan cambian sus pautas de comportamiento para defenderse, tanto a nivel fisiológico como morfológico. A este cambio se

le denomina estrategia. También le sucede algo parecido a las comunidades en cuanto a su capacidad de respuesta.

Para las especies vegetales se entiende por estrategia «Agrupamiento de características genéticas semejantes o análogas que ocurren entre las especies o poblaciones y hacen que las mismas exhiban semejanzas ecológicas» (Grime, 1979).

En la selección de especies hay que considerar la respuesta de las plantas al medio. En principio el medio en el que van a ser dispuestas (siembra o plantación) tiene modificadas sus características naturales y, por tanto, la respuesta de las plantas a veces es imprevisible. Esta respuesta, que en definitiva no es otra cosa que su estrategia por intentar sobrevivir y establecer descendencia, es distinta en las especies anuales que en las vivaces o perennes, de igual forma es diferente la respuesta durante el período vegetativo que la planta utiliza para establecerse (enraizarse y crecer), que en el que intenta perpetuarse o regenerarse (floración, fructificación, producción de estolones, etc.). Fig. 16.7.

Las plantas se regeneran por brotes vegetativos, por semillas, por esquejes, etc. Este proceso se asocia con la consolidación local de poblaciones y tienen el defecto de producir comunidades de plantas, por lo general, genéticamente uniformes. Por el contrario, la reproducción sexual se traduce en que la variedad genotípica resultante favorece la respuesta de poblaciones y especies a la selección natural.

Grime (1982) tipifica las estrategias de las plantas para la fase regenerativa. En la Tabla 16.XI se presentan, para la estrategia de la fase regenerativa, algunas especies vegetales que existen de forma natural o naturalizada en la Península Ibérica.

Entre las especies con estrategia regenerativa hay que resaltar la de aquellas especies que tienen la facultad de invadir terrenos abiertos a consecuencia de alguna alteración y comenzar así los procesos dinámicos de sucesión. A estas especies se las denomina pioneras y se caracterizan por: producir gran cantidad de semillas, tener unas semillas de una alta movilidad, presentar una exigencia de luz alta y tener una gran capacidad para tolerar medios alterados.

Cuando las plantas están en la etapa de madurez responden a las condiciones del medio de diferente forma, según que sea propia su facultad de sobrevivir o que hagan partícipe de su estrategia a la disposición en la planta de las yemas de desarrollo. Estas respuestas están definidas por Grime como «Estrategia Primaria y Secundaria», respectivamente. En la Primaria destaca la intensidad de restricciones frente a la intensidad de alteraciones, cuando las alteraciones son de carácter bajo, maquinaria no pesada de forma esporádica, y las restricciones no existen prácticamente, las especies presentes deben su existencia a la lucha por el espacio, por el alimento y por el agua; son las *especies competidoras*. Cuando las alteraciones son de carácter alto, maquinaria pesada que transita frecuentemente, existencia de polvo, de gasóleo, etc., y las restricciones son bajas, entonces se dan cita aquellas especies adaptadas a las perturbaciones y que, genéricamente, se conocen como *especies ruderales*. Cuando las alteraciones son bajas, del tipo ya apuntado, pero las restricciones son altas, se presentan especies tolerantes o también denominadas del grupo de las «colas» (afinidad por) *calcicola*, *silicola*, *gipsicola*, generalmente conocidas como *especialistas*. El último caso alteraciones y restricciones altas no dan lugar a una estrategia viable.

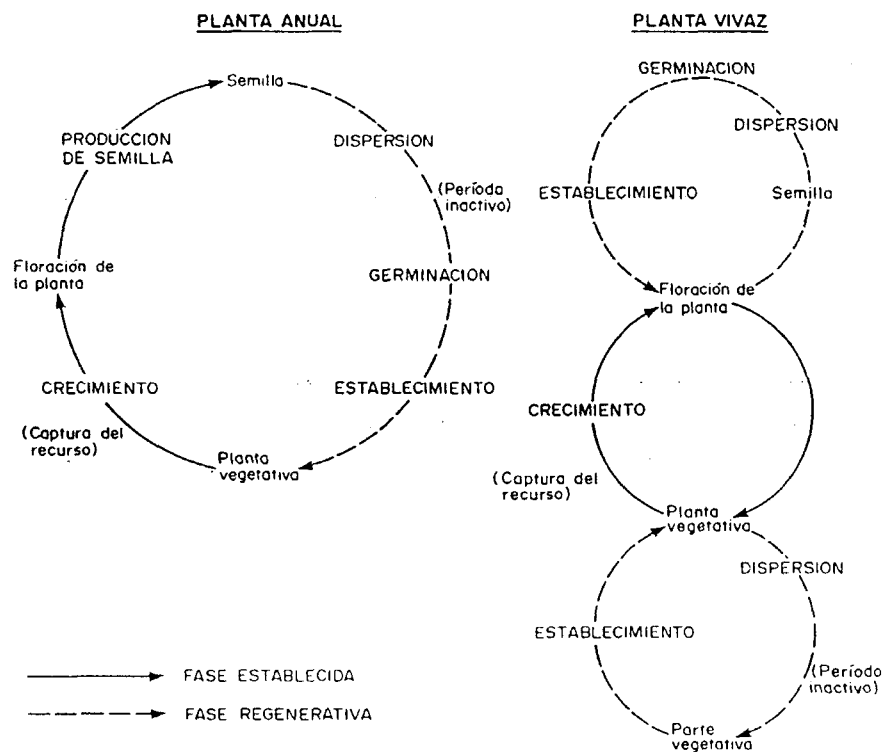


Figura 16.7. Ciclos vegetativos (Grime, 1979).

Para la Estrategia Secundaria interviene la importancia relativa de la agresividad propia de cada especie, relacionada directamente con la competencia, de las restricciones y de las alteraciones.

Como ejemplos de especies «especialistas» se citan frecuentemente especies relacionadas con las minas de carbón. En la Tabla 16.XI se relacionan algunas de las especies que constituyen la flora típica de las escombreras de carbón y aunque sin llegar a ser especialistas en el sentido literal de la palabra aquellas cuya presencia es más alta responden claramente a esa denominación, sobre todo las que se detectan en más de un 50 % de observaciones.

TABLA 16.XI. ESTRATEGIAS DE LA FASE REGENERATIVA (Modificado de Grime, 1979)

A. Expansión vegetativa por brotes de cepa o raíz:	
—	<i>Epilobium hirsutum</i>
—	<i>Quercus ilex</i>
—	<i>Quercus pyrenaica</i>
—	<i>Dryas octopetala</i>
—	<i>Prunus spinosa</i>
B. Regeneración estacional en claros que surgen entre la vegetación:	
Otoño:	Primavera:
— <i>Arrhenatherum elatior</i>	— <i>Acer pseudoplatanus</i>
	— <i>Fraxinus angustifolia</i>

TABLA 16.XI. (Continuación)

—	<i>Bromus erectus</i>
—	<i>Cynosurus cristatus</i>
—	<i>Dactylis glomerata</i>
Otoño y Primavera:	
—	<i>Agrostis stolonifera</i>
—	<i>Tussilago farfara</i>
—	<i>Cirsium arvense</i>
—	<i>Trifolium repens</i>
—	<i>Poa pratensis</i>
C. Regeneración a través de un «stock» permanente de semillas:	
—	<i>Calluna vulgaris</i>
—	<i>Agrostis tenuis</i>
—	<i>Origanum vulgare</i>
—	<i>Plantago lanceolata</i>
—	<i>Hypericum perforatum</i>
—	<i>Holcus lanatus</i>
D. Regeneración mediante semillas de diferente tipo o propagulos diseminados por el viento:	
—	<i>Salix ssp.</i>
—	<i>Ailanthus spp.</i>
—	<i>Ulmus ssp.</i>
—	<i>Populus spp.</i>
E. Regeneración mediante un «stock» permanente de plántulas:	
—	<i>Ilex equifolium</i>
—	<i>Abies alba</i>
—	<i>Fagus sylvatica</i>

TABLA 16.XII. FLORAS CARACTERISTICAS DE LAS ESCOMBRERAS DE MINAS DE CARBON DEL CONDADO DE YORKSHIRE (expresado en %) (Williamson, et al, 1982, modificado) (*)

ARBOLES	<i>Crataegus monogyna</i>	36	<i>Poa annua</i>	32	
	<i>Quercus robur</i>	36		<i>Agrostis stolonifera</i>	27
	<i>Betula pendula</i>	27		<i>Lolium perenne</i>	23
	<i>Salix cinerea</i>	23		<i>Poa pratensis</i>	23
	<i>Sambucus nigra</i>	32		<i>Festuca ovina</i>	23
	<i>Acer pseudoplatanus</i>	9		<i>Deschampsia caespitosa</i>	18
	<i>Fraxinus excelsior</i>	5		<i>Arrhenatherum elatius</i>	18
	<i>Quercus petraea</i>	5		<i>Festuca arundinacea</i>	5
	<i>Corylus avellana</i>	5		<i>Agropyron repens</i>	5
MATORRALES	<i>Rubus fruticosus</i>	27	LEGUMINOSAS	<i>Festuca gigantea</i>	5
	<i>Calluna vulgaris</i>	5		<i>Lotus corniculatus</i>	27
	<i>Rosa canina</i>	5		<i>Trifolium pratense</i>	14
	<i>R. pimpinellifolia</i>	5		<i>T. repens</i>	14
GRAMINEAS	<i>Agrostis tenuis</i>	68		<i>Vicia sativa</i>	5
	<i>Dactylis glomerata</i>	59		<i>Lupinus sp.</i>	5
	<i>Holcus lanatus</i>	55		<i>Medicago lupulina</i>	5
	<i>Deschampsia flexuosa</i>	50		<i>Ulex europaeus</i>	5
	<i>Festuca rubra</i>	41		<i>Cytisus scoparius</i>	5
				<i>Trifolium dubium</i>	5
		<i>Lathyrus montanus</i>		5	
		<i>Anthyllis vulneraria</i>	5		

Tabla 16.XII. (Continuación)

OTRAS HIERBAS	<i>Epilobium angustifolium</i>	74		<i>Plantago lanceolata</i>	9
	<i>Tussilago farfara</i>	64		<i>Epilobium hirsutum</i>	9
	<i>Rumex acetosella</i>	59		<i>Digitalis purpurea</i>	9
	<i>Cirsium arvense</i>	59		<i>Senecio sylvaticus</i>	9
	<i>Heracleum sphondylium</i>	36		<i>Potentilla erecta</i>	9
	<i>Taraxacum officinale</i>	36		<i>Artemisia vulgaris</i>	9
	<i>Senecio viscosus</i>	32		<i>Atriplex hastata</i>	9
	<i>Hieracium pilosella</i>	32		<i>Dipsacus fullonum</i>	9
	<i>H. umbellatum</i>	32		<i>Urtica dioica</i>	9
	<i>Leontodon hispidus</i>	27		<i>Rumex acetosa</i>	9
	<i>Polygonum aviculare</i>	27		<i>Epilobium parviflorum</i>	9
	<i>Cerastium fontanum</i>	27		<i>Spergularia rubra</i>	5
	<i>Rumex crispus</i>	27		<i>Solanum nigrum</i>	5
	<i>R. obtusifolius</i>	27		<i>Tripleurospermum maritimum</i>	5
	<i>Linaria vulgaris</i>	22		<i>Calystegia sepium</i>	5
	<i>Achillea millefolium</i>	22		<i>Teucrium scorodonia</i>	5
	<i>Centaurea nigra</i>	22		<i>Sonchus arvensis</i>	5
	<i>Plantago lanceolata</i>	18		<i>Potentilla reptans</i>	5
	<i>Cirsium vulgare</i>	18		<i>Galium saxatile</i>	5
	<i>Reseda luteola</i>	18		<i>Juncus effusus</i>	5
	<i>Ranunculus repens</i>	18		<i>Reseda lutea</i>	5
	<i>Senecio jacobaea</i>	18		<i>Ranunculus acris</i>	5
	<i>Matricaria matricarioides</i>	18		<i>Centaurea scabiosa</i>	5
	<i>Solanum dulcamara</i>	18		<i>Sonchus oleraceus</i>	5
	<i>Senecio squalidus</i>	18		<i>Hypochaeris radicata</i>	5
	<i>Convolvulus arvensis</i>	14		<i>Plantago major</i>	5
	<i>Chrysanthemum leucanthemum</i>	14			
	<i>Atriplex patula</i>	14			
	<i>Stellaria media</i>	14		HELECHOS	
	<i>Senecio vulgaris</i>	9		<i>Pteridium aquilinum</i>	18
				<i>Equisetum arvense</i>	9

(*) Todas las spp. se presentan de forma natural o naturalizada en la Península Ibérica.

Los hábitat pobres en nutrientes son muy frecuentes en la restauración de las explotaciones mineras, por regla general se presentan suelos muy ácidos o muy calizos o derivados de serpentina, etc. En estos casos las plantas acusan una falta de disponibilidad de nutrientes bien por el bloqueo de éstos, bien por la falta de agua, y también porque la absorción fisiológica queda bloqueada. Especies típicas de suelos ácidos son la *Erica cinerea*, *Calluna vulgaris* y *Vaccinium myrtillum*.

En cuanto a la adaptación a las perturbaciones cabe citar las especies que se suelen situar en la zona de fluctuación de los niveles de agua en zonas con un cierto grado de encharcamiento temporal, así: *Poa annua*, *Polygonum aviculare*, *Stellaria media*, etc. O en los terrenos muy compactos debidos al pisoteo y la maquinaria, como son: *Bromus mollis*, *Trifolium dubium*, *Medicago lupulina*, *Plantago lanceolata*, *Cirsium acaule*, *Polygonum aviculare*, *Poa annua*, etc. La respuesta de las especies vegetales a estas situaciones se traduce en que son de tamaño pequeño, formas amacolladas rastreras y tipos arrossetados (relacionado con el pisoteo). En este grupo también se encuentran las consideradas especies ruderales muy frecuentes en las áreas mineras y sus alrededores: *Papaver rhoeas*, *Viola arvensis*, *Anagallis arvensis*, etc.

3. ESQUEMA METODOLOGICO BASICO PARA LA SELECCION DE ESPECIES

El valor de las distintas especies para la consecución de unos objetivos determinados es diferente, y diferente también es su respuesta frente a un medio ambiente de características concretas, tanto en lo que se refiere a su capacidad para desarrollarse, como a los efectos que produce sobre el mismo. El proceso de selección planteado de forma genérica y esquemática debe abordar, entre otros, la valoración comparativa de las especies respecto a su adecuación al medio, la consecución de los objetivos, y las premisas o directrices bajo las que se concibe la restauración, de forma que la especie o especies elegidas sean las que optimicen todos los objetivos que se plantean.

Dada la variada gama de factores que pueden condicionar estas valoraciones, y las interacciones entre los mismos, *no es posible, ni conveniente, establecer un único método sistemático, detallado y rígido para llevar a cabo el proceso de selección*. Para cada zona y para cada objetivo o conjunto de objetivos la naturaleza de los factores y el peso con que intervienen en la valoración o que se consideren limitantes para el empleo de una especie

pueden ser muy diferentes, por tanto, el método de selección ha de ser abierto y flexible; resulta más prudente un método iterativo de aproximaciones sucesivas al problema que permita la detección de los «condicionantes» particulares en cada caso (tanto ambientales como de otro tipo: técnicos, económicos, sociales, etc.), que establecer, a priori y de forma genérica, un orden de importancia de los factores y realizar una criba secuencial de especies de acuerdo con el criterio prefijado.

Ante la necesidad de adaptar el proceso de selección a cada caso concreto, parece evidente que éste tenga en consideración la valoración de las especies respecto a los factores apuntados. Será necesario, por tanto, analizar las características de las especies (exigencias, tolerancias, cualidades, etc.) en relación con las del medio en la localización concreta donde se desea realizar la actividad restauradora.

Una vez establecidas estas zonas como ámbito de aplicación del estudio o hábitat de referencia será preciso ir acotando progresivamente las especies que se consideren candidatas a la elección. Dado que es mucho más fácil definir la total inadecuación de una especie para su uso en un plan de restauración minera que definir su grado de adecuación, se plantea el proceso de selección de la forma siguiente:

- Primero, mediante una etapa de *preselección* encaminada a la eliminación de todas aquellas especies que no cumplan alguno de los requisitos necesarios fundamentales.
- Segundo, con una etapa de *valoración*, en la que se pretende establecer el grado de adecuación de cada una de las especies seleccionadas en la fase anterior.
- Y por último, una etapa de *optimización*, en la que, mediante la valoración comparativa del grado de adecuación de las distintas especies, se elijan las más idóneas.

En la Fig. 16.8 se presentan de forma esquemática las consideraciones antes apuntadas para la elección de especies.

Este análisis sólo es abordable estableciendo como punto de partida una zonificación del territorio minero, primero en unidades fisiográficamente homogéneas (Tabla 16.XIII) y después en unidades ecológicamente homogéneas (Tabla 16.XIV), es decir, en las que se prevea una misma respuesta tanto del medio como de la vegetación a implantar.

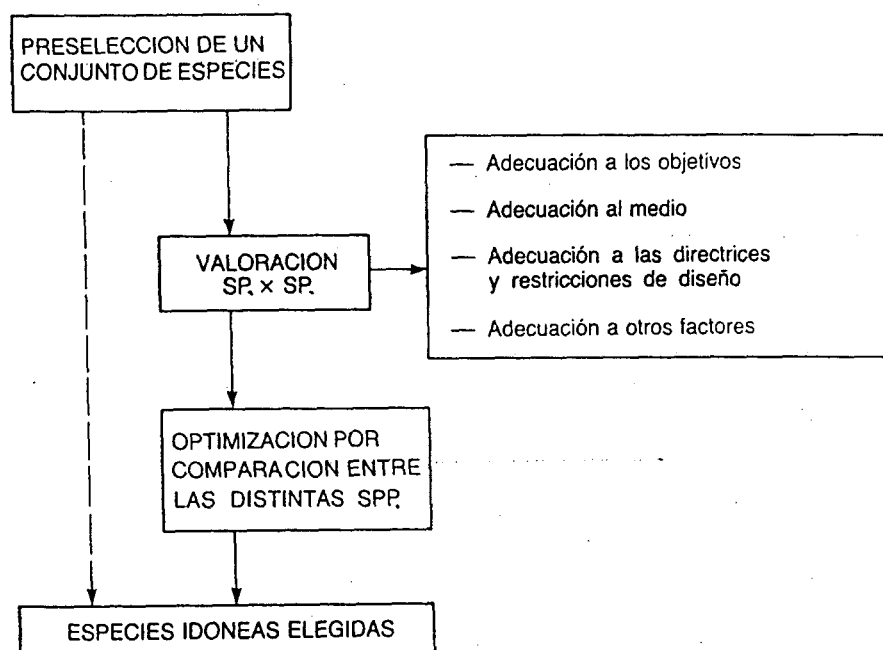


Figura 16.8. Esquema metodológico básico para la selección de especies.

TABLA 16.XIII. EJEMPLO DE UNIDADES FISIOGRAFICAMENTE HOMOGENEAS PRESENTES EN DIFERENTES EXPLOTACIONES MINERAS SUSCEPTIBLES DE RESTAURACION

TIPO DE EXPLOTACION	FRENTE DE CORTA	DERRUBIO DEL PIE DE FRENTE	PLATAFORMA (PLAZA)	ESCOMBRERA	TERRAPLEN CAMINO DE ACCESO	ALEDAÑOS	ESCOMBRERA PIE	HUECO	AIEROS	ENTRADAS	ACOPIOS	
											MATE	T. VEG.
Minería cielo abierto	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x
Minería subterránea			x	x	x	x	x		x	x	x	x
Canteras	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x
Graveras				x	x	x		x			x	x

TABLA 16.XIV. EJEMPLO DE DETERMINACION DE UNIDADES ECOLOGICAMENTE HOMOGENEAS

UNIDADES FÍSIOGRAFICAS HOMOGENEAS	CARACTERISTICAS AMBIENTALES																				
	ALTITUD						EXPOSICION					PENDIENTE				VEGETACION					
	0	100	200	300	400	500	N	S	E	W	TV	<3 %	3-10 %	10-25 %	>25 %	A	B	C	D	Etc.	
Frente de explotación																					
Aledaños				(*)				(*)					(*)			(*)	(*)				

A: ruderales
C: fisurícolas

B: rupícolas
D: etc.

(*) La unidad ecológicamente homogénea es aquella que está presente en la zona a restaurar situada a 300 m.s.n.m., en una orientación sur, con una pendiente del 3 al 10 % y con especies vegetales de los grupos A y C, que se especifican también.



Foto 16.2. Talud final de cantera colonizada con el paso del tiempo. Garraf. Barcelona.

3.1. Preselección de especies

En esta etapa, se trata de acotar el conjunto de especies candidatas a la elección mediante la exclusión de aquellas que se consideren totalmente inadecuadas por cualquier motivo. Sin esta preselección previa la valoración de las especies sería en la práctica inabordable.

Esta etapa, que aunque de forma inconsciente se lleva a cabo siempre, tiene por otra parte gran importancia; la exclusión de algunas especies, antes de su valoración comparativa frente a otras respecto a los distintos factores, puede dar lugar a que no se alcance la solución óptima; o reducir la selección de especies a la elección de la más idónea entre un pequeño grupo más o menos estandarizado (ciertas especies de leguminosas o gramíneas).

La realización práctica de esta tarea admite distintos enfoques o aproximaciones al problema; éstos agilizarán en mayor o menor medida el proceso de preselección dependiendo de las circunstancias que concurren en cada caso. Antes de comenzar, es conveniente siempre tener muy claro cuáles son los requisitos mínimos, o los umbrales que se consideran limitantes para admitir o rechazar la

«candidatura» de cualquier especie. Para definir estas «reglas de exclusión» habrá que estudiar y puntualizar:

- Los objetivos de la restauración y el uso concreto que se ha asignado a la zona, y la importancia relativa que se concede a cada uno de ellos.
- El tipo de características o requisitos mínimos que deben reunir las especies para cumplir los objetivos fijados.
- Las características medioambientales que las especies han de ser capaces de soportar en la zona a restaurar buscando principalmente detectar aquellos factores del medio que puedan resultar limitantes para el desarrollo de gran número de especies (Tabla 16.XV).

Aun no presentándose ninguna de estas condiciones extremas, el clima y el suelo suelen ser los factores ecológicos que condicionen con mayor frecuencia el establecimiento de un determinado tipo de vegetación. Las exigencias climáticas de las especies suelen ser más estrictas que las edáficas, o al menos están más estudiadas, por lo que en general, y salvo que exista algún otro factor ecológico claramente determinante, se suele utilizar como primer criterio eliminador.

Entre los datos meteorológicos más utilizados para describir los límites de distribución de una especie se pueden citar:

- Las temperaturas máximas, mínimas y medias anuales o de los períodos vegetativos, en los meses más fríos o más cálidos.
- Las precipitaciones medias anuales o de los períodos vegetativos, los días de lluvia.
- La humedad relativa estacional y anual.

Los índices y diagramas que relacionan distintos elementos del clima con la posible presencia de un determinado tipo de vegetación son muy numerosos.

Entre ellos cabe citar los diagramas ombrotérmicos de Gaussen-Walter, los índices fitoclimáticos de Allué y los diagramas bioclimáticos de Montero de Burgos y González Rebollar.

TABLA 16.XV. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DESARROLLO DE LAS PLANTAS

CARACTER	- FACTOR	MEDIDAS DE CORRECCION
CLIMATICO	<ul style="list-style-type: none"> — TEMPERATURA — PRECIPITACION — VIENTO 	<ul style="list-style-type: none"> — Elección de spp. que se acomoden al clima local. — Determinar la estación húmeda en climas secos. — Determinar la estación fría en climas cálidos. — Mejorar textura del suelo para aumentar el poder de retención del agua. — Aportar agua (riego) temporalmente donde sea necesario.
EDAFICO FISICO	<ul style="list-style-type: none"> — TEXTURA DEL SUELO — MATERIA ORGANICA — AGREGACION Y ESTRUCTURA DEL SUELO — DENSIDAD, POROSIDAD Y COMPACTACION — COLOR, ESTABILIDAD 	<ul style="list-style-type: none"> — Separar los materiales al comienzo de las operaciones: útiles de no útiles (materia orgánica y otros). — Prevenir compactación (ripar, escarificar, etc.). — Prevenir aireación adecuada por drenajes, modificaciones de la estructura del suelo (cultivo, adición del material orgánico). — Alterar el tamaño de los materiales. — Elección de especies vegetales rompedoras.
EDAFICO QUIMICO	<ul style="list-style-type: none"> — TOXICIDAD <ul style="list-style-type: none"> — Metales pesados. — Solubilidad de metales. — Concentración crítica de metales. — ACIDEZ Y ALCALINIDAD — NUTRIENTES — SALINIDAD 	<ul style="list-style-type: none"> — Adición de caliza, fosfatos y materia orgánica para reducir la toxicidad de los metales. — Dilución. — Uso de plantas tolerantes a la contaminación. — Incorporación de abono y materia orgánica. — Controlar el drenaje. — Aplicar un «mulch» superficial para controlar temperatura de superficie. — Regar para que por drenaje e infiltración se arrastren las acumulaciones salinas. — Seleccionar plantas que toleren suelos salinos: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Cynodon dactylodon</i> • <i>Atriplex numularia</i> • <i>Chloris gayana</i> (sp. exótica) • <i>Trifolium repens</i> • <i>Alopecurus pratensis</i> — Recoger semillas de spp. que vivan en suelos salinos.

Aunque la comparación entre homoclimas, como método para preseleccionar es un buen criterio, en su aplicación debe tenerse en cuenta que:

- El clima de la estación que debe considerarse en la comparación es el de la localidad concreta donde está ubicada la mina, no el macroclima general de la zona. Se considerarán valores de los factores climáticos tales como la altitud, la exposición, pendiente, situación topográfica, proximidad de superficies de agua libre, etcétera.
- La información que proporcionan debe ser considerada con cautela, especialmente cuando se refiere a especies exóticas y a aquellas con gran área de distribución y que presentan gran número de procedencias y/o variedades; existen numerosos ejemplos que muestran el buen comportamiento de exóticas en climas y latitudes muy diferentes a los de su hábitat primitivo; también están demostradas las considerables diferencias

que presentan, en su adaptación a distintos climas y suelos, las diversas procedencias de algunas especies (Jackson, 1984). Por esta razón el criterio no debe aplicarse de forma rígida y se deben buscar características de plasticidad y adaptabilidad relativas a diferentes situaciones.

Por otra parte, en la preselección siempre cabe analizar el posible rechazo de aquellas especies con exigencias o tolerancias estrictas conocidas respecto a algún fenómeno, característica o elemento ambiental del tipo:

- Edáfico: fertilidad, profundidad del suelo, aireación o permeabilidad, pH, abundancia de calcio, salinidad...
- Climático: luz (fotoperiodo y temperamento), humedad atmosférica, vientos costeros, secos o fuertes, tormentas de nieve...
- Biótico: presencia de micorrizas, susceptibilidad a plagas y/o enfermedades...

La preselección así planteada consiste en cualquier caso en un proceso en el que se van contrastando las características de las especies con las características ambientales de la zona y/o los requisitos pedidos, eliminando progresivamente aquellas que resulten claramente incompatibles o inadecuadas a cualquiera de ellas. Tan importante será por tanto conocer las condiciones ambientales y los requisitos pedidos como tener una información adecuada sobre las características de las especies que permita definir si son o no rechazables.

Con respecto a este último punto resulta muy útil disponer de un banco de datos que permita el acceso rápido y sencillo a la información referente a las características de las especies, y que sea fácilmente ampliable o actualizable. Si la información contenida en esta base de datos es lo suficientemente detallada podrá también ser utilizada en las etapas siguientes del proceso de selección (Tabla 16.XVI).

En la actualidad existen ya algunos programas de ordenador comercializados, diseñados para ayudar a seleccionar especies para determinados fines, que cuentan con una base de datos muy amplia en cuanto a número de especies se refiere. Como guía orientativa de la forma en

que puede diseñarse un banco de datos de este tipo puede consultarse el trabajo: «Selección y Cultivo de Plantas para la Recuperación de Terrenos Alterados por las Obras Viarias» (MOPU, 1986).

Un banco de datos utilizable en la fase de preselección puede constar de una ficha para cada especie en la que se indiquen:

- Nombre científico y vulgar.
- Grupo taxonómico al que pertenece.
- Grupos de vegetación potencial en que aparece, y series o pisos de vegetación en que se encuentra confinada.
- Restricciones del medio - limitaciones o requerimientos respecto:
 - Al clima: limitaciones altitudinales, térmicas y pluviométricas de su hábitat, etc.
 - Al suelo: pH, tolerancia al encharcamiento, las sales, la caliza activa, la baja fertilidad, etc.
 - Otros: micorrizas, resistencia a plagas, enfermedades, sustancias tóxicas, etc.

TABLA 16.XVI. CARACTERISTICAS Y CUALIDADES DE LEGUMINOSAS Y ROSACEAS

LEGUMINOSAS	RAPIDEZ DE GERMINACION	RAPIDEZ DE CREC. INICIAL	PODER TAPIZANTE	ENRAIZAMIENTO	CICLO DE VERDOR	LONGEVIDAD	CALIDAD	TOLERANCIA SOMBRA	SEMILLA COMERCIAL	SELECCION
<i>Anthyllis vulneraria</i>	M/A	M/A	B/M	B	M	A	M			
<i>Astragalus lusitanicus</i>	M	B	B	A	M	B	B			
<i>Biserrula pelecinus</i>	M/A	M/A	B	B	B	M	B			
<i>Cornicina anthyllis</i>	A	B	B	B	M	M	B			
<i>Lathyrus heterophyllus</i>	M	M/A	B	B/M	B/M	M	M			
<i>Lotus corniculatus</i>	M/A	M/A	B/M	M	M	A	A	X	X	
<i>Medicago minima</i>	M	M	B	B	B	B	B			
<i>Medicago sativa</i>	M/A	M/A	M	M	M/A	A	A		X	X
<i>Onobrychis sativa</i>	B/M	B/M	B/M	B/M	M	A	B		X	
<i>Ornithopus compressus</i>	M	A	B/M	B	B	M	B			
<i>Ornithopus pinnatus</i>	M	A	B/M	B	B	M	B			
<i>Psoralea bituminosa</i>	M/A	M/A	B/M	M	M/A	A	A		X	X
<i>Trifolium angustifolium</i>	A	M	B	M	B	B/M	B			
<i>Trifolium arvense</i>	A	M/A	M/A	M	B/M	M/A	A			
<i>Trifolium cherleri</i>	A	M	B/M	M	B/M	M/A	M			
<i>Trifolium isthmocarpum</i>	M	B/M	B	M	B	M	B			
<i>Trifolium repens</i>	A	M	M/A	M	M	M/A	A	X	X	X
<i>Trifolium spumosum</i>	A	M	M	M	B	B	M			
<i>Trifolium stellatum</i>	M	M/A	M	M	B	B	M			
<i>Trifolium subterraneum</i>	M/A	A	B/M	M	M/A	A	A	X	X	
<i>Vicia cracca</i>	M/A	M	B/M	M	M/A	A	M			
<i>Vicia sativa</i>	A	M	M	M/A	M	M	A		X	X
ROSACEAS										
<i>Sanguisorba minor</i>	M/A	B	M	A	A	A	A		X	X

A = Alta M = Media B = Baja X = Carácter positivo

- Carácter: autóctona, asilvestrada, o exótica.
- Forma de vida: árbol, arbusto...
- Aspectos relacionados con el paisaje: tamaño, tipo de follaje, floración, coloración estonal, etc.
- Cualidades para distintos fines y posibles aplicaciones: tapizante, ornamental, fruto con valor comercial, madera de calidad, mejoradora del suelo, etc.

También pueden almacenarse listas de especies que faciliten la búsqueda de algún tipo de información concreta,

especialmente la referente al cumplimiento de los objetivos o a la tolerancia a ciertas características ambientales:

- Especies que cumplen los requisitos exigidos por algún tipo de dedicación determinada del territorio (Tablas 16.XVII y 16.XVIII).
- Especies adaptadas a suelos calizos.
- Especies adaptadas a suelos calizos y yesosos.
- Especies adaptadas a suelos salinos y yesosos.
- Especies adaptadas a zonas costeras.
- Especies ripícolas, etc.

TABLA 16.XVII. ESPECIES ARBOREAS ESPECIALMENTE INDICADAS PARA UTILIZAR EN LA RECUPERACION DE ZONAS ALTERADAS POR EXPLOTACIONES MINERAS EN REGIONES TEMPLADAS CON FINES ORNAMENTALES Y PAISAJISTICOS

ESPECIES ARBOREAS	DEMANDA DE FERTILIZACION	ESPECIE FIJADORA DE NITROGENO	pH (*) TOLERANTE	NIVEL DE HUMEDAD TOLERANTE	TOLERANCIA CLIMATICA
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Media		N, B	Seco	Templado, calor
<i>Alnus glutinosa</i>	Baja	X	A, N, B	Húmedo	Templado
<i>Alnus icana</i>	Baja	X	N, B	Húmedo	Templado
<i>Betula pendula</i>	Baja		N, B	Húmedo	Templado
<i>Betula pubescens</i>	Baja		A, N, B	Húmedo	Templado
<i>Fagus sylvatica</i>	Media		A, N, B	Húmedo	Templado
<i>Fraxinus excelsior</i>	Media		N, B	Seco	Templado
<i>Juniperus virginiana</i>	Baja		A, N, B	Seco	Templado, calor
<i>Larix leptolepis</i>	Baja		A, N, B	Seco	Templado
<i>Pinus banksiana</i>	Baja		A, N	Seco	Templado
<i>Pinus nigra</i>	Baja		A, N, B	Seco	Templado, calor
<i>Pinus rigida</i>	Baja		A, N	Seco	Templado, calor
<i>Pinus strobus</i>	Media		A, N, B	Seco	Templado, calor
<i>Pinus sylvestris</i>	Baja		A, N, B	Seco	Templado, seco
<i>Platanus occidentalis</i>	Media		N, B	Húmedo	Templado, calor
<i>Populus tremula x tremuloides</i>	Media		A, N, B	Húmedo	Templado
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Baja	X	A, N, B	Seco	Templado, calor
<i>Salix caprea</i>	Baja		A, N, B	Húmedo, seco	Templado

(*) A: Acido; N: Neutro; B: Básico.
Fuente: Bradshaw and Chadwick, 1980.

TABLA 16.XVII (Continuación)

ESPECIES ARBOREAS	DEMANDA DE FERTILIZACION	ESPECIE FIJADORA DE NITROGENO	pH (*) TOLERANTE	NIVEL DE HUMEDAD TOLERANTE	TOLERANCIA CLIMATICA
<i>Salix cinerea</i>	Baja		A, N, B	Húmedo, seco	Templado
<i>Salix purpurea</i>	Baja		A, N, B	Húmedo	Templado
<i>Salix viminalis</i>	Media		N, B	Húmedo	Templado
<i>Sorbus aucuparia</i>	Baja		A, N, B	Seco	Templado
<i>Thuja occidentalis</i>	Media		N, B	Húmedo, seco	Templado

Otra posible vía a seguir para la preselección de especies es el estudio de la dinámica de la vegetación en la zona. Si se conoce la etapa serial actual de la vegetación y la secuencia de comunidades de sustitución presentes en la zona alterada (unidad ecológicamente homogénea) que se desea repoblar, puede obtenerse una primera lista de candidatas con las especies de la serie a partir de dicha etapa.

Este procedimiento de selección resulta muy útil cuando

entre los objetivos prioritarios se encuentra el establecimiento de una vegetación de carácter estable que preserve y mejore la calidad de los recursos naturales (caso de la conservación por ejemplo). Su utilización puede verse limitada por la falta de estudios sinfitosociológicos a la escala adecuada, o por la incompatibilidad de las especies de la serie con la consecución de los objetivos. En este último caso deberá contemplarse la posible utilización de especies exóticas.

TABLA 16.XVIII. ESPECIES ARBOREAS SELECCIONADAS PARA RESTAURAR ZONAS MINERAS. FINES PRODUCTIVOS

ESPECIES	CONDICIONES EDAFICAS				RESIDUOS CALCA-REOS	LIMITACION ALTITUDINAL (m)	NIVEL DE PRODUCCION ESTIMADA (m ³ /ha/año)	ESPECIE PALATABLE	ESPECIE FIJADORA NITROGENO	TOLERANCIA A:				OBSERVACIONES
	ARENOSOS		ARCILLOSOS							TEMPERATURA	EXPOSICION	HELADAS	CONTAMINACION INDUSTRIAL	
	DRENADOS	NIVEL FREATICO ALTO	pH >6	pH <6										
<i>Laxis decidua</i>	X					8-12	Si	No	Frio	Media	Baja	Media		
<i>Pinus nigra</i>	X		(X) (1)	X	X	250	No	No	Calor	Alta	Baja	Alta	Tolerante al aire salobre	
<i>Acer platanoides</i>			X		X	4-8	Si	No	Frio o Calor	Baja	Alta	Alta		
<i>Acer pseudoplatanus</i>			X	X	X	4-8	Si	No	Frio o Calor	Alta	Alta	Alta		
<i>Alnus cordata</i>	X	X	X	X	X	8-12	Si	Si	Frio	Media	Baja	Alta		
<i>Alnus glutinosa</i>		X	X	X	X	6-10	Si	Si	Frio	Media	Alta	Alta		
<i>Alnus incana</i>	X	X	X	X		8-12	Si	Si	Frio	Media	Alta	Alta		
<i>Fraxinus excelsior</i>			X		(X) (1)	4-6	Si	No	Frio	Baja	Baja	Media	Para desarrollarse bien requiere zonas profundas y fértiles	
<i>Pinus radiata</i>	X			X		100	Si	No	Calor	Baja	Baja	Baja	Tolerante al aire salobre	

¹ Calificación marginal.
Fuente: Wilson, 1985. (Modificado.)

3.1.1. UTILIZACION DE ESPECIES EXOTICAS

El concepto de «especie exótica» no debe entenderse con límites políticos, sino estrictamente ecológicos e históricos (MONTROYA, 1984). Es evidente que algunas especies exóticas presentan caracteres que pueden ser muy valiosos para determinados fines (recreo, ornamental), deberán, por tanto, incluirse entre la lista de candidatas a la selección, y ser valoradas posteriormente de forma integral, como cualquier otra de las seleccionadas. Tan absurdo resulta el excluir a priori la posibilidad de su utilización para determinados fines, como el propugnar su introducción sin valorar la viabilidad y consecuencias de la misma. La cuestión no es, por tanto, rechazar a las exóticas por no estar presentes en la sucesión natural, ni justificar su utilización por su supuesta posible inclusión en tales series, sino conocer su comportamiento y efectos bajo un conjunto de condiciones ambientales dadas. Este conocimiento, en general, sólo podrá lograrse mediante el estudio de las especies en parcelas experimentales durante un período de tiempo significativo en términos de vegetación.

Para utilizar estas especies se necesita:

- Conocer mejor las exigencias de las especies utilizadas con el fin de instalarlas en la estación adecuada, lo que supone un estudio previo de introducción y la diversificación de las mismas.
- Conocer los agentes patógenos bióticos y abióticos que puedan dañar a estas especies lo que supone saber de su biología y de sus sistemas de combate y de prevención.

Asimismo, se deberá tener presente el posible impacto de las especies en la ecología del lugar donde se preten-

den introducir y sus efectos sobre suelos, régimen hídrico, vegetación natural y vida silvestre, sin olvidar los posibles riesgos sanitarios que pueden acarrear, así como su efecto paisajístico:

- Pueden introducirse plagas que pueden incluso atacar con violencia a las especies espontáneas.
- Pueden introducirse especies que acaban comportándose como peligrosas invasoras.
- Pueden producirse daños a recursos naturales ecológicos valiosos (contaminación genética, competencia ecológica o económica).
- Pueden producirse daños imprevistos en el ecosistema, pues aunque las especies introducidas puedan estar incluso mejor adaptadas al medio que muchas de las espontáneas, éstas, aún las más inadaptadas están integradas en el ecosistema, a diferencia de las introducidas, cuyos efectos a largo plazo suelen ser imprevisibles (Montoya, 1984).

Las observaciones presentadas corroboran la necesidad de basar la posible utilización de las especies exóticas sobre conocimientos válidos tanto en sus exigencias respecto al medio, como de sus efectos sobre el mismo. Cuando la falta de datos es un impedimento práctico queda patente la necesidad de investigación, y, en su defecto, aconseja obrar con la máxima cautela; la utilización de especies autóctonas en estos casos parece recomendable para, en la medida de lo posible, prevenir y evitar los riesgos mencionados.

En esta línea de la «preselección» se presenta la Tabla 16.XIX en la que se refleja una relación de algunas especies arbóreas autóctonas y exóticas para las que se da cierta información relativa a las posibles limitaciones de índole general que les afecta.

TABLA 16.XIX. HABITABILIDAD EDAFICA DE ALGUNAS FRONDOSAS

ESPECIE	CONDICIONES OPTIMAS	TIPOS DE SUELOS PREFERENTES	CONDICIONES ADVERSAS	GENERALIDADES
Acer platanoides L. (Arce)	Suelos fértiles, incluyendo suelos calcáreos o tierras bajas yesosas	Tierras pardas básicas. Tierra parda calcárea. Tierra parda arcillosa	Todos los suelos no fértiles y ácidos (fuertemente ácidos)	Especie usada en suelos calcáreos someros
Acer pseudoplatanus L. (Sicomoro)	Suelos francos, fértiles y bien drenados en zonas ricas en nitrógeno y fósforo	Tierra parda básica. Rendzinas (s. someros). Tierras pardo calcáreas. Tierra parda arcillosa. S. gley calcáreos, profundos y superficiales	Como el fresno, pero soporta mejor zonas expuestas	Frecuentemente persistente a las heladas. Resiste la exposición y la contaminación de humos. Se usa en monte alto y como pantallas resistentes al viento, mezclados con coníferas. Vegeta bien en zonas de arcillas grises. Fácil regeneración natural. Puede llegar a ser una sp. invasora

TABLA 16.XIX (Continuación)

ESPECIE	CONDICIONES OPTIMAS	TIPOS DE SUELOS PREFERENTES	CONDICIONES ADVERSAS	GENERALIDADES
<i>Alnus glutinosa</i> L. (Aliso)	Especie muy dura y que resiste condiciones extremas, aunque prefiere suelos húmedos. Puede soportar crecidas o avenidas. Típicos de ribera	Tierras pardas básicas. Tierras pardas (podzoles). Suelos antropizados. Suelos tipo gley (pobre aireación del subsuelo). Litosuelos	No es apropiado para suelos turbosos muy ácidos y pobremente aireados o en suelos arenosos, ácidos y secos	Resiste condiciones de humedad extrema
<i>Betula pubescens</i> Ehrh. <i>Betula pendula</i> Rothm. (Abedul)	Prefiere suelos ligeros en zonas secas. Ambas especies pueden crecer bien en suelos relativamente poco fértiles	Tierras pardas básicas. Suelos antropizados. Podzoles. S. tipo gley típicos (superficiales y profundos). S. gley pardo superficial. S. gley podzol superficial. Tierras calizas	No deben plantarse en zonas donde no se puedan realizar limpiezas por razones silvícolas	Se suelen usar como protectores de coníferas sensibles a las heladas, o en bosques de hayas o robles, siendo necesario cortarlas después de pocos años. Apropriados para plantaciones en monte alto. Indicados para plantar en zonas o recuperar y para recreo. Necesitan cuidados especiales en el transplante.
<i>Castanea sativa</i> Mill. (Castaño)	Necesita un suelo profundo, fértil y ácido. Mejor en zonas cálidas y soleadas	Tierras pardas típicas. Tierras pardas básicas. Tierras pardas podzólicas. Tierras pardas arcillosas	Inapropiado para suelos poco fértiles, con riesgo de heladas o zonas expuestas, mal drenadas o arcillosas compactas	Cuando la producción es para madera, no debería dejarse que alcancen gran tamaño, debido al riesgo de caída. Se utiliza como sp. resistente al fuego, en tierras bajas de brezales
<i>Fagus sylvatica</i> L. (Haya)	Suelos francos de cualquier tipo, si el drenaje es bueno	Tierras pardas arcillosas. Tierras pardas básicas. Suelos pardos (arcilloso). Suelos podsólicos. Rendzinas	Evitar suelos densos, zonas mal drenadas, suelos muy someros y lavados. Evitar también las depresiones (valles con riesgos de heladas)	Las hayas comúnmente se asocian con zonas calizas, pero sin embargo, a veces crece bien en suelos ácidos. Necesita cuidados en áreas expuestas, durante su juventud se planta bajo cubierta. Tolera la contaminación de humos.

TABLA 16.XIX. (Continuación)

ESPECIE	CONDICIONES OPTIMAS	TIPOS DE SUELOS PREFERENTES	CONDICIONES ADVERSAS	GENERALIDADES
Fraxinus excelsior L. (Fresno)	Buenas condiciones de suelo. Buen crecimiento en suelos francos calcáreos, profundos y húmedos, pero bien drenados. Medran en yesos y calizas cuando el suelo es profundo	Tierras pardas básicas. Suelos calizos (calcáreos y arcillosos) S. tipo gley calcáreo. Suelos pantanosos	Evitar suelos secos o someros de prados, matorrales o eriales, mal drenados y las zonas arcillosas duras. Evitar, también, depresiones con riesgos de heladas y situaciones de fuerte exposición.	No son sp. adecuadas para plantaciones a gran escala, o para usar en áreas muy expuestas. Es raro conseguir condiciones óptimas excepto en pequeñas áreas, esas zonas deben elegirse con gran cuidado. A menudo los mejores árboles se consiguen en bosques mixtos.
Juglans regia L. Juglans nigra L. (Nogal)	Suelos profundos, francos, fértiles y con buen drenaje. Zonas resguardadas cálidas	Tierra parda básica Gley calcáreo (superficial). Tierra parda arcillosa	En general los suelos poco fértiles, las zonas expuestas y los suelos someros con posibilidades de heladas	Muy susceptibles a las heladas de primavera
Populus nigra L. (Chopo)	Crece bien en un amplio rango de suelos, pero el crecimiento óptimo para producción se da en suelos de tipo franco y en situaciones más o menos protegidas. Suelos aluviales ricos o pantanosos (marjales) bien drenados y con buena disponibilidad de agua. El pH del suelo debería rondar el 5,5. Típico de riberas	Tierras calizas. Suelos pardos tipo gley. S. calcáreos tipo gley. S. pantanosos, marjales. Gley podsolizado (en superficie). Tierras pardas arcillosas	Evitar zonas elevadas y expuestas y suelos someros. No se desarrolla bien en aguas estancadas; las avenidas ocasionales no son perjudiciales. Evitar turbas ácidas y zonas de brezales	Altamente tolerante a la contaminación atmosférica. Se suelen plantar para bordar zonas abandonadas. Los chopos plantados para producción de madera deben estar separados de 6 a 8 m. Si la dedicación es para combustible o pasta de papel pueden plantarse más juntos.
Prunus avium L. (Cerezo silvestre)	Suelos de bosque, fértiles; también suelos francos y profundos, sobre yesos	Tierra parda básica. Rendzinas (S. someros). Tierras pardas calcáreas	Suelos fuertemente ácidos, compactados y arcillosos densos (pesados)	Uno de los pocos árboles con floración «vistosa» y que produce buena madera. Se usa como acompañante en los bosques de hayas o robles.
Quercus robur L. Quercus petraea (Matt.) (Roble)	Suelos francos, profundos, fértiles y bien aireados. Pueden crecer bien en suelos pesados y margosos	Tierras pardas básicas. Gley superficial típico. Gley pardo. Tierra parda arcillosa	Evitar suelos someros y mal drenados o suelos poco fértiles. No se desarrollan bien en áreas muy expuestas y ondonadas con riesgo de heladas	El Q. robur tolera menos los suelos ricos en bases que el Q. petraea. Ambas sp. son muy estables al viento

TABLA 16.XIX. (Continuación)

ESPECIE	CONDICIONES OPTIMAS	TIPOS DE SUELOS PREFERENTES	CONDICIONES ADVERSAS	GENERALIDADES
Quercus rubra L. (Roble americano)	Necesita suelos más fértiles que los anteriores	Tierra parda típica. Tierra parda básica. Tierra parda podsolizada. Gley típico (superficial). Gley pardo. Tierra parda arcillosa	Evitar cualquier suelo con baja fertilidad	En general producen una buena madera (aun en suelos pobres). Tiene un alto valor ornamental, por su colorido otoñal
Salix alba. (Sauce)	Suelos fértiles aluviales. Típico de márgenes de ríos o cursos de agua	Gley superficial pardo. Gley superficial calcáreo	Ninguna otra condición que no sea la descrita	
Tilia cordata Mill. Tilia platyphyllos Scop. (Tilo)	Zonas fértiles y resguardadas	Tierra parda básica. Tierras calizas	Evitar suelos pocos fértiles. No tolera exposiciones altas	Especies estables al viento. Raramente se consigue semillas viables. Se puede usar como árbol de alineación para reemplazar al olmo
Ulmus glabra Huds. (Olmo)	Suelos fértiles, profundos, francos y humedad ligera	Tierra parda arcillosa	Evitar cualquier suelo con baja fertilidad	Prospera bien en las zonas de montaña. Resistente a las heladas y a los vientos

3.2. Valoración de especies

Una vez que se han eliminado, en la etapa de preselección, aquellas especies que no cumplen los requisitos mínimos exigidos, habrá que valorar cuál o cuáles de las candidatas seleccionadas son las más idóneas para llevar a cabo la repoblación que se pretende realizar. La «idoneidad» de cada especie depende de la forma y

el grado con que satisfaga los requisitos de adecuación a los objetivos y al medio.

Para la elección final de una determinada especie es, pues, necesario analizar previamente todos estos aspectos con cada una de las especies candidatas.

Si a lo largo del análisis se detecta que la especie no cumple algunos de los requisitos necesarios se rechazará su «candidatura» (Tabla 16.XX).

TABLA 16.XX. ALGUNAS ESPECIES FIJADORAS DE NITRÓGENO ADECUADAS EN LA RECUPERACION DE TERRENOS MINEROS

ESPECIES	FISONOMIA	TOLERANCIA pH	PREFERENCIA CLIMATICA	REQUERIMIENTOS DE AGUA	VIDA MEDIA (AÑOS)	NECESIDAD DE ESCARIFICACION DE LAS SEMILLAS
Alnus glutinosa	Arbol	Amplia	Amplia	Humedad	50+	
A. incana	Arbol	Amplia	Amplia	Sequedad	50+	
A. rubra	Arbol	Amplia	Amplia	Amplia	50+	
A. cordata	Arbol	Básico	Amplia	Amplia	50+	
Robinia pseudoacacia	Arbol	Acido	Amplia	Sequedad	50+	+
Cytisus scoparius	Matorral	Acido	Amplia	Sequedad	8	+
Melilotus sp.	Herbácea	Básico	Calor	Sequedad	2	
Coronilla varia	Herbácea	Básico	Amplia	Sequedad	10	
Medicago sativa	Herbácea	Básico	Amplia	Sequedad	5	
Lathyrus sylvestris	Herbácea	Amplia	Calor	Sequedad	20+	+
Galega officinalis	Herbácea	Amplia	Calor	Sequedad	10	

Fuente: DF Fourt (Personal Communication); y Bradshaw and Chadwick (1980) (Modificado).

3.2.1. ADECUACION DE LAS ESPECIES AL MEDIO

Uno de los requisitos necesarios para poder utilizar una especie es obviamente que ésta sea capaz de sobrevivir y desarrollarse bajo las condiciones ambientales locales. En este sentido la especie será tanto más adecuada cuanto mayor sea la vitalidad (grado de vigor y prosperidad) que alcance y cuanto más quede asegurada su estabilidad (permanencia).

La permanencia de la vegetación instaurada, aunque puede no ser deseable a largo plazo (caso de las herbáceas exóticas), deberá mantenerse al menos a lo largo del tiempo que se fije para cumplir los objetivos que se persigan. La estabilidad de la vegetación introducida va ligada a su adaptación con el resto de sus factores bióticos y abióticos del medio en que se instaure y a su capacidad para resistir los períodos o agentes desfavorables que puedan presentarse.

Ruiz de la Torre (1976) cita entre las condiciones que favorecen la estabilidad de las especies y las comunidades:

- El carácter autóctono de las estirpes integrantes de la biocenosis. Ausencia o rareza de foráneos, en el último caso estabilizados y sin manifestar agresividad.
- Adecuación al ámbito mesológico por parte de las estirpes.
- Control recíproco de organismos antagónicos.
- Progresión avanzada.
- Diversidad elevada.
- Aislamiento (con relación a sistemas inestables) en espacio y tiempo.
- Madurez y estabilidad del suelo.
- Reproducción mixta (por semilla y vegetativa) de las especies principales.



Foto 16.3. Escombrera de dolomía en el Valle de Padul. Granada.

A parte de estas consideraciones genéricas debe tenerse en cuenta que, en última instancia, la habilidad de una especie en particular para desarrollarse en un ambiente determinado depende de su capacidad para expresar su potencial genético a través de su fisiología dentro del medio al que está expuesta (Daniel et al., 1982).

El estudio ecofisiológico del desarrollo de las plantas (árboles, arbustos, etc.) contempla el análisis de las

interacciones de los factores fisiológicos y ambientales básicos que aparecen en la Fig. 16.9. Los factores ambientales pueden incidir sobre los procesos fisiológicos y morfológicos de forma directa o bien indirectamente, al condicionar la magnitud de ellos.

La valoración dependerá, por tanto, de la información de que se disponga sobre el medio, las especies y sus interacciones. En cuanto a estas últimas por lo general la información es bastante deficiente; los datos sobre las exigencias y tolerancias de las especies respecto a los factores ambientales son escasas o imprecisas, y la posible influencia de muchos de ellos sólo es conocida parcialmente por lo que a veces sólo pueden tenerse en cuenta algunos aspectos: acción indirecta sobre otros factores o influencia no cuantificada sobre ciertos procesos de los que se conocen sus principios generales.

Por ejemplo, cada especie vegetal tiene un rango de temperatura para el cual vegeta de forma óptima y de forma asociada, un límite superior e inferior de temperatura, que condiciona cada una de sus funciones fisiológicas básicas de su desarrollo general. Así estos datos pueden ser o no conocidos, pero se sabe que este factor temperatura actúa directamente sobre las plantas y condiciona la velocidad con la que llevan a cabo sus procesos fisiológicos, e indirectamente de muchos otros modos: la temperatura incrementa la transpiración y origina pérdidas notables de la humedad del suelo a través del bombeo de agua a la atmósfera mediante la transpiración.

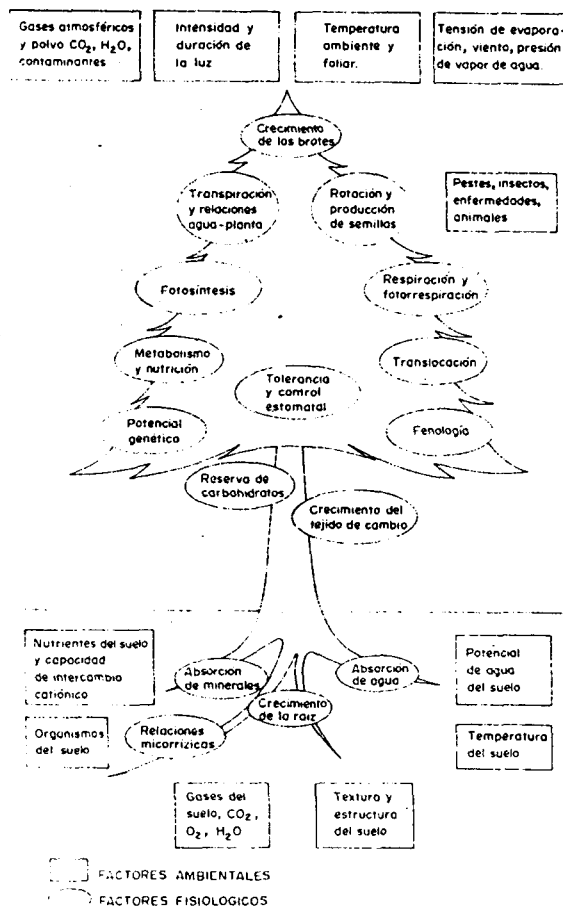


Figura 16.9. Factores fisiológicos y ambientales. (Daniel et al., 1982).

— Las características de los factores ambientales primarios: luz, temperatura, concentración de CO_2 en la atmósfera y en el suelo, disponibilidad de nutrientes, disponibilidad de agua y pérdidas por evapotranspiración, etc. El estudio de estos factores debe evidentemente contemplar las características ambientales que lo condicionan: no es posible, por ejemplo, valorar la disponibilidad de agua sin considerar las características edáficas o las pérdidas por escorrentía determinadas por la pendiente, la intensidad de la luz sin considerar la orientación y la pendiente, etc. En general, puede decirse que en la práctica se menosprecia la influencia de los factores edáficos frente a los climáticos, quizá por que su toma en consideración requiere estudios más laboriosos o por que se desconoce su importancia; esta circunstancia puede llevar a interpretaciones erróneas del medio, respecto a la selección de especies.

— La caracterización de estos factores debe incluir sus valores tanto medios como extremos, y la distribución, frecuencia, y variación de estos valores, ya que éstas pueden condicionar el desarrollo de la especie e incluso determinar su supervivencia. Las exigencias y tolerancias de las especies, así como sus procesos vitales, sufren variaciones rítmicas, normalmente asociadas a los ritmos climáticos, por lo que es necesario comprobar que el aumento de resistencias y los procesos de desarrollo estén sincronizados con los fenómenos rítmicos que se dan en el medio (Larcher, 1977). Fig. 16.10.

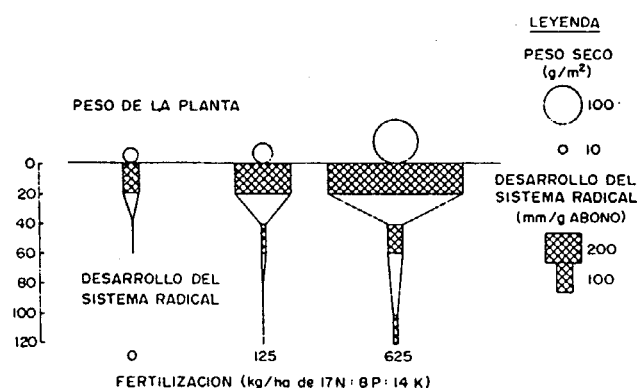


Figura 16.10. Relación entre la fertilización de una escombrera y el desarrollo de su sistema radical.

En caso de que se detecten factores ambientales desfavorables para la introducción de la especie, deberá estudiarse hasta qué punto es posible paliar su efecto mediante las técnicas de preparación del terreno y los tratamientos silvo-pascícolas conocidos (Evans, 1984 (a)). En estos casos también podrá considerarse la posibilidad de superar estos factores desfavorables mediante la mejora genética de la especie en la dirección deseada (Pardos y Gil, 1986).

3.2.2. ADECUACION DE LAS ESPECIES A LOS OBJETIVOS

El logro de los objetivos o finalidades con que se planea la recuperación o restauración de un área minera requiere que las especies que se empleen en la misma reú-

nan ciertas características o cualidades. Por tanto, el valor de una determinada especie en este aspecto depende básicamente de cómo y en qué grado cumple los requisitos que condicionan la consecución de estos objetivos en el medio en cuestión.

La valoración debe tener en cuenta:

- Cada uno de los objetivos previstos.
- La posible influencia de las condiciones ambientales que rodean la mina en las características que se valoran de las especies y, por tanto, en la adecuación de éstas a los objetivos.
 - Distribución y eficacia de las precipitaciones, duración del día, etc., edáficos (fertilidad, profundidad del suelo, etc.).
- La posible mejora que podría introducirse en la consecución de los objetivos con las técnicas de preparación del terreno y los métodos de implantación de la vegetación.
- El papel que juega la especie en la consecución de los objetivos puede concebirse como un aspecto más en la explotación de un sistema multiuso (caso de un sistema silvopastoral, por ejemplo), como una etapa necesaria y transitoria (en un plan de restauración...).

TABLA 14.XXI. MEZCLAS DE GRAMINEAS Y LEGUMINOSAS DE INTERES PARA DIFERENTES TIPOS DE USO EN ZONAS DE CLIMAS TEMPLADOS (Según Williamson et al., 1982)

ESPECIE	RESPUESTA
Cynodon dactylon/Melilotus alba	Alto grado de cubierta en lugares de baja fertilidad (será necesario fertilizaciones suplementarias).
Festuca sp./Medicago sativa/Trifolium pratense	Alta producción de pasto si es posible la fertilización de la zona.
Festuca sp./Coronilla varia	Grado de cubierta alto.
Festuca sp./Melilotus alba	Cubierta de alta densidad sobre terrenos poco fértiles.
Lolium perenne/Trifolium pratense/Medicago sativa	Producción muy alta, pero es necesario un alto nivel de mantenimiento.
Agrostis palustris/Melilotus alba	Cubierta alta densidad en sustratos poco fértiles.
Panicum virgatum/Lespedeza sp.	Cubierta de alta densidad en sustratos de moderada a baja fertilidad.
Eragrostis curvula/Lespedeza sp.	Grado de cubierta moderado en sustratos de muy baja fertilidad.

3.2.3. ADECUACION DE LA ESPECIE A LAS DIRECTRICES Y RESTRICCIONES DE DISEÑO

Bajo este epígrafe genérico se presenta la idea de considerar la compatibilidad y grado de adecuación de la especie a todas aquellas directrices y restricciones de diseño bajo las que se concibe el proyecto de restauración.

Es el uso potencial de la zona minera restaurada el que pone ciertas condiciones a las especies seleccionadas previamente. Casi todo lo que se ha expuesto hasta aquí hace mención expresa a la selección de especies naturales o naturalizadas y conviene puntualizar que todo lo dicho sirve para especies de todo tipo: arbóreas, arbustivas, subarbustivas, herbáceas, etc. Es decir, si se vuelve a la Fig. 16.2 las restricciones de diseño están presentes en los criterios ecológicos, en los paisajísticos y en los económicos y hacen referencia tanto a los aspectos técnicos: métodos y modos de disponer las especies vegetales en la zona a restaurar, como a los aspectos funcionales y estructurales del nuevo escenario creado.

Claro está que los criterios paisajísticos son los que más importancia tienen en esta adecuación: especies que cumplen paisajísticamente la función para la que han sido seleccionadas, pero no hay que olvidar que aun dentro de los criterios económicos un mal diseño, fundamentalmente en la estructura espacial de disposición de las especies seleccionadas, puede dar al traste con la consecución de los objetivos, piensese en objetivos productivos de ámbito forestal donde una disposición muy junta de los árboles o muy abierta puede resultar perjudicial para su propia supervivencia.



Foto 16.4. *Globularia alypum* (Globulariaceas) en una cantera de caliza.

3.2.4. OTROS FACTORES QUE PUEDEN CONDICIONAR LA UTILIZACION DE LA ESPECIE

A parte del estudio de la especie frente al medio y los objetivos, deben considerarse los aspectos técnicos, económicos, sociales, culturales e incluso jurídicos que pueden condicionar su selección.

Entre los factores mencionados, cabe destacar por su importancia:

- La disponibilidad de la especie: el suministro de una cantidad suficiente de plantas o semillas de las especies deseadas puede fallar por diversos motivos: por tratarse de una especie rara, por ser por la procedencia o el origen de las semillas difíciles de obtener, por una baja producción de semillas esos años, por pérdidas en los viveros, etc. Aunque la disponibilidad no debería dictar la selección de especies conviene considerarla (Evans, 1984 (a)), especialmente cuando se trata de una especie no comercializada. En este caso debe plantearse la posibilidad de su obtención ya sea en la naturaleza o en vivero, incluso con perjuicio para el propio comienzo de la ejecución del proyecto de restauración.
- La falta de conocimientos sobre la instalación y manejo de alguna especie. Esta circunstancia no resta valor a la especie en sí, pero puede suponer en la práctica un serio inconveniente. La aplicación de técnicas más o menos estandarizadas puede reducir el éxito de la restauración.

3.3. Especies idóneas

Tras el análisis de los distintos aspectos que definen o condicionan la adecuación de cada una de las posibles especies candidatas a la repoblación proyectada queda, como última fase del proceso de selección, su valoración comparativa para elegir entre ellas las más idóneas (puede resultar una única especie).

Pueden seguirse distintos métodos para llevar a cabo este proceso de optimización en el que entran en juego gran número de variables o factores; pero, en cualquier caso, habrá que exigir unos niveles o requisitos mínimos a cada uno de los factores considerados en la valoración y una jerarquía entre ellos, para que la optimización sea factible.

En este sentido, Brunig (1984) hace las siguientes recomendaciones:

- Tender a la máxima diversidad biológica, actividad y complejidad de organización compatible con los objetivos.
- Considerar los efectos y rendimientos a corto, medio y largo plazo en la valoración de las especies alternativas.
- Evitar optimizaciones a un objetivo único definido; en general la optimización no se logra con un objetivo único, y puede que ni siquiera con uno prioritario. Aplicar, por el contrario, unos principios de optimización amplios que tiendan a lograr:
 - La supervivencia y mantenimiento en el tiempo de la vegetación.
 - Una alta capacidad de amortiguación de la vegetación y el suelo (lo que dará al ecosistema una menor fragilidad).
 - Una alta adaptabilidad técnica y económica en el manejo.
 - Gran flexibilidad en la obtención de productos ante la posible variación de las condiciones económicas (y/o ambientales) (flexibilidad ante la demanda).

- No olvidar que los fallos en el logro de los objetivos se deben principalmente a la inestabilidad creada por las estructuras ecológicamente inadecuadas de la comunidad y por los fenómenos adversos poco frecuentes (inesperados o impredecibles).

Estas recomendaciones, aun siendo muy generales, pueden servir como guía orientativa a la hora de establecer criterios.

En general, la dificultad estriba en el hecho de que en la valoración intervienen factores que no pueden medirse con la misma métrica o que son difíciles de cuantificar (estabilidad, adaptación, etc.).



Foto 16.5. *Piptatherum miliaceum* (Graminea).

4. ESTUDIO DE UN CASO PRACTICO

4.1. Introducción

Como resumen a este apartado se presenta el proceso seguido para la selección de especies para restaurar áreas mineras a nivel de detalle de proyecto de unas áreas alteradas por extracciones de minerales en la provincia de Alava. El objetivo consistía en la integración de estas zonas en el paisaje circundante para ser aprovechadas bajo un uso extensivo por actividades agrarias (pastoreo) y recreativas (caza).

Es difícil hablar de integración en un paisaje si previamente no se ha estudiado éste y se ha diferenciado, en su análisis, sus elementos y componentes.

La vegetación es uno de ellos y su descripción es importante ya que así se conoce el ambiente general del entorno, pero se necesita algo más, bajar de escala y llegar a interpretar el reparto de la vegetación: de una parte en el medio, microcomunidades edáficas y fisiográficas, y de otra, quién compone estas comunidades y su reparto en el espacio. De su conocimiento se podrán establecer modelos que se plasmen en el espacio real y que lo imiten, esa es la intención. Su función, estabilidad y dinámica se escapa de las manos. En esta línea se recomienda diseñar un plan de seguimiento y control de las áreas restauradas que con el tiempo complemente la información y ayude a corregir, y no arrastrar, los errores que se pueden cometer en este proyecto.

Los objetivos del proyecto se pueden alcanzar mediante una selección adecuada de especies vegetales, que se basará en los estudios de las características generales del medio. Un esquema del proceso de selección de especies vegetales se especifica en la Fig. 16.10.

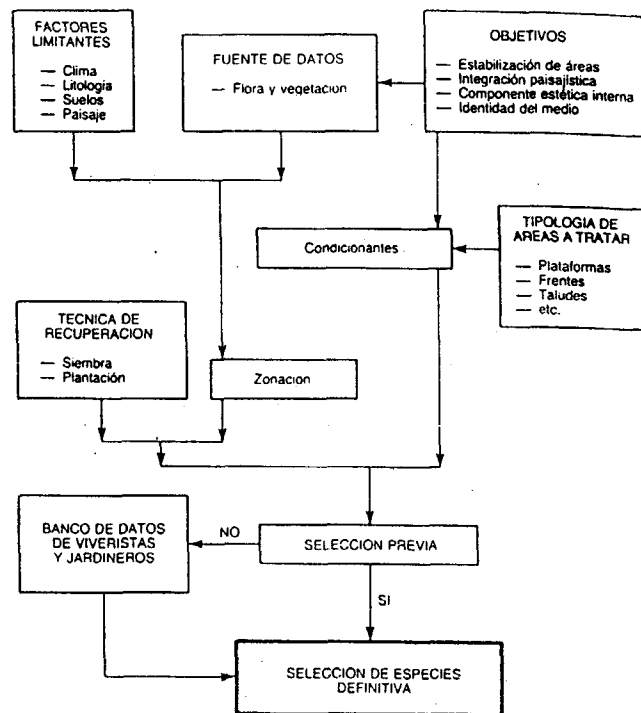


Figura 16.10. Selección de especies vegetales.

En ella se combinan los *factores limitantes* constituidos por el medio, con la fuente de datos que es el material relativo a la vegetación disponible en primera instancia, de lo que resultará una zonación en la que se detallará el rango de variación ecológica de las especies. Estas, según se planten o siembren, tendrán una disponibilidad diferente para adquirirlas en el mercado; habrá especies muy interesantes no comercializadas con las que se podrán contar en principio.

De los *objetivos del proyecto* y de las *diferentes áreas a tratar* surgen los *condicionantes* que marcarán el uso de la vegetación y, por tanto, la *selección previa* de las especies. En el caso de que no hubiera resultado elegida ninguna especie o no existiera, dado el tipo de condicionantes, habría que recurrir a las especies que pueden facilitar los viveristas y jardineros, si esto no sucediera se dispone de la selección de especies definitiva.

El criterio que se ha manejado para llegar a la zonación en el caso del presente proyecto ha sido el de utilizar las formaciones descritas en el estudio de la flora y vegetación del proyecto como base para seleccionar las especies, de manera que se han seleccionado especies de todas ellas.

Conocidos los condicionantes de la zona que básicamente vienen dados por las diferentes áreas a tratar, la selección definitiva de especies se presenta en las Tablas 16.XXII a 16.XXIV.

TABLA 16.XXII. AGRUPACIONES VEGETALES

VALLES SUBMEDITERRANEOS

BOSQUES	MATORRAL	AGRUPACIONES HERBACEAS
<p>QUEJIGAL <i>Quercus faginea</i>. <i>Ilex aquifolium</i>. <i>Acer campestre</i>. <i>Crataegus monogyna</i>. <i>Genista hispanica</i>. <i>Erica vagans</i>. <i>Arctostaphylos uva-ursi</i>. <i>Rosa arvensis</i>.</p>	<p><i>Rubus ulmifolius</i>. <i>Sambucus nigra</i>. <i>Viburnum lantana</i>. <i>Ligustrum vulgare</i>. <i>Prunus spinosa</i>. <i>Lonicera etrusca</i>. <i>Buxus sempervirens</i>. <i>Thymus vulgaris</i>.</p>	<p><i>Lolium perenne</i>. <i>Brachypodium pinnatum</i>. <i>Trifolium repens</i>. <i>Brachypodium retusum</i>. <i>Bromus erectus</i>. <i>Festuca rubra</i>. <i>Lotus corniculatus</i>. <i>Sanguisorba minor</i>. <i>Medicago sativa</i>. <i>Onobrychis viciifolia</i>.</p>
<p>ENCINAR <i>Quercus ilex</i>. <i>Phyllirea angustifolia</i>. <i>Viburnum tinus</i>. <i>Arbutus unedo</i>. <i>Ligustrum vulgare</i>. <i>Juniperus communis</i>. <i>Hedera helix</i>. <i>Clematis vitalba</i>.</p>	<p><i>Quercus coccifera</i>. <i>Rhamnus alaternus</i>. <i>Genista scorpius</i>. <i>Dorycnium pentaphyllum</i>. <i>Arctostaphylos uva-ursi</i>. <i>Osyris alba</i>. <i>Lavandula latifolia</i>.</p>	<p><i>Avenula bromoides</i>. <i>Koeleria vallesiana</i>.</p>

TABLA 16.XXIII. AGRUPACIONES VEGETALES

MONTAÑAS MERIDIONALES

BOSQUES	MATORRAL	AGRUPACIONES HERBACEAS
<p>QUEJIGAL-ROBLEDAL CALCICOLA <i>Quercus faginea</i>. <i>Quercus pubescens</i>. <i>Acer monspessulanum</i>. <i>Buxus sempervirens</i>. <i>Amelanchier ovalis</i>. <i>Corylus avellana</i>. <i>Crataegus monogyna</i>. <i>Spyrea hispanica</i>.</p>	<p><i>Viburnum lantana</i>. <i>Lonicera etrusca</i>. <i>Prunus mahaleb</i>. <i>Arctostaphylos uva-ursi</i>.</p>	<p><i>Brachypodium pinnatum</i>. <i>Festuca gr. rubra</i>. <i>Briza media</i>. <i>Poa pratensis</i>. <i>Bromus erectus</i>. <i>Trifolium montanum</i>. <i>Sanguisorba minor</i>.</p>
<p>ENCINAR MONTANO <i>Quercus ilex</i>. <i>Buxus sempervirens</i>. <i>Juniperus phoenicea</i>. <i>Amelanchier ovalis</i>. <i>Lavandula latifolia</i>. <i>Pistacia terebinthus</i>. <i>Arctostaphylos uva-ursi</i>.</p>	<p><i>Erica vagans</i>. <i>Genista hispanica</i>. <i>Brachypodium pinnatum</i>.</p>	<p><i>Festuca indigesta</i>. <i>Anthyllis vulneraria</i>. <i>Brachypodium retusum</i>. <i>Dactylis glomerata</i>. <i>Coronilla minima</i>.</p>

TABLA 16.XXIV. AGRUPACIONES VEGETALES

LA RIOJA ALAVESA

BOSQUES	MATORRAL	AGRUPACIONES HERBACEAS
<p>CARRASCAL <i>Quercus ilex</i>. <i>Arbutus unedo</i>. <i>Phyllirea angustifolia</i>. <i>Lavandula latifolia</i>. <i>Quercus faginea</i>. <i>Juniperus communis</i>.</p>	<p><i>Genista scorpius</i>. <i>Thymus vulgaris</i>. <i>Cistus albidus</i>. <i>Rosmarinus officinalis</i>. <i>Asparagus acutifolius</i>.</p>	<p><i>Brachypodium retusum</i>. <i>Coronilla minima</i>. <i>Koeleria vallesiara</i>. <i>Avenula bromoides</i>.</p>

4.2. Siembras

4.2.1. DOSIS DE SIEMBRAS

La siembra se realiza sobre las superficies homogéneas definidas y tiene como objetivo prioritario, gracias a la facilidad de germinación de las semillas que se utilizan, instalar vegetación en aquellas zonas que presentan dificultad para que lo hagan las plantas de forma natural y a corto plazo, así como realzar y ampliar el grado de cubierta de superficies con vegetación rala y frenar o evitar los procesos de erosión de las áreas desnudas y carentes de vegetación: taludes, frentes de corta, escombreras, etc.

Las siembras generalmente se llevan a cabo con especies herbáceas vivaces que cumplan los objetivos antes especificados. Estas siembras se llevarán a cabo con una mezcla de especies que garanticen su éxito.

El cálculo de la dosis de siembra estimada para recubrir áreas como las que se presentan después de finalizada, las operaciones mineras, se hacen según la cantidad de semilla que se estime conveniente, compuesta por una proporción compensada de gramíneas y leguminosas herbáceas y leñosas que garanticen la recuperación vegetal. Debido a que el interés de las siembras también está en ir adecuando el suelo de modo que se facilite, en

el área tratada, la incorporación de especies vegetales del entorno, se ha estimado conveniente incorporar en la dosis de siembra una proporción pequeña de semillas leñosas arbustivas presentes en la zona, para acelerar los procesos de recuperación vegetal. De estas especies una proporción elevada son leguminosas, para favorecer aún más la incorporación de N₂ al suelo.

Se ha procurado que en la mezcla de especies estén representados componentes de las principales comunidades vegetales de la zona, Tabla 16.XXV.

4.3. Hidrosiembra

Una de las técnicas habituales que se utilizan en la recuperación de áreas alteradas, es la aplicación de hidrosiembra cuyo fin básico es frenar los procesos de erosión lo más rápidamente posible en zonas desprovistas de vegetación o que no reúnen condiciones para una instauración de la vegetación natural a corto plazo.

Los componentes básicos de la hidrosiembra para este proyecto son: agua, mulch, estabilizante y semillas. La proporción de cada uno de ellos varía según el tipo de mezcla de hidrosiembra prevista.

TABLA 16.XXV. SELECCION DE ESPECIES. COMPONENTES DE LAS SIEMBRAS SEGUN PRINCIPALES COMUNIDADES VEGETALES PRESENTES

	QUEJIGAL	ENCINAR	MATORRAL	AGRUPACIONES HERBACEAS	SIEMBRAS	HIDROSIEMBRAS	
						H ₁	H ₂
HERBACEAS GRAMINEAS							
Brachypodium retusum	x	x		x		x	x
Briza media	x			x			x
Festuca rubra	x			x			x
Koeleria vallesiana		x		x		x	
Bromus erectus	x			x		x	
Dactylis glomerata		x		x		x	
Lolium perenne	x			x			x
Hordeum vulgare (cultivada)					x		
HERBACEAS LEGUMINOSAS							
Lotus corniculatus	x	x			x	x	x
Onobrichis viciifolia	x			x			x
Anthyllis vulneraria		x				x	
Medicago sativa	x				x		x
Trifolium repens	x	x		x		x	x
LEÑOSAS. OTRAS							
Sanguisorba minor	x	x	x	x		x	x
Genista scorpius		x	x			x	x
Lavandula latifolia		x	x				
Thymus vulgaris			x				
Coronilla minima						x	
Cistus albidus	x	x	x				x
Buxus sempervirens	x	x	x			x	x

Según la tipología de zonas a recuperar se han preparado tres tipos de hidrosiembras:

- H₁. Hidrosiembra recomendada para áreas con más «stress» hídrico, situadas en exposiciones de solana.
- H₂. Hidrosiembra recomendada para áreas situadas en exposiciones norte, de umbría.
- H₃. El mismo caso que los anteriores, pero sólo considerando especies herbáceas en la mezcla de semillas, no se contempla en este caso el uso de semillas de spp. leñosas ni de estabilizador, pues se recomienda para zonas llanas.

Cuando la zona tiene mucha pendiente y las semillas vertidas en la hidrosiembra pueden rodar, o cuando se quiere fijar la hidrosiembra en alguna zona concreta que presenta problemas de inestabilidad por viento, lluvia, etc., se procede al tapado que consiste en verter una mezcla de agua, mulch y estabilizador sobre la hidrosiembra.

Las hidrosiembras diseñadas no incorporan abono en su fórmula ya que éste se malgastaría al no estar la planta en disposición de aprovecharlo; solo es efectivo cuando la vegetación está desarrollada y se recomienda un abono foliar.

4.4. Plantación

Las plantaciones se reservan para especies vegetales de tipo árboles, arbustos o matas. Se busca con ellas la materialización de un escenario natural que represente una etapa intermedia entre la situación que nos encontramos y el entorno real. Se pretende también cubrir, tapar, disimular, etc., en definitiva integran áreas sin vegetación leñosa o con ella escasa en su entorno. Las plantaciones se han diseñado basándose en la selección de especies que se quiere integren el proyecto, de modo que estén representados los suficientes elementos florísticos para cubrir las variaciones mesológicas donde discurren los proyectos, Tablas 16.XXVI a 16.XXVIII.

Las plantaciones se han dividido por las necesidades del proyecto, según se utilicen individuos o grupos.

A continuación se definen las diferentes plantaciones que se pueden utilizar en la ejecución del proyecto.

TABLA 16.XXVI. ARBOLES: INDIVIDUOS

Alamo blanco (*Populus alba*).
 Chopo (*Populus nigra*).
 Sauce (*Salix alba*).
 Aliso (*Alnus glutinosa*).
 Avellano (*Corylus avellana*).
 Fresno (*Fraxinus excelsior*).
 Arce de Montpellier (*Acer monspessulanum*).
 Cerezo (*Prunus avium*).
 Nogal (*Juglans regia*).

TABLA 16.XXVII. ARBOLES: GRUPOS

Grupo de alisos (*Alnus glutinosa*) para bordes y riberas de ríos.
 Grupos de árboles para zonas con humedad alta donde el nivel freático es muy superficial. En este grupo estarán presentes:
 Sauce (*Salix fragilis*).
 Sauce (*Salix atrocinerea*).
 Fresno (*Fraxinus excelsior*).
 Grupo de quejigos (*Quercus faginea*).
 Grupo de encinas (*Quercus ilex rotundifolia*).
 Grupo de nogales (*Juglans regia*).
 Grupo de especies arbóreas o de montaña:
 Quejigo (*Quercus faginea*).
 Encina (*Quercus ilex rotundifolia*).
 Arce de Montpellier (*Acer monspessulanum*).

TABLA 16.XXVIII. ARBUSTOS Y MATAS: GRUPOS

Grupo de arbustos y matas, asociado a los quejigares:
 Morrionera (*Viburnum lantana*).
 Espino majuelo (*Crataegus monogyna*).
 Rosa silvestre (*Rosa canina*).
 Endrino (*Prunus spinosa*).
 Bonetero (*Evonymus europaeus*).
 Boj (*Buxus sempervirens*).
 Grupo de arbustos y matas, asociado a los encinares:
 Guillomo (*Amelanchier ovalis*).
 Labiarnago (*Phyllirea angustifolia*).
 Brusco (*Ruscus aculeatus*).
 Jara (*Cistus albidus*).
 Boj (*Buxus sempervirens*).
 Espino majuelo (*Crataegus monogyna*).
 Grupo de arbustos y matas dispuestos irregularmente. Se utilizarán al menos dos de las siguientes especies:
 Boj (*Buxus sempervirens*).
 Enebro (*Juniperus communis*).
 Gayuba (*Arctostaphylos uva-ursi*).
 Grupo de matas definido para áreas de suelo pobre y esquelético en exposiciones muy soleadas. Se utilizarán al menos tres de las siguientes especies:
 Aulaga (*Genista scorpius*).
 Tomillo (*Thymus vulgaris*).
 Coscoja (*Quercus coccifera*).
 Romero (*Rosmarinus officinalis*).
 Cipresillo (*Santolina chamaecyparissus*).
 Esparraguera (*Asparagus acutifolius*).
 Grupo de plantas más o menos trepadoras:
 Hiedra (*Hedera helix*).
 Zarza mora (*Rubus sp.*).
 Madreselva (*Lonicera sp.*).
 Clemátide (*Clematis vitalba*).

BIBLIOGRAFIA

- BRADSHAW, A. D., y CHADWICK, M. J.: «The Restoration of Land. The ecology and Reclamation of Derelict and Degraded Land». Blackwell. Scientific Publications. Oxford, 1980.
- CAIRNÉY, T.: «Reclaiming Contaminated Land». Blackie. Glasgow and London, 1987.
- CATEDRA DE PLANIFICACION Y PROYECTOS: «Tratamiento funcional y paisajístico de taludes artificiales». UPM ETSI Montes. Cátedra de Planificación y Proyectos. Madrid, 1983.
- COOPIN, N. J., y BRADSHAW, A. D.: «Quarry Reclamation. The Establishment of Vegetation in Quarries and Open Pit Non-Metal Mines». Mining Journal Books, 1982.
- DANIEL, P. W., et al.: «Principios de silvicultura». MacGraw Hill. México, 1982.
- EVANS, J.: «Silviculture of Broadleaved Woodland». Forestry Commission Bulletin 62. Her Majesty's Stationery Office. London, 1984.
- GARCIA ABRIL, A., et al.: «Selección y Cultivo de Especies para la Recuperación de Terrenos Alterados por Obras Viarias». D. G. del Medio Ambiente. MOPU. Madrid 1989.
- GRIME, J. Ph.: «Plant strategies & vegetation processes». John Wiley & Sons. Ltd. London, 1979.
- MARGALEF, R.: «Ecología». Omega. Barcelona, 1970.
- PARDOS, J. A., y GIL, L. A.: «Los huertos semilleros». Monografía 44. ICONA. Madrid, 1986.
- RAMOS, J. L.: «Tratado del medio Natural». UPM. Madrid, 19.
- RUIZ DE LA TORRE, J.: «La vegetación natural del norte de Marruecos y la elección de especies para su repoblación forestal». Larache. IFIE, 1956.
- WILLIAMSON, N. A.; JOHNS, N. M. S., y BRADSHAW, A. D.: «Mine Waste Reclamation». Mining Journal Books. London, 1982.

MÉTODOS DE IMPLANTACION DE LA VEGETACION

1. INTRODUCCION

Los métodos básicos de implantación de la vegetación son la plantación y la siembra. Cada uno de ellos puede desglosarse a su vez, en función de la técnica empleada, en otros más concretos:

- Plantación:
 - Manual: hoyos y casillas.
 - Mecánica.
- Siembra:
 - En profundidad: en hileras.
 - Superficial: a voleo, hidrosiembra y aérea.
- Otros: empleo de la capa superficial de suelo, encespedamiento (tepes), entramados de cañas y alambres, mulches, etc.

El éxito de la recuperación no sólo se debe a la preparación adecuada del terreno y a la selección de las especies vegetales más idóneas, sino también a la utilización de la técnica de implantación que mejor se adapte a las características de la zona a revegetar.

La selección del método de instauración está condicionada por la topografía (pendiente) y tamaño de la super-

ficie de actuación, las condiciones atmosféricas, la textura (humedad y pedregosidad superficial o porcentaje de afloramientos rocosos), la compactación, la intensidad de los procesos geofísicos, la disponibilidad de agua, el tipo de vegetación seleccionada y las restricciones técnicas (accesibilidad de la maquinaria a la zona) o económicas. Tablas 17.I y 17.II.

La técnica de implantación y el tipo de material vegetal a emplear también están influidos por la dedicación o el uso posterior de la zona, una vez concluidas las actividades mineras. En general, la implantación de cultivos agrícolas se suele efectuar mediante siembras (cebada, trigo, avena, etc.), mientras que en las repoblaciones con fines productivos se sigue, normalmente, el proceso de plantación. En los trabajos de recuperación con fines paisajísticos, recreativos y de introducción de la vegetación natural, es conveniente simultanear las técnicas de siembra o plantación, para inducir una mayor diversidad de hábitats, aumentar la calidad visual de la zona (al utilizar elementos vegetales de características muy diversas) y favorecer, en general, la recuperación a corto y medio plazo.

En cualquier caso la elección de un método de instauración implica el conocimiento exhaustivo de los factores del medio físico y socioeconómico de la zona que pueden influir en dicha elección y viceversa.

TABLA 17.I. LIMITACIONES A LOS METODOS DE PLANTACION Y SIEMBRA

	PENDIENTE	TAMAÑO	PRECIPI-TACION	HUMEDAD TERRENO	PEDREGOSIDAD O AFLORAMIENTOS ROCOSOS	COMPAC-TACION	ACCESIBILIDAD	EXISTENCIA DE PROCESOS	DISPONIBILIDAD DE AGUA	COSTE
Plantación:										
Manual	—	x	—	—	—	x	x	x	—	x
Mecánica	x	—	x	—	xx	xx	x	x	—	
Siembra:										
En hileras	x(< 15°)	—	x	x	x	x	x	—	—	x
A voleo	x(< 20°)	—	xx	x	x	xx	x	—	—	x
Hidrosiembra	—	—	xx	x	—	xx	x(50-500 m)	—	xx	xx
Aérea	—	x(> 10 ha)	x	x	—	—	—	—	xx	xx

x: Limitación media.
xx: Muy limitante.

TABLA 17.II. METODOS MAS ADECUADOS DE INTRODUCCION DE LA VEGETACION SEGUN DIFERENTES TIPOS DE VEGETACION

TIPO DE VEGETACION	SEMILLAS		PLANTAS	FRAGMENTOS DE VEGET.	HORIZONTE SUPERFICIAL RICO EN SEMILLAS	TURBAS
	Compradas	Recolectadas localmente				
Gramíneas	xx *	x **		x	x	x
Leguminosas	xx	x	x		x	x
Herbáceas	x	xx		x	xx	xx
Especies naturales		xx		x	xx	xx
Matorral	x	x	xx		x	x
Coníferas	x	x	xx		x	
Maderas duras o nobles	x	x	xx		x	x
Plantación de árboles en zonas de recreo			xx			
Areas grandes o inaccesibles	xx	xx	x		x	

* xx: Método principal.

** x: Método secundario o adicional.

Fuente: Coppin and Bradshaw, 1982.

En los apartados siguientes del presente Capítulo se van a comentar las características más importantes de cada uno de los métodos de implantación: funciones que abarcan, objetivos, ventajas y desventajas que presentan, épocas idóneas de realización, maquinaria de uso frecuente, etc., así como los cuidados posteriores que son requeridos hasta que la nueva vegetación implantada arraigue y pueda desarrollarse autónomamente.

2. PLANTACION

Es la técnica por excelencia para transplantar especies arbóreas y arbustivas criadas generalmente en vivero. Algunas de estas especies también pueden ser introducidas mediante siembra directa de sus semillas, sin embargo dicho método suele ser poco viable ya que no es frecuente disponer de una gran variedad de semillas, los precios son muy elevados y además se requieren cuidados profusos, tanto en la preparación de la cama de siembra, como en los períodos posteriores a la misma.

La plantación contribuye al desarrollo de comunidades vegetales estables mediante la introducción de especies pioneras o intermedias de la sucesión vegetal, que de forma natural tardarían mucho tiempo en instalarse. La creación de hábitats naturales, además de favorecer el valor paisajístico de la zona, promueve la diversidad faunística y vegetal del área recuperada. También hay que destacar su aportación al desarrollo de un sustrato edáfico estable y consolidado.

Otras ventajas importantes de la plantación son:

- La germinación y las primeras fases del desarrollo de la planta son controladas en el vivero, lo que aumenta la probabilidad de supervivencia de las mismas.
- Se necesita un gasto menor de semillas que si se utiliza el método de siembra.

— Los árboles o arbustos se colocan en el lugar deseado o adecuado: el efecto visual es más rápido.

— Una vez arraigadas las plantas su sistema radicular protege al suelo de los procesos erosivos.

En contrapartida, la plantación presenta una serie de inconvenientes que a su vez le diferencian de las siembras; estos son: coste elevado de producción de las plantas en vivero, mayor necesidad de operarios y de equipos, mayores cuidados durante el transporte de las plantas desde el vivero hasta el lugar de plantación, riesgo de pérdida de ejemplares por una inadecuada manipulación de los mismos (sobre todo en plantas de raíz desnuda por rotura de las raíces).

Los factores que han de tenerse en cuenta en la plantación y que deben ser controlados en la gestión de la recuperación, son:

- Calidad de las plantas
- Cuidados de las plantas
- Métodos de plantación
- Época de plantación
- Competencia con otras especies vegetales
- Compactación del suelo

2.1. Tipo de vegetación y formas de cultivo

2.1.1. TIPO DE VEGETACION

Como ya se ha comentado anteriormente, las especies vegetales utilizadas en la plantación se cultivan generalmente en vivero. El método de implantación será diferente en función del tiempo de permanencia en el vivero o madurez del material vegetal, semillas, plantón, latizal, fus-

tal o árboles semimaduros y de la forma de cultivo: a raíz desnuda (plantas cultivadas directamente sobre «eras»), en cepellón, plantas cultivadas en macetas, contenedores, etc., y por esquejes o estaquillas. Se debe indicar que cuanto más desarrollada esté la planta, más problemas ocasiona su transporte y más costoso resulta. Por otra parte, las plantas jóvenes son más sensibles a las posibles agresiones de la fauna local, pueden sufrir daños por vandalismo, o desarrollarse inadecuadamente e incluso morir si existe una fuerte competencia por parte de las especies herbáceas que crecen espontáneamente en la zona.

Las plantas de vivero se suelen definir por el número de años de permanencia en él y por los trasplantes o repiques sufridos (el repique consiste en cortar la raíz pivoteante o principal para que el sistema radical se ramifique y se haga más potente) desde su desarrollo en el semillero hasta su plantación en el lugar definitivo: 1-1 por ejemplo, indica que se trata de una planta que ha sufrido un trasplante y un repique.

Aunque el tiempo normal de permanencia en vivero suele ser de uno o dos años, también pueden obtenerse plantas de edades superiores. La calidad de los ejemplares obtenidos depende directamente de las prácticas efectuadas y de los períodos de crecimiento transcurridos. En la Tabla 17.III se han clasificado los árboles y arbustos en función de la edad y el tamaño desarrollado.

Por regla general los árboles jóvenes, de pequeño y mediano tamaño, hasta 1,5 m de altura, son los más utilizados en los trabajos de recuperación, mientras que los de mayor longitud y edad, debido a su coste elevado y a la baja probabilidad de supervivencia en terrenos contaminados o de pobre productividad, sólo se emplean en casos muy concretos, tales como la creación de pantallas, la delimitación de los terrenos a recuperar o en situaciones en que el objetivo principal sea la integración paisajística en el entorno circundante.

2.1.2. FORMAS DE CULTIVO

Las plantas a raíz desnuda son aquéllas que, como su propio nombre indica, se trasplantan con el sistema radicular libre de suelo.

A pesar de que requieren menos cuidados que otros tipos de materiales vegetales, deben ser protegidas del calor, la incidencia directa de los rayos solares y la sequedad durante el período de tiempo que transcurre desde su salida del vivero hasta que se depositan en la zona de destino. Para evitar problemas en su desarrollo fisiológico es recomendable que se planten lo antes posible.

Los cuidados más oportunos son humedecer las raíces y almacenar las plantas en sitios frescos y sombreados, Fig. 17.1.

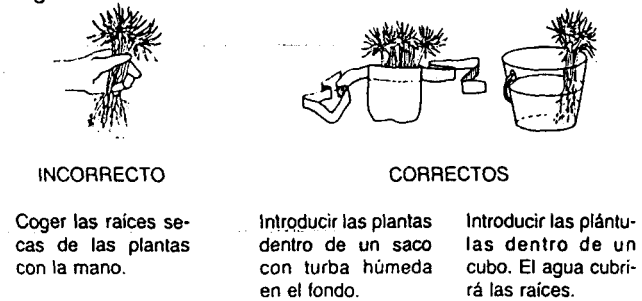


Figura 17.1 Manipulación de las plántulas (Vogel, 1987).

Las especies que no puedan ser implantadas hasta 2 semanas después de extraídas del vivero, se guardarán en lugares abiertos, húmedos, desinfectados y a una temperatura de 1° C a 4° C.

Las plantas con *cepellón* son aquéllas que se implantan con el sistema radicular cubierto y protegido por el suelo.

Para que estas plantas se vuelvan más resistentes a las condiciones atmosféricas adversas (frío, calor o sequedad)

TABLA 17.III. RELACION ENTRE LA EDAD DE LOS EJEMPLARES Y EL TAMAÑO ALCANZADO EN VIVERO

NOMBRE	EDAD (Años)	TAMAÑO	OBSERVACIONES
ARBOLES			
Plántulas o plantas de semillero	< 1	50-150 mm	Generalmente cultivadas en contenedor.
Plantas que han sufrido un trasplante o repique	≥ 2	300-700 mm	Tallo único (1-1, 2-1).
Latizales	≥ 2	900-1.500 mm	Tallo único (1-2-1; 1-2-2; 2-2).
Árboles con tallo recto que sostienen la copa	5	1-1,5 m (rama pral.)	Diámetro mínimo a 75 cm suelo: 20 mm. Copa bien desarrollada.
Árboles de tamaño estándar	5-10	1,75-2 m (rama pral.) 2,4-2,7 m	Diámetro a 75 cm del suelo: 20 mm.
Árboles cuya copa está desarrollada desde la base	> 10	1,8-3 m	Guía bien formada recta y vertical con ramas laterales.
ARBUSTOS			
Pequeño tamaño	≥ 2	Depende de cada especie	
Desarrollado	—	30-75 cm	Copa bien desarrollada.

dad), se suelen almacenar o someter a temperaturas extremas de frío (6° C) o calor, según la estación del año en que hayan sido sacadas del invernadero.

El método de cultivo más moderno y que cada vez se impone más por sus óptimos resultados, es aquel en que las plantas germinan y se desarrollan dentro de pequeños *contenedores* o *macetas*.



Foto 17.1. Vivero preparado en una mina.

Está especialmente indicado para zonas con condiciones atmosféricas adversas: climas áridos con precipitaciones escasas o nulas.

Mediante este sistema, generalmente sólo se cultivan plantas jóvenes (el tamaño estándar de los contenedores es de 70 a 150 mm de longitud y de 20 a 80 mm de diámetro), de edad inferior a un año y medio. Tal limitación puede hacer que su uso quede restringido en aquellas zonas donde sea necesario el empleo de ejemplares grandes y desarrollados.

La ventaja de esta forma de cultivo frente a las expuestas anteriormente radica en la máxima protección que ofrece al sistema radicular durante el transporte y plantación de la vegetación. Ello a su vez favorece la supervivencia de las especies y aumenta el éxito de los trabajos de revegetación.

Entre las desventajas o inconvenientes de este método hay que destacar, su elevado precio, los cuidados que requiere su manipulación y otras de mayor importancia que surgen una vez efectuada la plantación: dificultad para que el agua circule libremente entre el contenedor y el suelo, disminución o desarrollo defectuoso de las raíces, posibilidad de que la maceta o contenedor se hiele, etc.

Debido a lo expuesto anteriormente, la naturaleza del material empleado es de gran importancia, y deberá tener las siguientes características: biodegradable, permeable, flexible para que las raíces puedan romper el contenedor y penetrar en la tierra, e inalterable por efecto de las heladas. Los más utilizados y de mayor difusión en el mercado son de plástico (polietileno), stiroblock, malla extensible, turba prensada (yiffi-pot) o mezclada con algún compuesto como vermiculita, papel (paper-pot), etc.

Las plantas en maceta o contenedor deberán ser protegidas del calor y de los rayos solares. Cuando la plantación sólo se demore unos días desde su entrega en el

vivero éstas se guardan en zonas sombreadas y frescas, pero si la implantación va a retrasarse varias semanas es necesario disponer de un almacén o lugar húmedo y frío, donde pueden ser instaladas de forma erguida, pero no amontonadas, a una temperatura de -2° C a 2° C.



Foto 17.2. Plantas germinadas en contenedores.

2.2. Métodos de plantación

La plantación se efectúa una vez preparado el terreno, aunque hay ocasiones en que ambas actuaciones se pueden realizar conjuntamente. Este proceso simultáneo sólo se lleva a cabo en situaciones muy concretas: zonas llanas, accesibles a la maquinaria y con sustratos no excesivamente contaminados, pobres o someros, circunstancias poco probables en terrenos afectados por actividades mineras.

Normalmente, la plantación debe realizarse inmediatamente después de concluidos los trabajos de preparación del terreno, sin embargo, en escombreras contaminadas por metales pesados (minería metálica) el tiempo puede y debe dilatarse para que se produzca la lixiviación de los elementos tóxicos. Si la contaminación es intensa, se debe evitar el contacto entre las raíces de las plantas y el sustrato contaminado. Para ello será necesario incrementar la profundidad de los materiales y cobertera y elegir especies con un sistema radical somero y superficial.

Se debe indicar que la plantación no es un método alternativo a la siembra. En terrenos donde se observe una

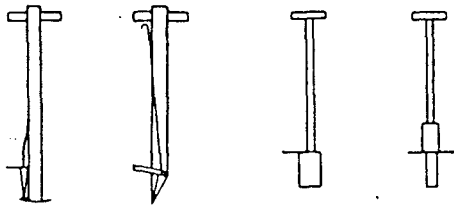
deficiencia acusada de nitrógeno o una intensa erosión, se podrá efectuar una siembra previa a la plantación, con especies leguminosas y/o gramíneas u otras encespedantes, a fin de mejorar los niveles de nitrógeno y estabilizar la superficie.

La plantación puede ser manual y mecánica, dependiendo de la maquinaria utilizada y de las condiciones del terreno.

2.2.1. PLANTACION MANUAL

El proceso se realiza con herramientas de uso manual y de forma puntual sobre la superficie a revegetar. Los métodos más comunes son mediante la realización de hoyos o casillas, Fig. 17.2.

a) EQUIPOS DE PLANTACION MANUAL



b) PERFORADORAS MECANICAS PARA PLANTACION MANUAL

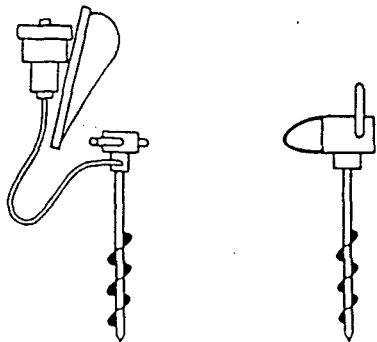


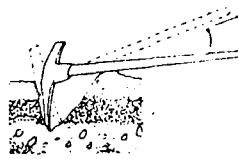
Figura 17.2. Diferentes equipos de plantación manual.

La plantación manual está indicada para zonas con pendientes elevadas, superficies pequeñas y terrenos fácilmente compactables (suelos arcillosos, pesados, encharcables, etc.), donde no es posible la utilización de maquinaria.

Los hoyos no deberán ser menores de 30 cm de diámetro por 30 cm de profundidad, en cualquier caso el tamaño dependerá del tipo de planta a insertar en el hueco creado (Cairney, T., 1987). El hoyo puede efectuarse con un azadón (azada de pico o zapapico), plantamón, barrón y, en casos especiales mediante perforadoras o barrenas de acción mecánica transportadas en tractores. El plantamón está indicado para terrenos pedregosos o compactados y el barrón para plantación de estaquillas. Fig. 17.3.

El hoyo ha de ser suficientemente profundo para que las raíces no se dañen o deformen. Una vez instalada la planta de forma adecuada, el hoyo se vuelve a rellenar de

manera que el tallo no quede tapado, dejando una pequeña hondonada para recoger el agua de lluvia o la de riego.



Introducir el azadón con movimientos fuertes.



Colocar la planta a lo largo del hoyo a la profundidad adecuada.



Empezar a rellenar el hueco por la base de las raíces.



Terminar de rellenar el hoyo empujando y apretando el suelo con el tacón del zapato.



Compactar alrededor de la planta con el pie.

Figura 17.3. Sistema de plantación con azada de pico (Vogel, 1987)

Cuando se plantan árboles de tamaño superior a 1,50 m, generalmente es necesario colocar un tutor que sirva de guía y proteja al árbol del viento. El tutor se debe instalar una vez abierto el hueco y antes de insertar la planta. Los sistemas de fijación entre el tutor y el árbol han de ser suficientemente amplios para permitir que el árbol crezca sin que se dañe la corteza y se produzcan heridas, Fig. 17.4.

En terrenos excesivamente pobres, es conveniente mezclar los materiales extraídos con fertilizantes de liberación lenta y enmiendas orgánicas (si se trata de plantas muy desarrolladas), antes de volver a rellenar el hoyo. En cuanto a los niveles de fertilización, se estiman convenientes de 15 a 20 litros de turba por árbol y de 2 a 5 g de N por planta, dependiendo del tamaño de la especie a instalar.

En climas áridos se utilizan mulches para retener la humedad cerca del árbol. En ejemplares grandes se aplica una capa de 75 mm de profundidad en un círculo de 90 cm alrededor de la base del árbol. Si las plantas son más pequeñas, es suficiente una capa de 50 mm en un círculo de 50 cm de diámetro. En cualquier caso se añadirán 50 g de fertilizante de liberación lenta, tipo N-P-K: 10-15-10, cada primavera. Si se aprecian especies herbáceas que pueden competir con los nutrientes del suelo se deberán retirar y añadir herbicidas.

Otro método para retener o aumentar la humedad del suelo en zonas áridas consiste en cubrir el hoyo de plan-

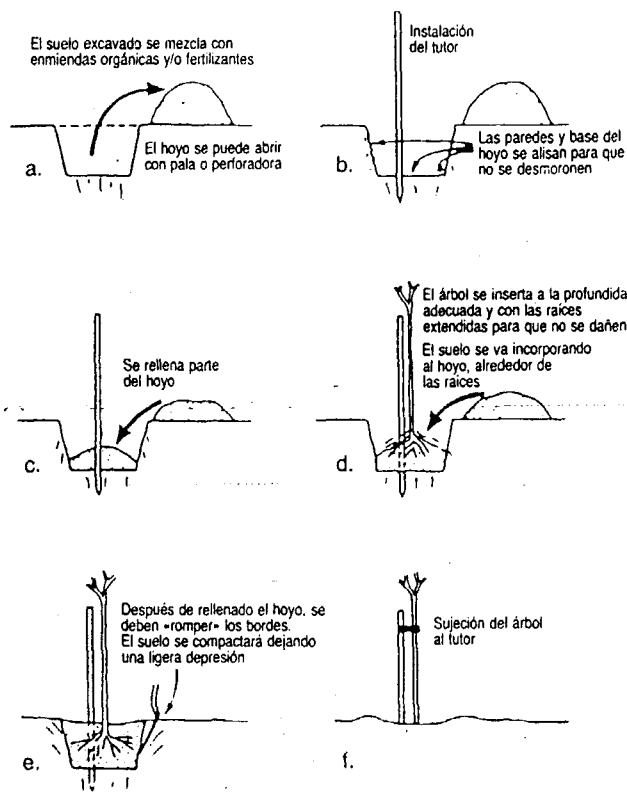


Figura 17.4. Método de plantación de especies con altura superior a 1,5 m (Coppin y Bradshaw, 1982)

tación con plástico (polietileno) que acumula y condensa el agua retenida debajo de él, Fig. 17.5. También se pueden plantar especies subarborescentes rizomatosas, con sistemas radiculares interconectados; una vez desarrollado el sistema foliar, una de las plantas se corta y queda la otra con una mayor proporción de raíces, Fig. 17.6 (a).

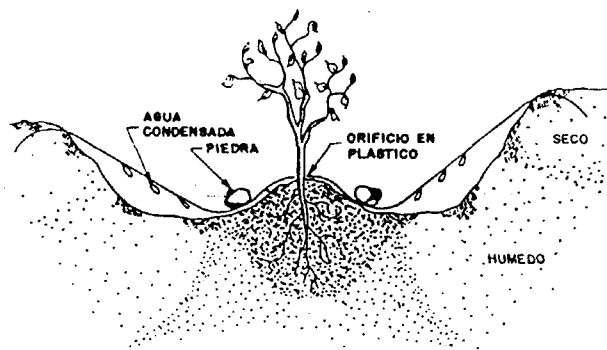


Lámina de plástico alrededor del hoyo. El peso de las rocas ayuda a que el agua se condense alrededor de las raíces.

Figura 17.5. Sistema de condensación del agua con una lámina plástica en zonas áridas.

En terrenos desprovistos de vegetación y sometidos a elevadas temperaturas, la humedad se acumula en el interior. En tales casos se recomienda la plantación de especies vegetales con sistema radicular de gran longitud, para que las raíces puedan llegar a la zona de mayor humedad, Fig. 17.6 (b).

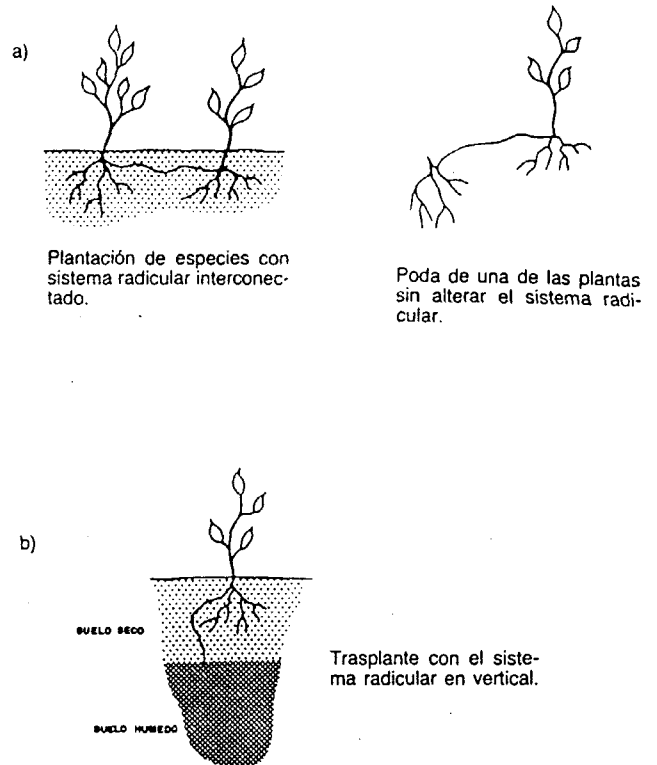


Figura 17.6. Aumento del sistema radicular por trasplante (Williamson, 1982)

Los terrenos pedregosos y rocosos no presentan las condiciones adecuadas para que la planta se desarrolle por sí misma. El hoyo se deberá rellenar con materiales de aporte ricos en materia orgánica y capaces de retener la humedad (turba, limo, etc.) que de otra manera se filtrará entre los intersticios de las rocas y el terreno suelto y no podrá ser utilizado por la vegetación plantada. La aplicación de fertilizantes estará condicionada por el espacio que tenga la planta para desarrollar sus raíces, ya que si el volumen de que disponen las raíces es muy limitado, éstas pueden desestabilizar el terreno al sobresalir de su hueco, Fig. 17.7.

La casilla es un método de preparación del terreno indicado tanto para la plantación como para la siembra. El espacio se remueve sin extraer el suelo que permanece «in situ» durante la plantación, en superficies cuadradas o circulares. Se realiza con una azada, pala plana o plantamón y la profundidad de actuación puede variar desde 10 cm, aproximadamente, a 30 cm (según el tamaño de la planta), dependiendo de que se trate de una casilla somera, o profunda o picada, respectivamente.

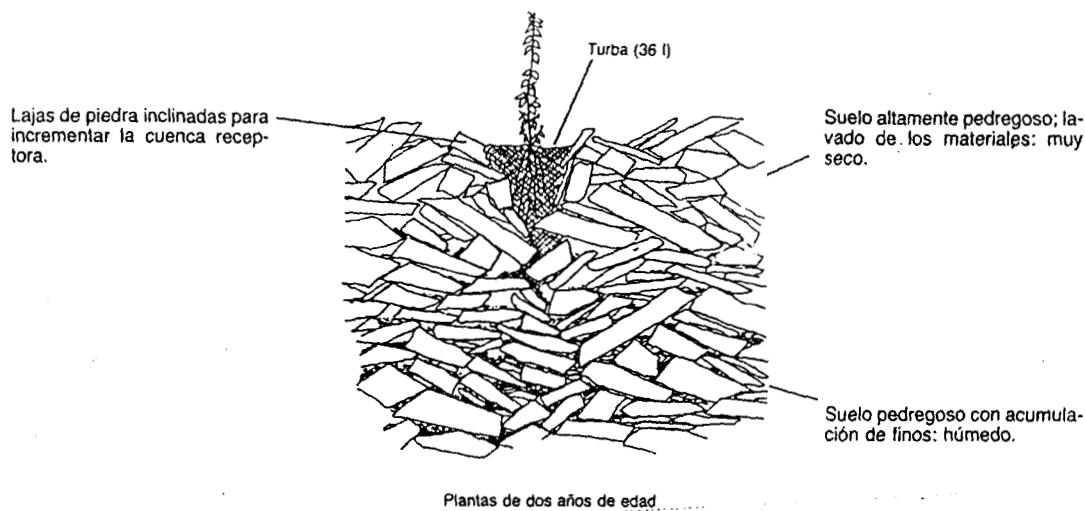


Figura 17.7. Método de plantación en escombreras y terrenos pedregosos y sueltos.

2.2.2. PLANTACIÓN MECÁNICA

Las plantadoras mecánicas remolcadas por tractor son adecuadas para plantar especies a raíz desnuda, principalmente, en áreas suficientemente grandes, libres de piedras y con pendientes inferiores al 15-20 %. En terrenos con pendientes superiores al 30 % deberá plantarse en la cabecera y pie del talud. Los surcos de dirección paralela a la línea de máxima pendiente pueden dar lugar a procesos erosivos.

La plantadora mecánica de tubos cilíndricos está especialmente diseñada para abrir hendiduras en el terreno, de 10 a 60 cm de profundidad, según el tamaño de la planta a instalar, e insertar a continuación las plantas con cepellón, Fig. 17.8.

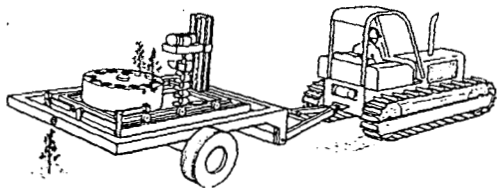


Figura 17.8. Equipo de plantación mecánico utilizado en superficies de gran extensión.

En general debe indicarse que la plantación mecánica es un método apropiado para utilizar en terrenos afectados por actividades mineras. La excesiva pendiente, la dureza de los materiales sobre los que se va a efectuar la plantación (falta de cohesión, alta pedregosidad, humedad escasa, etc.) y la mala accesibilidad, son factores limitantes que desaconsejan el empleo de dicho método en la mayoría de los casos.

Especies tales como chopos (*Populus hybrida*) o sauces (*Salix sp.*) a menudo son plantadas mediante esquejes o estaquillas. El hoyo de plantación se hará manualmente, bien con un plantamón o zapapico, bien con

barrón, y tendrá la suficiente profundidad para que se pueda introducir 2/3 de la longitud total de la estaquilla, que se insertarán con los brotes hacia arriba. La plantación deberá efectuarse durante el período de latencia, antes de que broten las yemas.

2.3. Época de plantación

La época de plantación depende de las condiciones climáticas de la zona (pluviosidad, vientos dominantes, etc.) y del tipo de vegetación a instalar.

Lo fundamental es efectuar la plantación durante el período de reposo vegetativo de las plantas. Este período suele coincidir con los meses más fríos, desde finales de octubre a principios de abril.

La plantación sólo podrá realizarse en invierno si se evitan los días de heladas intensas. Por el contrario, durante el verano no es conveniente plantar, a menos que sea factible efectuar riegos periódicos y seguidos.

La frecuencia de períodos de sequía puede ser limitante para el desarrollo de la nueva vegetación, incluso tomando precauciones como es el extendido de una capa de mulch que disminuye la evaporación.

La época idónea queda restringida al final del otoño, para especies arbóreas nobles, y comienzos de la primavera, para coníferas.

Carney, T. (1987) señala el invierno como estación más adecuada para plantar árboles y arbustos a raíz desnuda, mientras que las especies cultivadas en cepellón y en contenedores o macetas podrán trasplantarse en cualquier época del año siempre y cuando sean regadas durante los meses más secos del verano.

2.4. Densidad de plantación

La densidad y forma de la plantación depende de la localidad, del uso propuesto y de las exigencias de la propia especie.

En general, la revegetación con fines productivos acepta mayor densidad de arbolado que otras cuyo objetivo sea la recuperación natural o el uso recreativo. Sin embargo, siempre debe tenerse en cuenta el entorno natural donde se integra la zona a recuperar y tomarse como modelo o «pattern» de comportamiento las formaciones vegetales próximas.

Los árboles y arbustos pueden ser plantados de muy diversas maneras: aleatoriamente, las especies se mezclan sin ningún orden establecido; plantación en hileras (separación entre hileras de 6 a 8 m) o mezcla de hileras, cada especie se planta en una fila o grupo de filas junto a otras de distinta especie; y plantación en grupos, es la forma que mejor reproduce el bosque natural (VOGEL, W.G., 1987). En general y en particular en el caso de la plantación en hileras, se deberá evitar toda regularidad, colocándose las plantas de manera que no queden signos de linealidad.

En plantaciones con fines comerciales, la densidad debe ser tal que, por una parte, permita el paso de maquinaria y, por otra, no se produzcan daños en la forma y desarrollo de las especies. Por regla general las coníferas se plantan más juntas que las caducifolias. Una densidad aproximada de 1.900 a 2.400 ejemplares/ha, asegura una producción óptima.

Una separación adecuada de árboles es de 2 a 2,5 m, aunque estará condicionada por la densidad final que se quiera obtener. En la Tabla 17.IV se indica la relación entre distintas separaciones de árboles y las densidades correspondientes.

TABLA 17.IV

SEPARACION (m)	DENSIDAD (pies/ha)
1,5 × 1,5	4.450
2 × 2	2.500
2,5 × 2,5	1.600
6 × 6	270

A continuación se indica la separación entre árboles para algunas de las especies más usadas en la revegetación de terrenos alterados; éstas son, según Vogel:

- Coníferas: 1,5 × 1,5 ó 1,8 × 1,8 m.
- Chopos: 2,4 × 2,4 m.
- Alternancia de chopos con coníferas, alisos o acacias: 2,1 × 2,1 m.
- En caso de utilizar la plantación como medida para disminuir la erosión se recomienda una separación de 1,2 a 1,5 m y una distancia entre hileras de 1,5 a 1,8 m.

En la formación de pantallas vegetales se deberán utilizar especies arbóreas y arbustivas de follaje denso. Deberán ser lo más tupidas posible, dejando la mínima separación que permita el desarrollo adecuado de las plantas.

3. SIEMBRA

La siembra consiste en depositar en el terreno, previamente preparado, semillas de las especies seleccionadas para revegetar las zonas a recuperar. Las especies que generalmente se introducen mediante este método son herbáceas vivaces, aunque como ya se ha indicado en el apartado 2 de Plantación, también pueden sembrarse semillas de árboles y arbustos.

Los métodos de siembra más comunes son en hileras y a voleo que requieren herramientas agrícolas tradicionales, mientras que la hidrosiembra y siembra aérea necesitan equipos más sofisticados y caros.

La siembra se realiza sobre superficies más o menos extensas y tiene como objetivo prioritario implantar una cubierta vegetal de bajo crecimiento, pero densa, capaz de proteger al suelo de los procesos erosivos y de otros factores perjudiciales, como deslizamientos, temperaturas extremas, superficies de escorrentía, etc. También tiene como fin recuperar la vegetación de zonas donde es difícil que se instale de forma natural, así como mejorar la calidad paisajística del área a recuperar.

En general se trata de un método flexible, barato, que requiere escasa mano de obra, con resultados positivos a corto plazo, y muy aconsejable en zonas de difícil acceso (hidrosiembras).

En cuanto a los inconvenientes o desventajas que se le pueden atribuir, éstos se resumen en:

- Se precisan grandes cantidades de semilla para compensar las pérdidas causadas por la depredación de los animales, las condiciones climáticas y edáficas adversas, la caída de semillas si se siembra en superficies pendientes, y el crecimiento de maleza competitiva.
- En la siembra, y concretamente si se efectúa a voleo, es difícil predecir «a priori» cuál será la distribución final de la vegetación: las semillas «caen» sobre la superficie del suelo de forma aleatoria. También se suelen obtener densidades irregulares aunque con el método de la hidrosiembra esto puede paliarse.
- La siembra en hileras y a voleo es más exigente que la plantación en cuanto a condiciones climáticas y de sustrato: suelos sueltos, húmedos y escasa compactación y pedregosidad.
- En muchas ocasiones no se dispone de una gran variedad de semillas. Se debe insistir en la necesidad de crear el mayor número posible de bancos de semilla, donde se recopilen frutos de la mayoría de las especies vegetales y se sometan a los cuidados oportunos para producir granos sanos y vigorosos. España cuenta con la «Asociación Española de Semillas» donde se puede recibir información acerca de las comercializadas y su nivel de garantía.

A continuación se comentan, de forma somera, cada uno de los métodos de siembra, haciendo especial hincapié en la hidrosiembra, por ser una técnica muy adaptada a las condiciones de pobreza, inaccesibilidad y fuertes pendientes, de los terrenos alterados por las actividades mineras.

3.1. Métodos de siembra

La preparación de la cama de siembra es una etapa previa a la siembra y fundamental para que las semillas puedan germinar y desarrollarse en las condiciones adversas que presentan los materiales procedentes de las actividades mineras.

Al igual que en la plantación, la elección del método de siembra está condicionada por los factores climáticos, edáficos y económicos de la zona a recuperar. En la Tabla 17.V se indican las limitaciones para la realización de la siembra en hileras, a voleo o mediante hidrosemebradora.

3.1.1. SIEMBRA EN HILERAS

La siembra en líneas comprende los pasos siguientes (Ortiz-Cañavate, J., 1984):

1. Apertura del surco donde se deposita la semilla. Esta labor se efectúa mediante rejas asurcaderas o cuchillas circulares, dependiendo del tamaño de la semilla y la anchura de surco: desde 1 cm hasta 6 u 8 cm.
2. Dosificación y depósito de la semilla. Estas se almacenan en una tolva y se distribuyen aleatoriamente mediante tubos de caída.

TABLA 17.V. LIMITACIONES PARA LA SIEMBRA EN HILERAS, A VOLEO E HIDROSIEMBRA

	SIEMBRA EN HILERAS	SIEMBRA A VOLEO	HIDROSIEMBRA
• Pendiente.	< 15°	No se puede efectuar en pendientes superiores a 20°.	Con manguera se pueden alcanzar 50 m y con brazo extensible mecánico hasta 500 m.
• Estación.	Suelos bastante húmedos.	Estación templada con suficientes lluvias; extendido de mulch en el período de crecimiento.	
• Pluviometría.	Importante.	Crítica.	Crítica.
• Pedregosidad y afloramientos rocosos.	Libre de rocas y piedras.	Crítica; fisuras y grietas en las rocas y piedras permiten que las semillas se introduzcan y puedan encontrar mejores condiciones microclimáticas para germinar.	
• Compactación.	Ligeramente aceptable.	Inaceptable.	Inaceptable.
• Nivel de semillas.	Son suficientes niveles bajos.	Niveles altos.	Niveles altos para compensar las pérdidas.
• Distribución de las semillas.	Uniforme; en hileras.	Aleatoria.	Aleatoria.
• Establecimiento de las semillas.	Muy efectiva.	Resultados variables.	Resultados variables.
• Fertilización.	Operación separada de la siembra.	Operación separada de la siembra.	Se puede efectuar en la misma operación, pero no se realiza a profundidad.
• Mulch.	No es necesario.	Necesario (operación diferente).	Necesario, se puede efectuar en una misma operación.
• Equipamiento.	Tradicional.	Método manual o mecánico.	Equipamiento especial.
• Coste.	En general es de bajo precio.	Muy barato. La adición de mulch puede encarecer la técnica.	Caro.

Fuente: Coppin, N. J. and Bradshaw, A. D., 1982.

3. Enterrado de la semilla. La propia reja asurcadora puede crear el efecto de enterrado, aunque existen rejas, cadenas, rastras, etc., que también lo pueden realizar.
4. Compactación del suelo alrededor de la semilla. Se realiza por medio de rodillos compresores.

La sembradora en líneas, Fig. 17.9, es la maquinaria tradicional que normalmente se utiliza para este fin.

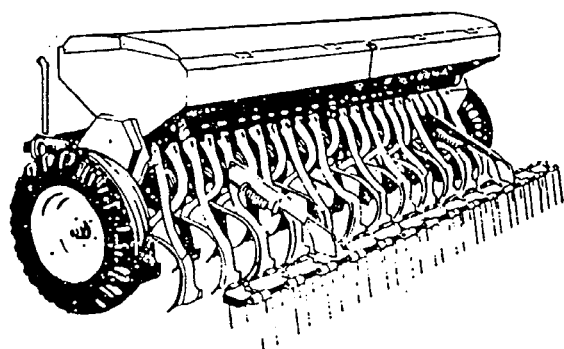


Figura 17.9 Sembradora en líneas (Ortiz-Cañavate, 1984).

Su aplicación queda limitada a zonas de topografía suave que permita el paso de maquinaria y con suelos bastante fértiles y libres de piedras. Dadas las características exigidas no es un método adecuado para utilizar en terrenos degradados, donde la presencia de materiales poco consolidados y fácilmente compactables impide el uso de maquinaria.

3.1.2. SIEMBRA A VOLEO

Las semillas se distribuyen sobre la superficie del suelo de forma irregular. Está especialmente indicada para semillas pequeñas, generalmente pratenses.

Se trata de un método sencillo de utilizar, barato (si se exceptúa la hidrosiembra y la siembra aérea) y muy adecuado en terrenos difíciles.

Si una vez efectuada la siembra las semillas no se cubren por tratamientos mecánicos o de forma natural, es probable que un gran porcentaje no pueda germinar por falta de condiciones ambientales propicias (humedad y temperatura, principalmente), en especial en climas áridos.

En materiales de textura gruesa las semillas pueden introducirse de forma natural entre las pequeñas grietas y hendiduras del terreno, donde el microclima es más favorable para la germinación.

En terrenos donde no es aconsejable cultivar (el efectuar zanjás o surcos en zonas de pendiente considerable puede dar lugar a nuevos fenómenos erosivos) se recomienda cubrir la superficie del suelo, una vez sembrada, con mulches o materiales protectores (ver apartado 4).

Otro problema asociado con la siembra a voleo es la distribución irregular de las semillas. Por esta razón es preferible repartir las semillas en diferentes direcciones y en varias aplicaciones (con tandas en dos direcciones perpendiculares), que en una sola tanda.

La siembra a voleo se puede efectuar de diversas formas según sea la maquinaria empleada y las condiciones de la zona a tratar. A continuación, se indican las características más relevantes de las sembradoras de uso común en el ámbito nacional (las hidrosembradoras serán tratadas de forma más concreta en el epígrafe siguiente).

La sembradora *centrífuga* puede ser manual, y normalmente se utiliza en zonas pequeñas, tipo jardín, o mecánica, que es más apropiada para superficies mayores. Mediante este sistema se pueden sembrar una gran variedad de semillas.

La tolva de distribución, que se monta sobre un tractor, tiene capacidad aproximada de 300 a 600 l (300-700 Kg). Este tipo de maquinaria sirve para distribuir de muy distintas maneras, tanto las semillas como cualquier otra clase de productos granulados, por ejemplo abonos (abonadora centrífuga, Fig. 17.10).

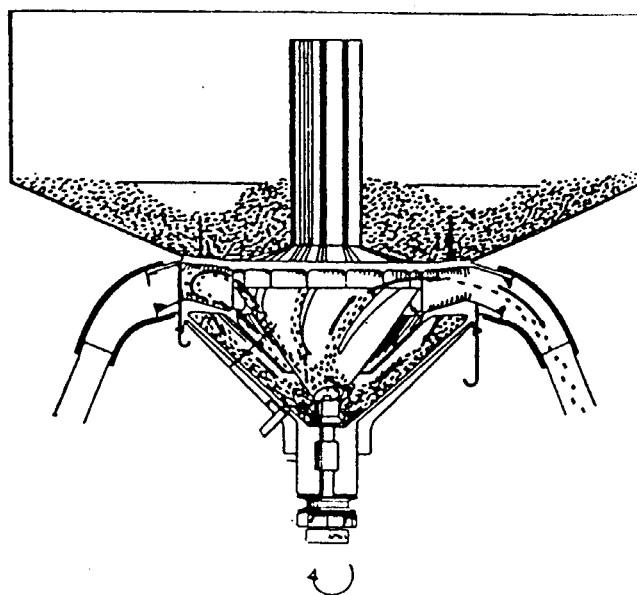


Figura 17.10. Sembradora centrífuga (Ortiz-Cañavate, 1984).

La sembradora de *descarga libre* es análoga, en cuanto a sus órganos distribuidores, a la sembradora en líneas, pero se diferencia en que no hace surcos sobre el terreno. Generalmente, van provistas de una grada de puas o de rodillos que entierra ligeramente la semilla. En ocasiones una misma máquina va dotada de dos tolvas para semillas diferentes (mezcla de gramíneas y leguminosas para formar una pradera mixta), e incluso una con sembradora en líneas y otra a voleo.

En cuanto a la *siembra aérea*, se suele realizar con avionetas equipadas con los mismos materiales que las utilizadas para abonar. Se trata de un método muy caro que sólo compensa su utilización en caso de superficies extensas, o zonas muy pendientes e inaccesibles a otros equipos de siembra.

3.2. Hidrosiembra

Es un método específico de la siembra a voleo y está especialmente indicado para sembrar superficies de elevada pendiente, terrenos poco consolidados y espacios inaccesibles a la maquinaria convencional, tal es el caso de las escombreras, frentes de explotación, desmontes o terraplenes.

La hidrosiembra se basa en la aplicación a gran presión, sobre la superficie del terreno, de una suspensión homogénea de agua y semillas con otros aditivos opcionales como fertilizantes, mulches y estabilizadores químicos.

La maquinaria utilizada es la hidrosebradora. Está compuesta por un camión o remolque al que se acopla una cisterna metálica, desde 700 a 12.000 l de capacidad, con un agitador en su interior constituido por varias paletas que sirven para mezclar los componentes de la hidrosiembra. La plataforma situada en la parte superior del tanque está protegida del exterior por una barandilla que permite al operario moverse con cierta seguridad mientras acciona el tubo o cañón por donde sale la suspensión, Fig 17.11.

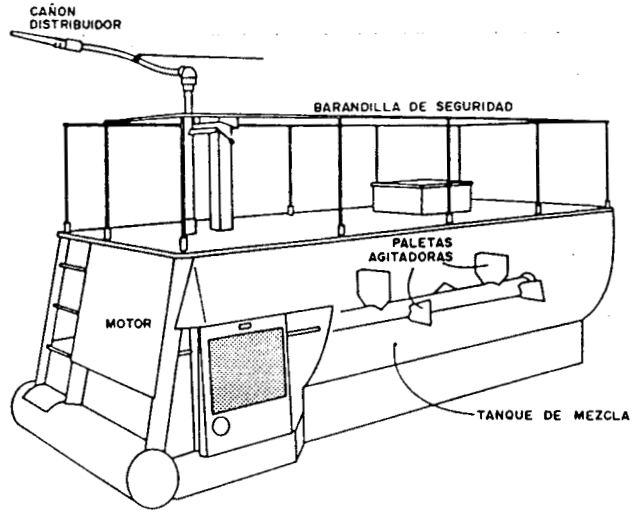


Figura 17.11. Hidrosebradora.

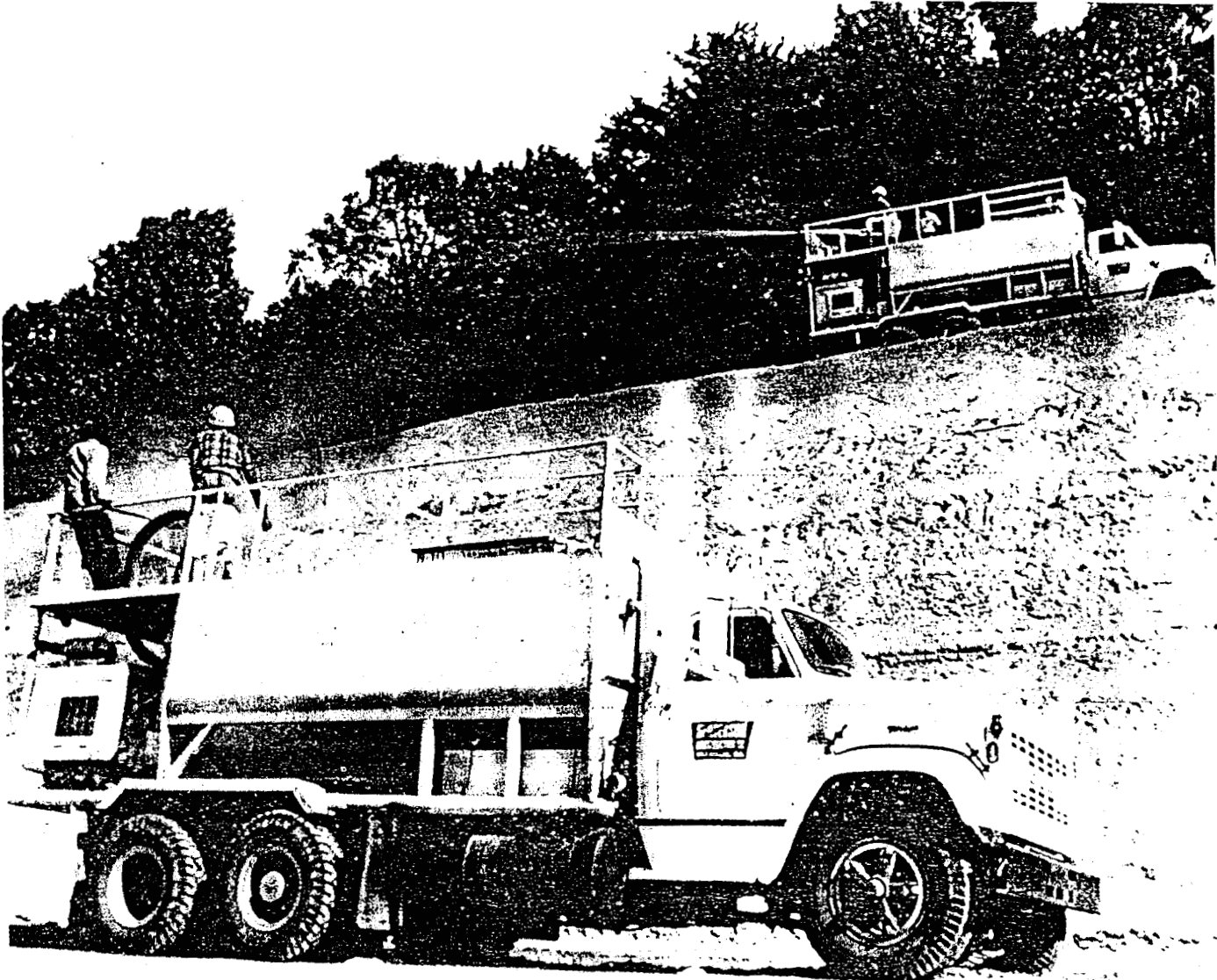


Foto 17.3. Hidrosebradora trabajando desde la cabeza y el pie de un talud. (Bowie Hydro-Mulcher).

La capacidad del tanque está directamente relacionada con el tamaño de la zona a hidros sembrar. Volúmenes superiores a 5.000 l están indicados para zonas de gran superficie, que permiten alcanzar rendimientos de 4 ha/día.

A continuación, se indican algunas desventajas potenciales de este método de siembra:

- Necesidad de una fuente de agua próxima a la zona de trabajo.
- El agua empleada debe estar exenta de sales (concentración de Cl^- y $\text{SO}_4^- = 1\%$ y pH 6-7) para no obtener la manguera de salida de la mezcla.
- El tiempo que se tarda en llenar la cisterna de agua encarece el coste final.
- El sistema de agitación puede dañar las semillas de algunas especies.
- Cuando se añade mulch a la hidros sembradora, sólo se pueden cubrir zonas relativamente pequeñas con cada tanque lleno.
- No es una técnica adecuada para sembrar especies que tengan semillas de gran tamaño (diámetro superior a 20 mm).

La adición o no de determinados productos a la hidros sembradora está en función de las características de la zona a tratar: pendiente, disponibilidad de nutrientes, pH, etc. Seguidamente se exponen algunos aspectos de interés sobre cada uno de los posibles aditivos a emplear.

La caliza o los compuestos ricos en CO_3Ca , sólo se añaden a la mezcla cuando el sustrato a hidros sembrar tiene pH ácido: $\leq 5,5$ (por ejemplo, en escombreras ricas en S_2Fe procedentes de la minería de carbón). La dosis a emplear depende del número de unidades de pH que sea necesario aumentar (diferencia entre el pH inicial y el final deseados). Para mejorar la eficacia de la enmienda es recomendable que se efectue en dos aplicaciones diferentes. No se podrá utilizar caliza cuando se fertilice con compuestos ricos en nitrógeno (NH_3) porque tienden a volatilizarse.

Las necesidades de *fertilizante*, y por ende las dosis, están condicionadas por los resultados obtenidos tras el análisis del sustrato. Los abonos utilizados en la mezcla serán de liberación lenta (compuestos complejos de tipo N-P-K) para no inhibir la germinación de las semillas, especialmente las leguminosas. También en este caso, es recomendable repartir la dosis en varios turnos; Sheldon, J. C. y Bradshaw, A. D. (1977) señalan que en zonas con gran necesidad de nutrientes, es conveniente efectuar la aplicación principal de 4 a 8 semanas después de realizada la hidrosiembra.

La aplicación de una capa de *mulch* sobre la superficie hidros sembrada favorece la implantación de la cubierta vegetal: protege las semillas cubriéndolas, disminuye la erosión y favorece la retención de agua. Dada sus características es recomendable que se añada a la mezcla de la hidros sembradora siempre que se vayan a tratar superficies de pendiente elevada (1:15).

Los compuestos que pueden ser utilizados como materiales protectores del suelo son muchos y variados: paja, fibra larga, pasta de papel, serrín, astillas, etc. En el epígrafe 4 se indican las características más importantes que presentan dichos materiales.

Los *estabilizadores* tienen como función principal mejo-

rar las cualidades edáficas del sustrato sobre el que se aplican y reducir la erosión por aglomeración física de las partículas, a la vez que ligan las semillas y el mulch, pero sin llegar a crear una película impermeable.

Existe una gran variedad de compuestos que pueden actuar como estabilizadores: polímeros químicos biodegradables, resinas sintéticas, extractos acuosos de algas marinas, etc. En general, se puede utilizar cualquier material que cumpla las funciones mencionadas, siempre y cuando no inhiba la germinación.

Los niveles de aplicación de cada uno de los componentes que constituyen la hidrosiembra dependen de la adición o no de mulch. Williamson, indica que la concentración media de sólidos que puede bombearse satisfactoriamente en la hidros sembradora es del 10 % del volumen total: 6 % si el mulch utilizado es de fibra vegetal y mayor del 10 % si se trata, por ejemplo, de lodos procedentes de depuradoras. El volumen óptimo de la mezcla es de 10.000-20.000 l/ha si se emplea mulch y 20.000-35.000 l/ha si no se añade.

El cálculo de la cantidad de ingredientes requerida para llenar una hidros sembradora, se basa en los niveles de aplicación necesarios para cada zona concreta (Kg/ha de fertilizante, semillas, mulch, etc.) y de la capacidad de la cisterna. Con estos datos se obtiene la superficie total que puede hidros sembrarse con cada tanque lleno.

A continuación se indica un ejemplo que ilustra lo anteriormente expuesto; se debe señalar que las cantidades de cada uno de los componentes a mezclar en la hidros sembradora son hipotéticas. Se ha considerado una proporción de compuestos sólidos del 10 % en una concentración de mezcla de 28.000 l/ha.

Ejemplo:

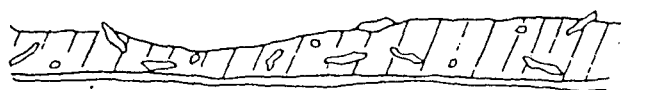
INGREDIENTES	NIVELES REQUERIDOS (Kg/ha)	DOSIS POR TANQUE (Kg)
Semillas (mezcla de gramíneas y leguminosas)	50-100	12,5-25
Mulch (lodos)	2.000	500
Fertilizante	360	90
Estabilizador (alginatos)	200	50
Caliza	600	150

Fuente: Williamson, N. A. et al., 1982.

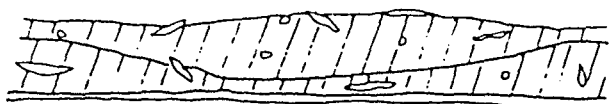
Con la mezcla indicada se podrán cubrir 0,25 ha si la capacidad de la hidros sembradora es de 7.000 l.

Para aumentar la eficacia de la hidrosiembra es mejor aplicar la mezcla en tandas sucesivas (lo común es en dos veces), o dividir la cantidad total y añadirla sobre el terreno de forma independiente. En primer lugar se debe cubrir la zona con la mezcla de semillas y fertilizantes, para que en la segunda pasada los granos que hayan quedado en superficie sean tapados y puedan germinar de forma adecuada. En la Fig. 17.12 se esquematizan las ventajas de la aplicación en tandas sucesivas.

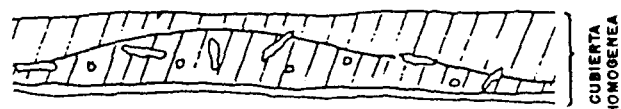
La forma de efectuar la hidrosiembra y la elección de las sustancias a utilizar están muy condicionadas por las características de la zona a cubrir. Es difícil indicar «recetas» concretas que sirvan para una amplia gama de situaciones, ya que la técnica utilizada en un caso determinado puede que no sea apropiada en otro emplazamiento



APLICACION SIMPLE: ALGUNAS SEMILLAS PUEDEN QUEDAR EN SUPERFICIE



APLICACION DOBLE: EN CADA UNA SE EMPLEA LA MISMA CANTIDAD DE SEMILLAS, MULCH Y ESTABILIZADOR



EN LA PRIMERA APLICACION SE APORTAN LAS SEMILLAS Y LOS FERTILIZANTES (MULCH, OPCIONAL). EN LA SEGUNDA SOLO SE AÑA DE MULCH.

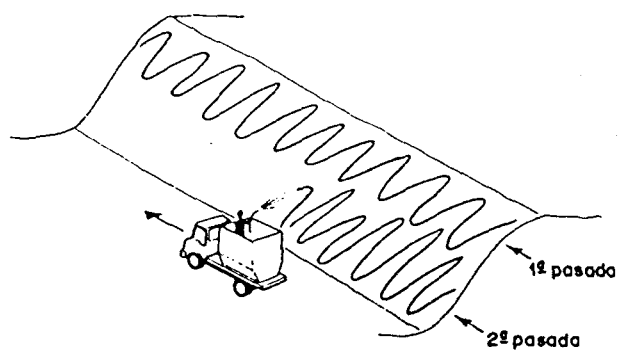
CUBIERTA
HOMOGENEA

Figura 17.12. Ventajas de la hidrosiembra en capas sucesivas. (Coppin y Bradshaw, 1982).

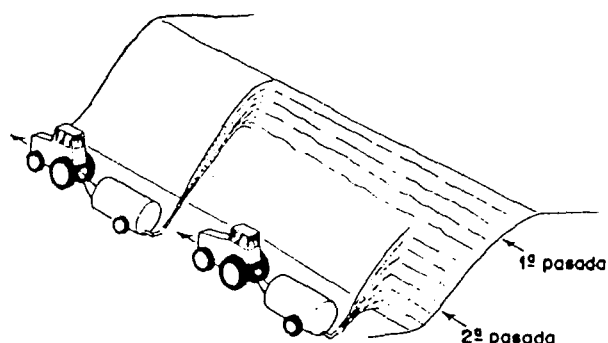
aparentemente similar. Sólo la investigación y la experimentación con nuevos mulches o mezclas en una gran diversidad de zonas podrá avalar la eficacia del método.

En la Tabla 17.VI se comparan tres métodos de hidrosiembra utilizados en la recuperación de taludes afectados por la construcción de carreteras. Los óptimos resultados obtenidos permiten su extrapolación a situaciones tales como la recuperación de terrenos alterados por la minería (García Andrés, T., 1985).

La forma de operar con la hidrosembradora queda reflejada en la Fig. 17.13. Si la manguera por donde se expulsa la mezcla es móvil o se dispone de dos o más equipos de hidrosiembra ésta se deberá efectuar, bien con movimientos zigzageantes, bien de forma que una hidrosembradora comience por la parte superior del talud y otra, más retrasada, por la inmediatamente inferior, de tal ma-



UNA UNICA HIDROSEMBRADORA CON MANGUERA MOVIL



DOS HIDROSEMBRADORAS CON MANGUERA FIJA

Figura 17.13. Método de hidrosiembra en taludes (Coppin y Bradshaw, 1982).

nera que se obtenga una cubierta uniforme (se pueden añadir colorantes a la suspensión para ayudar a reconocer mejor las zonas hidrosembradas). La segunda pasada se efectuará en dirección opuesta (ángulo recto) o con un movimiento contrario al empleado en el primer caso, desde la cabecera del talud.

En paredes rocosas o extremadamente pendientes (taludes finales de explotación, caras de banco, etc.) y de

TABLA 17.VI. COMPARACION ENTRE TRES TECNICAS DE HIDROSIEMBRA

TIPO DE HIDROSIEMBRA	CONDICIONES DEL TERRENO	PASADAS		MAQUINARIA A EMPLEAR		OBSERVACIONES
		A. Hidrosiembra	B. Tapado y trabado	A. Hidrosiembra	B. Tapado y trabado	
Bajo mulch de fibra larga trabada con emulsión asfáltica.	Terrenos sin humus y sin aportación de tierra vegetal.	Agua + semilla + abono mineral + mulch de fibra corta o pasta mecánica.	0,5-1 Kg. Paja de cereal (fibra larga) mezcla con betún.	Hidrosembradora.	Lanzapajas.	Método caro: requiere espesores mayores y elevadas dosis de betún o asfalto.
Bajo mulch de fibra corta y estabilizador.	Adecuado para superficies de elevada pendiente.	Agua + semilla + abono complejo + mulch (pasta mecánica).	150 g/m ² Mulch + 5 g/m ² . Estabilizador.	Hidrosembradora.	Hidrosembradora.	—
Con espuma de urea-formaldehído.	Suelos extremadamente áridos.	Agua + semilla + abono complejo + mulch.	Resina triturada y mezclada con agua 0,5-1 Kg/m ² .	Maquinaria específica con tres bocas de alimentación: toma de agua, molino y tolva de semillas.		Método caro por el precio de la urea-formaldehído.

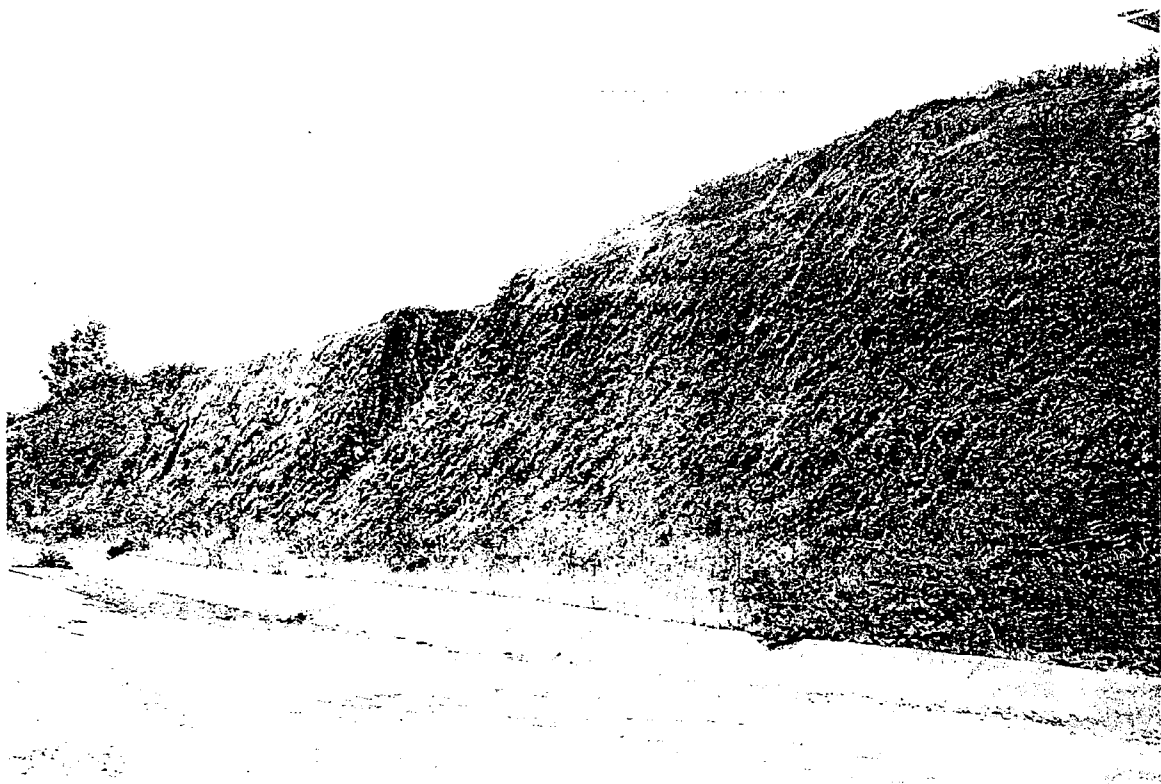


Foto 17.4. Talud en roca hidrosembrado junto a la cuneta de guarda de una mina.

gran altura, donde la hidrosembradora no pueda alcanzar la superficie total (la altura normal de alcance de la manguera es de 20 a 50 m), se requieren técnicas especiales, Fig. 17.14.

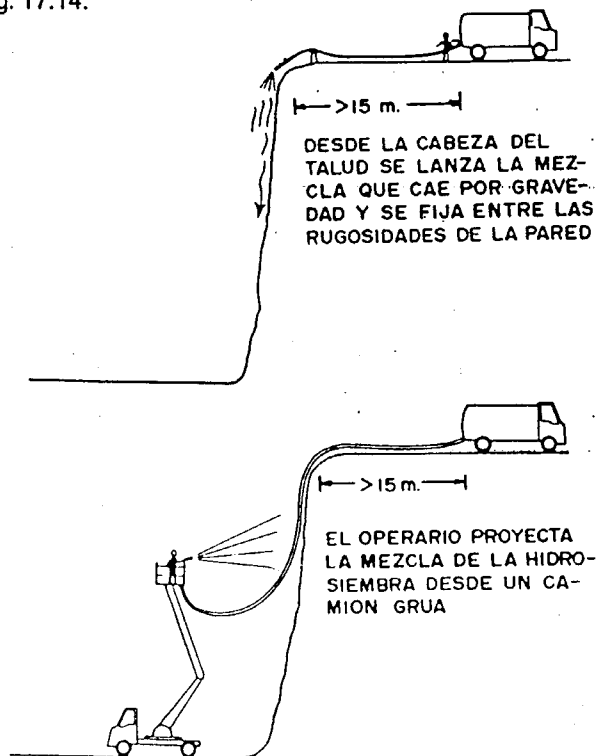


Figura 17.14. Formas de aplicar la mezcla de semillas sobre taludes rocosos (Coppin y Bradshaw, 1982).

3.3. Otros métodos de siembra

La implantación de semillas de especies arbóreas se puede efectuar mediante la apertura de un hoyo de 10 a 15 cm de profundidad, añadiendo en el fondo fertilizante de liberación lenta (2 g de fertilizante nitrogenado de 5 % de N), Fig. 17.15. El número de semillas que se pueden colocar por hueco depende del tamaño de las mismas, Tabla 17.VII.

Para crear unas condiciones ambientales idóneas es conveniente extender, alrededor del agujero, una capa de mulch que retenga la humedad del suelo (en una superficie de 0,6 a 1 m de diámetro).

En el segundo año se extraen las plántulas desarrolladas, dejando únicamente un ejemplar en cada hoyo. Se requieren controles periódicos de humedad y fertilización.

TABLA-17.VII. RELACION ENTRE EL TAMAÑO DE LAS SEMILLAS Y EL NUMERO QUE PUEDEN DEPOSITARSE EN CADA HOYO

DIAMETRO	NUMERO DE SEMILLAS
< 1,5	20
1,5- 3	10
3 - 6	5
6 -12,5	3

Fuente: Coppin, N. J. and Bradshaw, A. D., 1982.

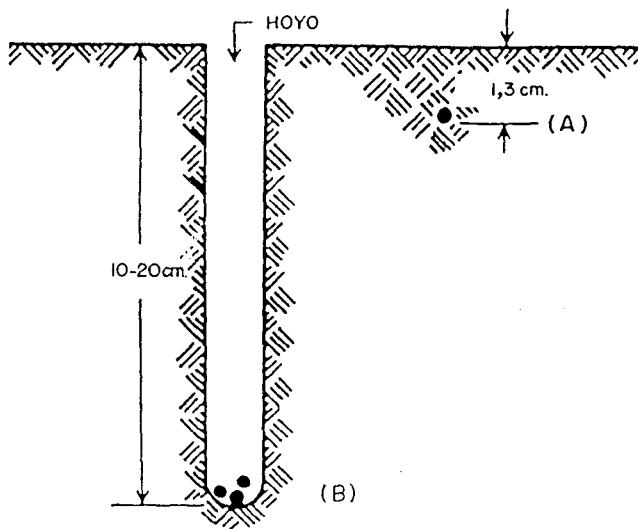


Figura 17.15. Comparación entre el método tradicional de siembra (A) y la técnica de apertura de hoyos profundos y estrechos, donde se depositan las semillas (B).

Otra técnica alternativa a la hidrosiembra y específica para sembrar árboles y arbustos, consiste en lanzar, bien de forma mecánica, bien de forma manual cuando la zona es pequeña o difícil, una mezcla de semillas, fertilizante y mulch (fibra vegetal) sobre pequeñas superficies, de 9 cm de ancho y 13 cm de longitud y a intervalos determinados de antemano y controlados por la maquinaria. Este método es más barato que la plantación manual de especies vegetales criadas en vivero.

3.4. Época de siembra

Los factores que van a condicionar la época de siembra son principalmente las características climáticas y microclimáticas locales de la zona, además de la técnica de implantación elegida, el acondicionamiento del terreno y las características mesológicas de las especies a sembrar.

De forma general, la época idónea de siembra coincide con el comienzo de la estación de desarrollo: la semilla necesita germinar y establecerse antes que se inicie el período de latencia y las condiciones atmosféricas se vuelvan adversas. Normalmente coincide o precede a la época de lluvias.

Las semillas tienen que tener la suficiente humedad para germinar y no deben someterse a períodos de estrés hídrico. Ello indica que el verano es la estación menos adecuada para proceder a la siembra, incluso si se dispone de un sistema de riego intenso.

En general, en la Península Ibérica, la mejor época de siembra coincide con los comienzos de la primavera y el final del otoño, antes que comiencen los fríos y heladas del invierno. Sin embargo, dada la diversidad climática, dicha época dependerá de las condiciones concretas de la zona donde vaya a efectuarse la siembra.

El final del otoño puede ser una época poco adecuada

para la siembra de algunas especies leguminosas, susceptibles a ser atacadas por hongos.

Las áreas de montaña que cuentan con períodos de germinación cortos y con épocas relativamente largas en que el suelo permanece encharcado, la siembra se deberá efectuar a finales de otoño, pero sin coincidir con el comienzo de las nevadas.

Las especies arbóreas o arbustivas que necesitan un tratamiento natural de frío para poder brotar, se deberán plantar al comienzo del invierno para que puedan germinar en la primavera siguiente.

La revegetación tiene más éxito cuando se efectúa inmediatamente después de preparado el terreno. En caso de que esto no pudiera llevarse a cabo sería conveniente fertilizar la zona y sembrarla con especies herbáceas que protegen el suelo. La mezcla principal de semillas se sembraría en una segunda etapa durante el otoño o la primavera siguiente.

3.5. Calidad de las semillas y dosis de siembra

Las semillas compradas deberán proceder de casas comerciales acreditadas. Toda la información referente a su grado de calidad tendrá que estar perfectamente descrita en su etiqueta correspondiente y los sacos donde se almacenen, sellados y cosidos.

No podrán presentar signos de haber sufrido enfermedad micológica alguna, y deberán estar libres de parásitos e insectos.

Usar semillas de calidad dudosa o imprecisa puede influir negativamente en el establecimiento de la vegetación. Sin embargo, ello puede estar justificado en el caso que se recolecten los frutos localmente, para añadirlos a la mezcla principal de semillas con objeto de aumentar la diversidad florística o controlar la erosión.

Obviamente, la cantidad de semilla que debe emplearse para cubrir una zona varía según los condicionantes de la misma; es decir, en función del uso que se pretenda, el tipo de vegetación seleccionada, la técnica de implantación que vaya a emplearse y, naturalmente, las condiciones físicas del terreno (Tabla 17.VIII).

A la hora de calcular la dosis de siembra, siempre hay que hacerlo con un amplio margen, ya que no todas las semillas que vayan a ser sembradas germinarán, bien por no encontrarse en las condiciones ambientales adecuadas (falta de humedad, helada, pérdida por erosión, etc.), bien porque no tengan un nivel de germinación adecuado.

La tasa real de germinación es un factor que indica la pureza y el nivel de germinación de las semillas ($TRG = \% \text{ pureza} \times \% \text{ germinación}$): cuanto mayor sea, mayor será la probabilidad de supervivencia de la semilla. La cantidad real necesaria para sembrar una hectárea de terreno viene determinada por:

$$\text{Dosis real (Kg/ha)} = \frac{TRG}{\text{Kg/ha estimada}} \times 100$$

TABLA 17.VIII. NIVELES DE SIEMBRA
(1 Kg = 1.000 semillas)

METODO	CULTIVO PROTECTOR (Kg/ha)	ESPECIES NATURALES (Semillas/m ²)	GRAMINEAS LEGUMINOSAS (Kg/ha)	ARBOLES Y ARBUSTOS (Semillas/m ²)
• Siembra en hileras	10	10	25- 40	5
• Siembra a voleo o hidrosiembra:				
— Fuertes pendientes (con mulch)	10- 50	20	80-100	5-10
— Pendientes medias (sin mulch)	50-100	20	150	5-10
— Pendientes ligeras o zonas llanas (sin mulch)	10	10	50	5-10

Fuente: Coppin, N. J. and Bradshaw, A. W., 1982 (modificado).

La mezcla debe ser equilibrada, de tal manera que no se produzca competencia entre especies, ni se inhibe el desarrollo de algunas. Por ejemplo, las especies herbáceas anuales no deberán tener una gran representatividad ya que ello podría retardar el establecimiento de especies permanentes, de mayor interés.

4. MULCHES Y ESTABILIZADORES

Se define como *mulch* toda cubierta superficial del suelo, de naturaleza orgánica o inorgánica, que tenga un efecto protector y ayude al establecimiento de la vegetación. Es importante no confundir a este tipo de materiales con las enmiendas edáficas ya que éstas también aumentan la producción vegetal, pero su nivel es distinto: se incorporan al desarrollo evolutivo del suelo, mejorando y variando intrínsecamente las propiedades físico-químicas del sustrato edáfico. Algunos compuestos orgánicos pueden actuar como mulch y enmienda.

Las razones que justifican el uso de mulch son muchas y variadas; a continuación se indican de forma esquemática alguna de sus cualidades más importantes:

- Reducen el impacto que las gotas de lluvia producen en el suelo: *disminuyen la erosión hídrica*.
- Ralentiza el flujo de agua de escorrentía.
- Disminuye la velocidad del viento: *erosión eólica*.
- Disminuye la evaporación y conserva la humedad del suelo.
- Limita el movimiento de aire y aumenta la humedad relativa en la superficie del suelo.
- Aumenta la capacidad de infiltración.
- Modifica las temperaturas extremas en la superficie del suelo.
- Retiene a las semillas y plantas y promueve un microhábitat que favorece su germinación.
- Algunos tipos de mulch introducen microorganismos.
- Disminuye la probabilidad de que se produzcan heladas.

La aplicación de mulch está muy indicada cuando las condiciones ambientales son extremas (salinidad, temperaturas altas, baja pluviometría y humedad, etc.). Según Turelle (1973), los mulches son esenciales cuando no se pueda efectuar una «cama de siembra» adecuada, la siembra tenga que realizarse fuera de la estación idónea, el suelo sea altamente erosionable o cuando la zona presente pendientes especialmente fuertes.

El tipo de mulch a utilizar se seleccionará en función de los requisitos que concurren en cada caso concreto:

- Uso del suelo.
- Características climáticas y atmosféricas.
- Topografía del terreno.
- Disponibilidad de los materiales.
- Coste del material (lo que más encarece el uso de mulch es el transporte hasta la zona de destino).

Como ya se ha indicado anteriormente existe una gran variedad de mulches y estos pueden diferenciarse según su origen y naturaleza.

Tipos de Mulch:

- Orgánicos:
 - Residuos agrícolas: heno, paja, molidos de soja, zuros de maíz, residuos de lúpulo, cáscaras de cacahuetes y arroz, residuos de la caña de azúcar, granos aplastados, pienso, etc.
 - Residuos forestales: celulosa, serrín, lana (exclisor) de madera, corteza de árbol, hojas y acículas, astillas, cenizas, hidromulches (fibra vegetal y pasta de papel).
- Inorgánicos: fibra de vidrio, grava, gravilla, emulsiones bituminosas, plásticos, geotextiles.

En la Tabla 17.IX se indica la efectividad de distintos tipos de mulches para controlar la erosión.

TABLA 17.IX

MULCHES	EROSION RELATIVA (Referida a la medida en la malla de yute)
1. Malla de yute	1,0
2. Manta de lana de madera	1,1
3. Fibra de vidrio y emulsión asfáltica	1,4
4. Virutas de madera y emulsión asfáltica	2,3
5. Heno y emulsión asfáltica	2,5
6. Emulsión asfáltica	2,5
7. Restos de maíz y emulsión asfáltica	4,5
8. Celulosa y malla ancha de papel	7,9
9. Fibra de vidrio	7,9
10. Celulosa y emulsión asfáltica	8,5
11. Celulosa	12,9
12. Malla de pasta Kraft	20,7
13. Látex	25,4

Fuente: Cátedra de Planificación y Proyectos, ETSI de Montes, 1983.

La forma de aplicar el mulch es, bien junto a la mezcla de semillas y otros aditivos en la hidrosebradora o hidromulch, bien con abonadoras. Se suele aplicar a 30 m de distancia aproximadamente y en el sentido longitudinal de la pendiente. Cuando se trata de zonas pequeñas o inaccesibles a la maquinaria se puede extender manualmente.

La aplicación de mulches sobre terrenos en pendiente o excesivamente lisos (pared de roca, terrenos que han sido perfilados, etc.) puede no ser efectiva si este tipo de material no queda bien fijado al sustrato. La resistencia de los mulches al movimiento por aire y agua se incrementa si se retienen al suelo mediante algún tipo de sustancia o procedimiento que sirva de «pegamento»: riego asfáltico, malla, grapas, paso de rodillos o gradas, etc. En general, se deben utilizar mulches flexibles, manejables y que se acomoden fácilmente a las irregularidades del terreno.

Los materiales utilizados como mulches protectores deberán ser biodegradables y químicamente inertes para no dañar ni a las semillas ni a las plántulas.

La dosis de aplicación está muy relacionada con el tipo de material utilizado. Por ejemplo, se requieren de 3.800 a 5.000 Kg/ha como mínimo de paja cortada para que ésta sea efectiva (HACKETT, B., 1972). En la Tabla 17.X se indican algunos niveles de aplicación para distintos materiales y el grado de estabilización que producen.

TABLA 17.X. DOSIS DE APLICACION Y GRADO DE ESTABILIZACION PRODUCIDA

MATERIAL	DOSIS (t/ha)	ESTABILIZACION
Excelsior	2-4	Buena
Serrín	2-4	Baja
Astillas	5-10	Baja
Fragmento de corteza	2-4	Media
Turba	2-4	Media
Heno o paja picada	2-4	Media
Fibra vegetal	2-3	Muy buena
Fibra de algodón	0,5-2	Muy buena
Pulpa de fibra vegetal	2-3	Baja
Papel triturado	2-3	Muy buena
Pasta de papel	2-3	Media
Lodos procedentes de la digestión de depuradoras	1-5	Pobre

Fuente: Coppin, N. J. and Bradshaw, A. D., 1982.

Se define como *estabilizador* todo producto químico, orgánico o inorgánico que, aplicado superficialmente en solución acuosa, protege temporalmente al suelo del viento y la erosión.

Produce la aglomeración física de las partículas mediante la formación de enlaces coloidales orgánicos. Ello a su vez aumenta la capacidad de retención del agua y disminuye la evaporación.

La vida media de los estabilizadores es más corta que la de los mulches, sólo son efectivos hasta que la vegetación arraiga. Tienen que ser productos biodegradables y no tóxicos, aunque hay algunos que pueden ser perjudiciales para las plántulas, especialmente las leguminosas.

Pueden ser de naturaleza muy diversa, extractos acuosos de algas marinas u otras plantas, alginatos, gomas (mucilagos), plásticos sintéticos, resinas, caucho, etc. Los de uso más frecuente, a pesar de su precio elevado, son los productos de síntesis: polímeros acrílicos y vinilos de plástico líquido, acetatos de polivinilo (PVA), etc.

Los *estabilizadores* actúan de tres maneras diferentes: formando geles cohesivos que aglutinan las partículas del suelo, formando costras superficiales o creando una pequeña y delgada película en la superficie que protege al suelo del movimiento.

Pueden ser aplicados mediante maquinaria agrícola convencional: vaporizadores de boquilla gruesa; los niveles de dilución pueden ser bajos. Sin embargo, es la hidrosebradora el método más usual de aplicación; los niveles de dilución dependen de la capacidad del tanque.

Como resumen al presente apartado, se presenta la Tabla 17.XI, donde se indican los mulches y estabilizadores más usuales en la recuperación de zonas degradadas y las dosis de aplicación, así como los niveles de efectividad alcanzados por cada uno.

TABLA 17.XI. MULCHES Y ESTABILIZADORES DE USO FRECUENTE EN LA RECUPERACION DE ZONAS DEGRADADAS

MATERIAL	DOSIS (T/ha)	PERSISTENCIA	ESTABILIZACION	RETENCION DE AGUA	NUTRIENTES	TOXICIDAD
Mulches:						
Excelsior	4	Media	Media	Media	—	—
Serrín	4	Media	Baja	Baja	—	—
Astillas	10	Media	Baja	Media	—	—
Corteza	4	Alta	Baja	Media	—	—
Turba/musgo	2	Baja	Baja	Baja	—	—
Red de yute	—	Media	Alta	Baja	—	—
Heno	3	Baja	Alta	Baja	Baja	—
Paja	3	Media	Alta	Baja	—	—
Fibra de vidrio	1	Alta	Media	Baja	—	—
Estabilizadores mulches:						
Fibra celulosa (como suspensión)	1-2	Media	Alta	Baja	—	—
Lodos (como suspensión)	2-4	Baja	Media	Baja	Baja	—
Estabilizadores:						
Asfalto (1:1)	0,75	Baja	Media	Baja	—	Baja
Látex (emulsión)	0,2	Baja	Media	—	—	Media
Alginatos y otros coloides carbohidratados (emulsión)	0,2	Media	Media	—	—	—
Acetato de polivinilo (1:5)	1	Media	Media	—	—	Media
Estireno butadieno (1:20)	0,2	Media	Media	—	—	Media

Fuente: Bradshaw, A. D. and Chadwick, M. J., 1980.

5. OTROS METODOS DE IMPLANTACION

En apartados anteriores se han analizado los métodos de implantación de uso más común. Sin embargo, existen otros sistemas que aun siendo también su objetivo final la instauración de la vegetación, no emplean los métodos tradicionales de plantación y siembra. Están especialmente indicados en terrenos fuertemente degradados y que presentan pendientes elevadas, y para introducir especies vegetales naturales. A continuación se indican algunas de las técnicas más usuales.

5.1. Horizonte superficial del suelo como fuente de semillas naturales

Se trata de un método apropiado para la regeneración de comunidades vegetales naturales. Dicho método está basado en la utilización de los primeros centímetros de suelo, 2 cm en terreno no cultivado, rico en materia orgánica y frutos (procedente de turberas, prados, etc.), como capa protectora y suministradora de semillas.

El método consiste básicamente en decapar el horizonte superficial, de forma mecánica principalmente (aspiradora de semillas y humus), y extenderlo sobre la superficie a revegetar, bien a mano, si el área es pequeña, bien con hidrosembradora.

A pesar de contener suficiente material vegetal, no suele ser un método de resultados rápidos. En algunas ocasiones es necesario cultivar especies protectoras no com-

petitivas o cubrir el cultivo para disminuir el tiempo de germinación y estabilizar el terreno al mismo tiempo.

5.2. Encespedamiento

La vegetación herbácea puede ser introducida mediante el trasplante de tepes o «mantas» de césped cultivadas y producidas en vivero. Es un método muy caro y sólo se suele usar para cubrir zonas pequeñas y con fines paisajísticos y recreativos, principalmente.

El tamaño de los tepes es muy variado, desde pocos centímetros hasta varios metros cuadrados. El espesor suele ser de unos 60 mm y se colocarán horizontalmente o diagonalmente de forma alterna en «aparejo de tizones» y asegurándoles posteriormente con estaquillas de madera o con clavos. En zonas muy escarpadas se podrán colocar sobre el césped redes de alambre o yute, que también se fijarán al suelo.

Este método además de mejorar rápidamente el aspecto visual de la zona recuperada tiene un efecto protector y estabilizador del suelo, disminuyendo la superficie de escorrentía del agua.

Es necesario conseguir un buen contacto entre las raíces del césped y la superficie del suelo, de manera que la vegetación enraíce rápidamente y pueda sobrevivir. Para ello, puede ser necesario escarificar el terreno previamente, de manera que se creen pequeñas rugosidades en superficie. El riego también es un factor beneficioso si hay posibilidad de que se produzcan periodos de sequía tras el establecimiento de los tepes.

5.3. Trasplante de vegetación natural

En algunas ocasiones es necesario utilizar la vegetación natural para revegetar las zonas degradadas por falta de semillas o ejemplares en vivero, por ser necesario trasladar algunas plantas, dentro de la propia zona a recuperar, a un lugar más adecuado, etc.

El método utilizado es el trasplante de la vegetación, que consiste en mudar la planta desde el sitio donde fue plantada o desarrollada naturalmente a otro.

Generalmente es una operación difícil y costosa, sólomente deberá intentarse con los vegetales que, por su tamaño o desarrollo, posean un «valor especial» y que además reúnan las condiciones fisiológicas adecuadas para asegurar el éxito a la operación.

Las especies de hoja caediza podrán trasplantarse a raíz desnuda cuando el diámetro del tronco sea inferior a 20 cm (medido a un metro del suelo). En individuos de tamaño superior sólo se deberán trasladar en situación muy concreta y con el sistema radicular protegido por el cepellón.

En cuanto a las especies de hoja persistente, siempre se trasladan con cepellón y hay menos restricciones en cuanto al tamaño del individuo.

En el caso de que la planta sea grande, no se plante en el momento o haya que trasladarla a un lugar alejado, se deberá inmovilizar el cepellón, bien rodeándolo con una envoltura de yeso o escayola, bien con duelas de madera muy apretadas contra la tierra. En cualquier caso será conveniente cortar las raíces que sobresalgan del cepellón.

En el momento de extraer la planta del terreno, se efectuará verticalmente y con cuidado para no separar la planta.

La plantación deberá efectuarse de la siguiente manera:

1. Preparación del terreno: desfonde (50 cm de profundidad sin voltear) y laboreo o mullido del suelo.
2. Excavación del hoyo. El volumen de excavación dependerá del tamaño del árbol, por ejemplo, para un ejemplar de 2 a 3 m de altura y de 18 a 20 cm de diámetro se efectuará un hoyo de $0,6 \times 0,6 \times 0,6 \text{ m}^3$.
3. Incorporación de abonos y enmiendas. Bien al propio material excavado o bien directamente en el hoyo, momentos antes de la plantación.
4. Relleno. Se deberá efectuar en tongadas, compactando el suelo a continuación.
5. Poda de plantación. El sistema radicular de la planta deberá ser cortado para evitar un desequilibrio inicial entre las raíces y la parte aérea.

Otros métodos de estabilización y plantación de vegetación ya han sido comentados en el Capítulo 15 del presente manual: uso de turba o tierra vegetal; entramados de estaquillas o mimbre y matorral, sobre los que se deposita una capa de tierra vegetal y se cubre con malla de alambre; mallas extensibles de plástico o fibra de vidrio sobre los que se siembra; bloques huecos de hormigón; etc.

6. CUIDADOS POSTERIORES A LA IMPLANTACION

La implantación de la nueva vegetación no queda concluida con la plantación o siembra propiamente dicha, sino que es necesario efectuar una serie de cuidados posteriores que garanticen el desarrollo adecuado de la misma, hasta que pueda mantenerse por sí sola.

El período de tiempo durante el cual es necesario efectuar las labores de mantenimiento está en función del tipo de vegetación instalada, de la calidad del sustrato sobre el cual se asienta y de las condiciones atmosféricas de la zona.

De forma general, puede indicarse que los cuidados mínimos que deben llevarse a cabo son:

- Riego.
- Fertilización: requerimientos nutricionales de las plantas.
- Reposición de marras.
- Colocación de vientos y tutores.
- Plazo de garantía y repetición de las hidrosiembras.
- Análisis edáficos periódicos, especialmente en zonas contaminadas: presencia de elementos tóxicos, salinidad, acidez, etc.
- Aclareo de zonas plantadas y siega de superficies sembradas.

6.1. Riego

Es una labor fundamental en zonas extremadamente áridas con precipitaciones inferiores a 350 mm/año. También es necesario la aplicación de riegos periódicos en áreas donde se hayan implantado especies arbóreas muy sensibles a la sequía.

La periodicidad en los riegos y la cantidad de agua a emplear en cada uno de ellos están limitadas por la disponibilidad hídrica de la zona.

La dosis de riego depende de los requerimientos de agua de las distintas especies vegetales implantadas y de la composición textural del sustrato. A continuación se exponen las necesidades de agua para distintos materiales, según su contenido en arcillas, Tabla 17.XII.

TABLA 17.XII

MATERIAL	DURACION DEL RIEGO	FRECUENCIA DEL RIEGO
> 50 % de arcillas	8 horas	Todos los días
30-50 % de arcillas	6 horas	Cada 6 días
< 30 % de arcillas	4 horas	Cada día

Fuente: Vogel, W. G., 1987.

En períodos de fuertes sequías, durante el verano principalmente, sería conveniente efectuar dos riegos semanales de 8 h cada uno, con volumen de agua de 9-7 litros/hora (si la sequía no es demasiado intensa se puede

reducir a 1 riego de 8 horas/semana). El volumen de agua y la frecuencia de riegos se puede reducir gradualmente en el segundo año.

Los sistemas de riego de uso más frecuente son el riego por goteo y por aspersión. En la Tabla 17.XIII se indican las ventajas y desventajas más importantes de cada una de las técnicas de riego indicadas.

en especies leguminosas. La aplicación podrá ser de 5 g N/árbol o 50 g N/ha en superficies sembradas a voleo, durante una o dos veces al año y en un período de 2 a 3 años después de realizada la implantación.

Los fertilizantes pueden ser añadidos en forma de abonado foliar o diluidos en el agua de riego.

El tipo de fertilizante que es aconsejable aplicar depen-

TABLA 17.XIII. COMPARACION ENTRE EL RIEGO POR GOTEO Y EL RIEGO POR ASPERSION

SISTEMA DE RIEGO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Goteo	<ul style="list-style-type: none"> — Necesita 1/3 de agua menos que el riego por aspersión. — Evaporación mínima. — Produce el lavado de sales en zonas con alto contenido en CO₃Ca. 	<ul style="list-style-type: none"> — La efectividad del sistema está condicionado por la calidad del agua (sedimentos, sales, etc.). — Necesidad de mantenimientos periódicos. — Sistema poco móvil. — Corta vida de los equipos de riego. — Uso limitado en zonas de alta densidad de plantación. — Sistema caro.
Aspersión	<ul style="list-style-type: none"> — Sistema flexible y móvil: se puede colocar donde se quiera. — La vida media del equipo es más larga que la del sistema por goteo. — Menor trabajo de mantenimiento. — Sistema más económico. — No está limitado por la densidad de plantación. 	<ul style="list-style-type: none"> — El agua se evapora más fácilmente. — Se necesitan grandes cantidades de agua. — Se debe aplicar con mayor frecuencia.

El riego se debe efectuar en las primeras horas de la mañana o las últimas de la tarde y nunca coincidiendo con días de fuertes vientos, para evitar una evaporación intensa del agua.

6.2. Fertilización

Se deberán efectuar chequeos anuales para asegurarse que las plantas no presentan deficiencias nutricionales. Síntomas tales como amarilleamiento del follaje, aparición de calveros, disminución en el tamaño de los ejemplares, presencia de árboles muertos, observación de parásitos u hongos, etc., pueden ser indicativo de que las especies vegetales están mal nutridas o tienen deficiencia en algún elemento esencial.

Dado que el sustrato no suele presentar una calidad adecuada debido a que se trata de terrenos degradados, las muestras se tomarán de las plantas directamente, haciéndose análisis foliares. Ello no significa que no sea adecuado analizar el sustrato, pero este tipo de muestreo está más encaminado al conocimiento de la presencia de elementos tóxicos, valor del pH, etc.

En los suelos fértiles no es preciso efectuar abonados periódicos de mantenimiento, pero en zonas degradadas y poco productivas es esencial la aplicación de fertilizantes nitrogenados, sobre todo en terrenos exentos o pobres

de de las carencias nutricionales que se hayan presentado, del tipo de material sobre el que se planta, del pH, de la presencia de especies vegetales competidoras, etc., pero básicamente estarán formados por nitrógeno, fósforo y potasio, que son los elementos nutritivos fundamentales para el desarrollo: fertilizantes complejos de tipo N-P-K de liberación lenta.

6.3. Reposición de marras

Durante el verano siguiente a la plantación (6 meses aproximadamente) se deberá comprobar la presencia de ejemplares arbóreos o arbustivos muertos por cualquier causa. El número de plantas secas o la proporción de superficie, respecto al total donde no se ha desarrollado la vegetación, es indicativo del tipo de problema que ha podido producir la muerte de las plantas: enfermedad, mala calidad de la vegetación, problemas de toxicidad, empleo inadecuado de la técnica, competencia de otras especies, etc.

En cualquier caso será necesario reponer los pies muertos, excepto en situaciones en que la mortalidad afecte a más del 70 % del total y cuando se observen grandes calveros entre la plantación, ya que ello puede ser indicativo de que tal especie no es adecuada para la zona.

6.4. Colocación de vientos y tutores

Cuando las plantas alcanzan una altura de 1,5 m es conveniente sujetarlas con un tutor (como ya se ha indicado).

En el caso de especies vegetales de hoja persistente o muy desarrolladas, el tutor no es una medida suficiente de sujeción. Entonces es necesaria la colocación de vientos; se trata de cuerdas o cables que se atan por un extremo al tronco del árbol a la altura conveniente y por otra al suelo, se deberá proteger la corteza convenientemente.

Los soportes deberán reemplazarse cada 3 años, si el árbol todavía no puede sostenerse por sí mismo.

En las visitas periódicas se irán abriendo los enganches entre los vientos o tutores y plantas, para permitir un crecimiento adecuado.

6.5. Repetición de la hidrosiembra

Si pasado dos meses después de efectuada la hidrosiembra no se observa ningún brote de vegetación es necesario repetir la actuación de nuevo.

6.6. Control de la calidad del sustrato

Estos controles periódicos están especialmente indicados cuando se trata de terrenos fuertemente contaminados por elementos tóxicos: valores extremos de pH, concentración de sulfuros, hierro, sales, etc. En cada situación concreta se procederá a realizar las operaciones oportunas; exceso de pH: aporte de caliza; concentración elevada de sales: riegos periódicos (con cuidado para no producir la pérdida de nutrientes); presencia de elementos tóxicos: neutralización; etc.

6.7. Aclareo y eliminación de las malas hierbas

En zonas con una densidad de población excesivamente alta o superior a la señalada inicialmente como adecuada para cubrir los objetivos propuestos (cada uno necesita una densidad de plantación diferente), es necesario efectuar un aclareo de la vegetación con el fin de conseguir el volumen de plantación deseado.

Normalmente, en las zonas donde la vegetación haya sido introducida mediante plantación no será necesario efectuar aclareos. Este tipo de prácticas suele ser aplicado en superficies sembradas a voleo donde no es fácil predecir la distribución espacial de las especies.

Una actuación esencial en la plantación es suprimir la vegetación anual que crece alrededor de los ejemplares plantados. Es más importante controlar dicha vegetación que la que crece entre los «pies». Ello se debe a que la competencia por la humedad y los nutrientes del suelo es más intensa en las proximidades de la zona radical de la planta.

La eliminación de las malas hierbas se puede efectuar de diferentes maneras:

1. Antes de ejecutar el hoyo de plantación.
2. Inmediatamente después de plantado el ejemplar.

3. Repetir las visitas una o dos veces durante la estación de crecimiento y si es necesario aplicar herbicidas.
4. En plantación de especies jóvenes podrá ser conveniente efectuar visitas durante los dos o tres primeros años, si la vegetación competitiva es muy densa.

El sistema de eliminación de la vegetación puede ser manual, mecánico, químico, etc. Siempre deberá aplicarse el método menos perjudicial para el entorno y la propia planta. También se tomarán las medidas oportunas en cuanto a la seguridad de los operarios que manejan los herbicidas y en algunas ocasiones será necesario cubrir los árboles para protegerlos del efecto de éstos.

TABLA 17.XIV. METODOS DE ERRADICACION DE LA VEGETACION COMPETITIVA

METODO	OBSERVACIONES
Manual (hoz, azadilla)	Método caro; no es perjudicial para la planta.
Mecánica (segadoras, rodillos)	Pueden afectar al árbol.
Químicos (uso limitado): Sprays, paraquat Dalapon Glyphorato, altracinas	De contacto; acción foliar; no sistemático. Control de gramíneas; sistemático. Aplicación en invierno; alto espectro; sistemático.
Granulados: Glorotiamida, propizamida y diclorobencil	Sólo se aplican en invierno. No son perjudiciales ni producen problemas residuales. Baratos.

Fuente: COPPIN, N. J., and BRADSHAW, A. J., 1982.

6.8. Siegas

En las superficies hidrosebradas o sembradas a voleo con especies de carácter encespedante, la vegetación se desarrolla rápidamente. Si no se efectúan algunas siegas periódicas, se pueden producir acúmulos de vegetación muerta, perjudicial para el desarrollo futuro y alteraciones en el paisaje circundante (agostamiento de la hierba crecida, amarilleamiento, calveros, etc.).

La frecuencia de las siegas dependen del tipo de vegetación instalada y del uso final que se pretenda; por ejemplo en zonas destinadas a áreas deportivas y recreativas, la vegetación herbácea deberá ser cortada cada dos o tres semanas durante el verano: es preferible varias siegas ligeras que una demasiado intensa.

BIBLIOGRAFIA

- ANON: Hydroseed for efficient reclamation. *Coal Mining and Processing*, 4:74-8. Citado en: WILLIAMSON, N. A.; JOHNSON, M. S. and BRADSHAW, A. D., 1982. *Mine Waste Reclamation*. Mining Journal Books. England, 1967.
- BRADSHAW, A. D. and CHADWICK, M. J.: «The restoration of land. *Studies in Ecology*»; Vo. 6. Citado en: WILLIAMSON, N. A.; JOHNSON, M. S. and BRADSHAW, A. D., 1982. *Mine Waste Reclamation*. Mining Journal Books. England, 1980.
- CAIRNEY, T.: «Reclaiming contaminated land». Blackie. Glasgow and London, 1987.
- CATEDRA DE PLANIFICACION Y PROYECTOS: «Tratamiento funcional y paisajístico de taludes artificiales». ETSI de Montes, UPM., Madrid, 1983.
- COPPIN, N. J. and BRADSHAW, A. D.: «Quarry reclamation». Mining Journal Books. England, 1982.
- GARCIA ANDRES, T.: «Recuperación: técnicas para la reinstauración de la vegetación». *El impacto ambiental y la restauración de terrenos en minería a cielo abierto*. Fundación Gómez Pardo. ETSIM; UPM, 1985.
- HACKETT, B.: «Landscape development of steep slopes». University of Newcastle Upon Tyne. Oriel Press, 1972.
- MORLING, R. J.: «Trees including preservation, planting, low, highways». Citado en: HACKETT, B., 1972. *Landscape development of steep slopes*. University of Newcastle Upon Tyne. Oriel Press, 1972.
- NAVARRO, G. M.: «Técnicas de forestación». Monografías 9. ICONA, Madrid, 1975.
- ORTIZ-CAÑAVATE, J.: «Las máquinas agrícolas y su aplicación». Ed. Mundi-Prensa, Madrid, 1984.
- ROBERTS, R. D. and BRADSHAW, A. D.: «The reclamation of slate waste tips by tree planting». *Landscape Desing*, 113:31-33. Citado en: COPPIN, N. J. and BRADSHAW, A. D., 1982. *Quarry reclamation*. Mining Journal Books. England, 1976.
- SHELDON, J. C. and BRADSHAW, A. D.: «The development of hydraulic seeding technique for unstable sand slope». *Journal of Applied Ecology* 14,3:905-18. Citado en: WILLIAMSON, N. A.; JOHNSON, M. S. and BRADSHAW, A. D., 1982. *Mine waste reclamation*. Mining Journal Books. England, 1977.
- TURELLE, J. W.: «Factor involved in the use of herbaceous plants for erosion control on road ways». MRB SR; 135:99-104. Citado en: CATEDRA DE PLANIFICACION Y PROYECTOS, 1983. *Tratamiento funcional y paisajístico de taludes artificiales*. ETSI de Montes, Madrid, 1973.
- VOGEL, G. W.: «A manual for training reclamation. Inspectors in the Fundamentals of Soils and Revegetation». Soil and Water Conservation Society, 1987.
- WILLIAMSON, N. A.; JOHNSON, M. S. and BRADSHAW, A. D.: «Mine waste reclamation». Mining Journal Books. England, 1982.

EVALUACION ECONOMICA DE LOS PROYECTOS DE RESTAURACION

1. INTRODUCCION

La evaluación económica de los trabajos de restauración de los terrenos afectados por las minas es un proceso complejo, ya que dentro de un planteamiento integral esta evaluación económica se debe entender como una parte más del análisis de costes y beneficios del proyecto minero, donde se incluirán tanto los costes y beneficios directos como los indirectos. En este capítulo sólo se harán referencias a los costes directos, por pensar que están relacionados estrictamente con el promotor minero que pregunta continuamente por la rentabilidad de la restauración de las minas.

Bajo este aspecto la restauración de terrenos comprende un conjunto de actividades que, en ocasiones, algunas de ellas, no son fácilmente cuantificables.

Los conceptos más importantes que deben tenerse en cuenta en la estimación total de los costes de restauración, secuencialmente en el tiempo, son los siguientes:

- Estudio de impacto ambiental y/o proyecto de restauración.
- Preparación de documentos para la obtención de permisos, licencias y aprobaciones.
- Reuniones con responsables de organismos oficiales competentes, antes, durante y después de la concesión de permisos.
- Costes de restauración, propiamente dichos, que incluyen la mano de obra, la maquinaria, y los materiales en las operaciones de remodelado de terrenos, extendido de horizontes superficiales, obras estructurales, siembras, etc.
- Programas de seguimiento y control ambiental a medio y largo plazo.

El hecho de que algunos de esos gastos se produzcan invariablemente antes de poner las explotaciones en marcha obligan a buscar fuentes de financiación para poderlas llevar a cabo, lo que puede suponer un coste adicional.

Por otro lado, el factor tiempo introduce una componente de incertidumbre apreciable, pues la legislación ambien-

tal evoluciona y, lo que es más importante, los planes de explotación previstos por las empresas pueden variar, ya que no están elaborados con unos criterios rígidos y estáticos a lo largo de la vida de los proyectos, un ejemplo de esto es la modificación que sufre la interpretación geológica del yacimiento al ampliar las campañas de investigación, el cambio de los criterios de explotabilidad al variar las condiciones económicas o de mercado, etc., todo ello puede también provocar un cambio en los objetivos y planteamientos de la restauración.

Otro aspecto que influye de manera significativa es la capacidad para realizar la restauración simultáneamente con la explotación. Si esto es posible se consigue un abaratamiento muy importante al eliminar la duplicidad de labores o actividades. Los argumentos que utilizan algunos responsables mineros de que la recuperación de terrenos sólo es posible al finalizar la explotación o que supone un gravamen económico inabordable para las empresas; constituyen en muchos casos maniobras dilatorias que conducen a medio o largo plazo a situaciones casi irreversibles, con una repercusión importante en la marcha y viabilidad de las explotaciones, así como en la restauración efectiva de las zonas alteradas.

Todo esto que se ha apuntado son aspectos a tener en cuenta y que, en ocasiones, se utilizan inadecuadamente para justificar esa supuesta inviabilidad económica de la restauración de áreas alteradas por labores mineras. Lo usual en países con una alta preocupación por el medio ambiente, que coincide con países desarrollados, es que los costes de restauración se contemplen como un gasto más de producción, al que debe hacer frente el valor del mineral extraído. Los porcentajes que representan esos costes en el contexto de cada uno de los sectores son pequeños, pues sólo basta expresarlos, tras el correcto diseño de la explotación y evaluación de las reservas, en PTA/t de mineral extraído.

En resumen, en este capítulo sólo se intenta dar una metodología de cálculo de los costes directos de restauración, y no cifras extrapolables a diferentes escenarios o situaciones cuyo uso podría ser arriesgado y poco adecuado.

2. OPERACIONES PRINCIPALES. UNIDADES DE OBRA

Todos aquellos trabajos susceptibles de cuantificación (medición y valoración) constituyen las denominadas «unidades de obra». Estas unidades de obra se clasifican por artículos o capítulos sobre unos impresos, similares al de la Tabla 18.I, en los que además se puede indicar las mediciones de cada una de ellas. Las cantidades de una misma unidad de obra dentro de cada artículo o capítulo se suman, y en caso de que haya trabajos en el proyecto que no vengan definidos, pero sí valorados en partidas alzadas, también se indicarán con vistas a la evaluación económica global.

Se debe prescindir de aquellas partidas que supongan un coste insignificante o que no permitan una valoración exacta y que su influencia sea pequeña, y contemplarlas al final como un porcentaje del resto de los conceptos evaluados. De esta forma los cálculos, sin carecer de rigor, se simplifican.

Si el proyecto lo requiriera, por su amplitud, las unidades de obra se codificarán, teniendo en cuenta la naturaleza de éstas. La codificación deberá hacerse, tras establecer los grupos y subgrupos de unidades, dándoles a estos un número o una letra o ambas cosas.

A título de ejemplo, algunas de las principales unidades de obra que puede comprender un proyecto de recuperación de terrenos alterados son las siguientes:

1. Movimiento de rocas, tierras y suelos.
 - 1.1. Retirada y acopio de horizontes superficiales.
 - 1.2. Remodelado de taludes.
 - 1.3. Explanaciones.
 - 1.4. Rellenos con materiales estériles de la propia explotación o de fuera de la zona.
2. Excavación de zanjas, canales, pistas, etc.
3. Construcción de obras estructurales: drenajes, bajantes, cunetas, balsas de decantación, etc.
4. Impermeabilizaciones y sellados.
5. Demolición de estructuras e instalaciones.
6. Operaciones de preparación del terreno, ripado, subsolado, etc.
7. Recubrimientos y protecciones.
 - 7.1. Traslado y extendido de suelos de la propia explotación.
 - 7.2. Traslado y extendido de suelos procedentes de préstamos.
 - 7.3. Recubrimientos con escollera, grava y materiales inertes.
8. Siembras.
9. Plantaciones.
10. Cerramientos.
11. Señalización.
12. Mantenimiento.

TABLA 18.I

Núm. orden	UNIDAD DE OBRA	Núm. de partes iguales	UNIDADES					
			DIMENSIONES			CUBICACIONES		
			Longitud	Latitud	Altura o espesor	Parciales	Totales	

3. PRECIOS UNITARIOS

Los precios unitarios descompuestos incluyen los relacionados directamente, en el año en que se presupuesta el proyecto, con cada una de las partidas que se necesitan para constituir el precio de las diferentes unidades de obra.

Para calcular correctamente los precios unitarios descompuestos es preciso establecer previamente los costes de la mano de obra, de la maquinaria, de los materiales, etc. A modo exclusivamente de ejemplo, y para el año 1989, se indican algunos de estos costes, en las Tablas 18.II a 18.IV. Los precios unitarios o por partidas se aconseja numerarlos, tal como aparecen en las tablas citadas.

TABLA 18.II. COSTE DE LA MANO DE OBRA

N.º DE ORDEN	ESPECIALIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO (*) PTA.
1 (1)	Encargado	Hora	1.600
2 (2)	Capataz	Hora	1.500
3 (3)	Oficial 1.º	Hora	1.300
4 (4)	Oficial 2.º	Hora	1.200
5 (5)	Peón especializa- do	Hora	1.150
6 (6)	Peón	Hora	1.100

(*) Estos precios se consideran globales, pues incluyen todas las cargas sociales propias de la mano de obra; la repercusión de las vacaciones, etc.

TABLA 18.III. COSTE DE LA MAQUINARIA

N.º DE ORDEN	TIPO	UNIDAD	PRECIO UNITARIO PTA.
1 (7)	Tractor de orugas 110 HP	Hora	4.300
2 (8)	Tractor de ruedas 115 HP	Hora	3.300
3 (9)	Tractor de ruedas 60 HP	Hora	2.700
4 (10)	Compresor neumático (4 martillos)	Hora	3.700
5 (11)	Pala cargadora 0,9 m ³ capac.	Hora	2.500
6 (12)	Pala cargadora 1,5 m ³ capac.	Hora	3.300
7 (13)	Retroexcavadora 0,9 m ³ capac. de 75 HP	Hora	3.600
8 (14)	Retroexcavadora de 100 HP	Hora	5.050
9 (15)	Motoniveladora 125 HP	Hora	4.800
10 (16)	Camión basculante 12 a 15 t	Hora	2.950
11 (17)	Camión cisterna de 4.000 l	Hora	2.350
12 (18)	Rulo compactador 8 a 10	Hora	4.350
13 (19)	Motobomba de 10-20 HP	Hora	2.500
14 (20)	Hidrosembradora	Hora	8.100
15 (21)	Remolque cisterna de 6.000 l	Hora	700
16 (22)	Unidad de servicio cuba-container	Hora	6.500

TABLA 18.IV. COSTE DE LOS MATERIALES Y ESPECIES VEGETALES

N.º DE ORDEN	TIPO	UNIDAD	PRECIO UNITARIO PTA.
1 (23)	Agua puesta en la zona	m ³	50
2 (24)	Turba rubia o negra	m ³	10.500
3 (25)	Fertilizante químico líquido concentrado (NPK 15-15-15)	l	480
4 (26)	Estiércol de origen animal	m ³	3.500
5 (27)	Tierra vegetal, libre de elementos gruesos y residuos vegetales (D = 10 km)	m ³	1.500
6 (28)	Suelos aceptables procedentes de préstamos	m ³	750
7 (29)	Abono mineral 18-24-18	Kg	75
8 (30)	Semillas de herbáceas, gramíneas y leguminosas	Kg	1.100
9 (31)	Mulch fibra corta	Kg	100
10 (32)	Estabilizador	Kg	1.350

TABLA 18.IV. (Continuación)

N.º DE ORDEN	TIPO	UNIDAD	PRECIO UNITARIO PTA.
11 (33)	Populus alba, 8-10 cm de circunferencia. a raíz desnuda, ramificado	Ud	1.300
12 (34)	Idem contenedor	Ud	1.700
13 (35)	Populus nigra 10-12 cm de circunferencia, a raíz desnuda, ramificado	Ud	1.300
14 (36)	Idem en contenedor	Ud	1.700
15 (37)	Salix alba, 8-10 cm de circunferencia a raíz desnuda, ramificado	Ud	1.300
	Idem en contenedor	Ud	1.700
	Alnus glutinosa, 10-12 cm de circunferencia, a raíz desnuda, ramificado	Ud	1.300
	Idem en contenedor	Ud	1.700
(41)	Corylus avellana, 6-8 cm de circunferencia, a raíz desnuda, ramificado	Ud	600
(42)	Idem en contenedor	Ud	900
(43)	Fraxinus excelsior, 10-12 cm de circunferencia, a raíz desnuda, ramificado	Ud	1.300
22 (44)	Idem en contenedor	Ud	1.700
23 (45)	Acer monspessulanum, 6-8 cm de circunferencia, a raíz desnuda, ramificado	Ud	1.300
24 (46)	Idem en contenedor	Ud	1.700
25 (47)	Prunus avium, 8-10 cm de circunferencia, a raíz desnuda, ramificado	Ud	1.300
26 (48)	Idem en contenedor	Ud	1.700
27 (49)	Juglans regia, 10-12 cm de circunferencia, a raíz desnuda, ramificado	Ud	1.300
28 (50)	Idem en contenedor	Ud	1.700

Por otro lado, también es frecuente dar el coste global de algunas operaciones principales o actuaciones de la forma en que se indica en la Tabla 18.V. En esos costes

ya se incluyen los precios de la mano de obra, de la maquinaria, de los materiales, etc. En estos casos, la numeración es independiente a la de los precios unitarios.

TABLA 18.V. COSTE DE ACTUACIONES

N.º DE ORDEN	OPERACION	UNIDAD	PRECIO UNITARIO PTA.
1	Desbrocé y limpieza de terreno a mano, incluso retirada, carga y transporte de productos	m ²	200
2	Despeje y desbroce de terreno, por medios mecánicos, con un espesor de 20 cm, carga y transporte de productos	m ²	65
3	Escarificado superficial del terreno natural por medios mecánicos	m ²	25
4	Excavación, en zanja por medios mecánicos, en cualquier terreno, incluso carga de productos sobrantes y transporte a vertedero	m ²	375
5	Excavación en desmonte y carga por medios mecánicos en cualquier terreno, y transporte de productos sobrantes a vertedero	m ²	310
6	Refino y nivelación por medios mecánicos de taludes	m ²	20
7	Refino y rastrillado a mano de taludes, para igualación de su superficie	m ²	125

TABLA 18.V. (Continuación)

N.º DE ORDEN	TIPO	UNIDAD	PRECIO UNITARIO PTA.
8	Perfilado y limpieza de cunetones, en tierras, incluso carga y transporte a vertederos de productos sobrantes	m ²	50
9	Levantado de losa de pizarra o similar sentado sobre base de hormigón y p.p. de material de agarre, con recuperación de la misma incluso retirada, carga o acopio y transporte dentro de la explotación	m ²	300
10	Demolición por medios mecánicos, de fábrica de mampostería, incluso retirada, carga y transporte de productos	m ³	3.150
11	Desmontaje de cerramiento de tela metálica a mano, incluso retirada y carga de productos con transporte fuera de la explotación	m ²	60
12	Desmontaje de barandilla en miradores existentes, retirada, carga y transporte y p.p. de demolición de cimentación si fuese necesario	m ²	850
13	Limpieza de cunetones de hormigón incluso carga y transporte a vertedero de productos sobrantes	ml	75
14	Suministro, relleno y extendido por medios mecánicos de suelos aceptables, procedentes de préstamos	m ²	1.300
15	Suministro y puesta en obra de hormigón tipo H-50 fabricado con cemento PA-350, tamaño máximo de árido 40 mm colocado en fondo de excavación para capa de limpieza y/o rellenos	m ³	5.920
16	Suministro y puesta en obra de hormigón tipo H-150 fabricado con cemento PA-350, tamaño máximo de árido 4 cm colocado en zanjas, zapatas y soleras incluso vibrado a cualquier profundidad	m ²	8.350
17	Suministro y puesta en obra de hormigón tipo H-250 fabricado con cemento PA-350, tamaño máximo de árido colocado, incluso vibrado a cualquier profundidad	m ³	9.900
18	Colocación de losa de pizarra existente, sentada sobre arena incluso recebado de juntas con tierras seleccionadas, en caminos y escalera	m ²	1.100
19	Excavación por medios mecánicos en caja, pavimentación, refinado y compactado con aporte de tierras adecuadas incluso carga y transporte de productos sobrantes, en caminos	m ³	600
20	Suo-base o explanada mejorada de arena de miga, puesta en la mina, incluso compactación	m ³	1.625
21	Suministro y colocación de geotextil en caminos y escaleras	m ²	175
22	Encachado de piedra caliza sentado sobre capa de mortero de cemento y arena de río y posterior recebado incluida, excavación, solera de hormigón y transporte de tierras sobrantes	m ²	1.150
23	Apertura manual de zanja para plantación de setos de 0,30 x 0,30 m con tierras a los bordes	ml	260
24	Rastrillado manual de terrenos para igualación de superficie (zonas llanas)	m ²	75
25	Laboreo de terreno para plantaciones hasta profundidad de 0,50 m con medios mecánicos	m ²	35
26	Apertura de hoyo para plantación de 0,20 x 0,20 x 0,20 m efectuado a mano con tierras a los bordes	Ud	20
27	Apertura de hoyo para plantación de 0,30 x 0,30 x 0,30 m efectuado a mano con tierras a los bordes	Ud	60
28	idem 0,40 x 0,40 x 0,40 m	Ud	140
29	idem 0,60 x 0,60 x 0,60 m	Ud	450
30	Casilla picada de 0,60 x 0,60 x 0,30 m	Ud	180

TABLA 18.V. (Continuación)

N.º DE ORDEN	TIPO	UNIDAD	PRECIO UNITARIO PTA.
31	Suministro de tierra vegetal, tierras de cabeza, libres de elementos gruesos, residuos vegetales, incorporadas al terreno	m ³	1.700
32	Suministro y plantación de arbustos en hoyos de 0,30 x 0,30 x 0,30 m servidos en envase incluido primer riego	m ²	400
33	Abonado de superficies hidrosebradas con abono foliar NPK (8,24,8) o similar (H ₀)	m ²	11
34	Mampostería ordinaria con piedra del lugar, tomada con mortero, a una cara vista	m ³	20.050
35	Suministro y colocación de malla galvanizada para cerramiento «Tipo Autopista» incluso pequeña excavación, hormigón, anclajes y tornillería	ml	2.750
36	Cerramiento a base de postes de hierro angular galvanizado de 40 x 40 x 4 mm 1,70 mm a 7 m de separación, empotrados y anclados en el terreno 30 cm y guarnecido con dos hiladas superiores de alambre de espino, doble hilo 13 x 15, y cinco inferiores de alambre liso galvanizado, tensado en postes de 60 x 60 x 6 mm de 2 m en tramos de 100 m y con 2 riostras cada 100 m	ml	400

Las tablas anteriores, no pueden considerarse de ningún modo completas, ni conviene utilizarlas como aquí se reflejan, pues se presentan a título de ejemplo y su finalidad es exclusivamente la de esclarecer la metodología a seguir.

En el caso de la mano de obra, materiales y costes de la maquinaria, el precio unitario resulta de la aplicación de una serie de tarifas contrastadas y admitidas. Estos precios varían con carácter local y se actualizan con regularidad. Algunos de ellos, los más usuales, son publicados por parte de organismos estatales y autonómicos.

En el caso de la mano de obra, por ejemplo, comprenden las percepciones del personal, los costes empresariales y los costes sociales soportados por cada empleado.

Los precios de los materiales se publican en revistas especializadas y para algunos de ellos, como las plantas y semillas, hay que acudir a los catálogos que los viveristas editan y que se accede a ellos directamente a través de su solicitud.

En el caso de las semillas el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, a través del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias o del Instituto Nacional de Conservación de la Naturaleza, dispone de un mecanismo para su venta y comercialización. La variedad de semillas que poseen es pequeña, tanto para pratenses como para leñosas.

Los rendimientos y calidades de semillas de especies pratenses están registradas en la Lista Nacional de Variedades (LNV) que es competencia de la Administración Central. A partir del 1 de enero de 1989 se pueden vender en España variedades de todas las especies pratenses, sin tener que estar recogidas en la LNV, sólo es necesario que estén incluidas en el Catálogo Común Europeo de variedades de Plantas Agrícolas. Esto supone un problema que se pretende corregir a través de la Lista de

Variedades Recomendadas (LVR), competencia de las Comunidades Autónomas. En este momento para Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco y Navarra se puede consultar la información elaborada por el Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegordo, perteneciente a la Consellería de Agricultura de la Xunta de Galicia que publica «Notas sobre la Evaluación de Variedades de Especies Pratenses para las Zonas Húmedas». Para el resto de España se recomienda establecer contactos con la Asociación de Productos de Semillas (APROSE).

Las autonomías han ampliado el elenco de especies de carácter natural que se pueden emplear a través de la producción de plantas en sus viveros y de la demanda por parte de los contratistas de proyectos, sobre todo en el tema de construcción de carreteras, que ha influido a que viveros particulares también tengan plantones de especies de interés para la restauración de áreas degradadas por actividades mineras.

3.1. Maquinaria

Si se deseara, por ejemplo, efectuar una estimación detallada del coste horario de la maquinaria sería preciso tener en cuenta los siguientes conceptos:

1. Costes directos de funcionamiento:
 - a. Consumos:
 - Combustible.
 - Lubricantes.
 - b. Reparaciones.
 - c. Neumáticos.
 - d. Elementos de desgaste.
 - e. Operador.

2. Coste indirecto o de propiedad:
 - a. Amortización.
 - b. Intereses del capital.
 - c. Seguros.
 - d. Impuestos.

El procedimiento de cálculo de cada uno de los apartados anteriores para algunos de los equipos principales empleados en los trabajos de restauración es el siguiente:

3.1.1. COSTES DIRECTOS DE FUNCIONAMIENTO

a. Consumos

a.1. Combustible

En general, el consumo horario de combustible de los equipos diésel suele estar indicado entre las especificaciones del fabricante. No obstante, es posible estimarlos a partir de la Tabla 18.VI en la que se refleja el consumo específico para cada tipo de máquina, según las condiciones de trabajo.

El coste horario se obtiene multiplicando la potencia del motor diésel en HP por el consumo específico, correspondiente a las condiciones de trabajo, y por el precio del litro del gas-oil.

a.2. Lubricantes

En este apartado se incluyen los aceites del motor, de la transmisión, de los mandos finales, del sistema hidráulico en general, las grasas consistentes para los elementos en contacto metal-metal que no llevan aceite y los filtros.

Aunque para realizar un estudio detallado de los costes de lubricación de una máquina el procedimiento consiste en realizar un cálculo económico a partir de la guía de lubricación y mantenimiento, el método más usual consiste en deducirlo como un porcentaje del coste de combustible. En la Tabla 18.VII se indican los porcentajes comúnmente empleados.

TABLA 18.VII

EQUIPO	COSTE DE LUBRICANTES, GRASAS Y FILTROS EN FUNCION DEL COSTE DEL COMBUSTIBLE
Excavadoras hidráulicas	20 %
Tractores de cadenas	20 %
Palas de ruedas	20 %
Mototraillas autocargables	15 %
Mototraillas empujadas	11 %
Volquetes	13 %

b. Reparaciones

En este término se incluyen los gastos relativos al arreglo de averías de las máquinas, incluyendo materiales y mano de obra. La ecuación básica de cálculo es:

$$\frac{\text{Precio de adquisición} - \text{Precio de neumáticos}}{\text{Horas de vida}} \cdot F$$

El valor de «F» se toma de la Tabla 18.VIII.

c. Neumáticos

Para la determinación del coste de los neumáticos se utilizan las vidas medias, en horas de trabajo, que se indican en la Tabla 18.IX para cada tipo de máquina.

d. Elementos de desgaste

La duración de los elementos de desgaste depende de diversos factores: la abrasividad de las rocas y suelos, los impactos a que se someten y las condiciones de trabajo. Esta última condición a su vez está influenciada por las características de los materiales de construcción, la supervisión de la operación, el mantenimiento de los equipos, etc.

TABLA 18.VI

EQUIPO	CONSUMO ESPECIFICO (l/h-HP)		
	CONDICIONES DE TRABAJO		
	FAVORABLES	MEDIAS	DESFAVORABLES
Tractores	0,13	0,15	0,17
Mototraillas autocargables	0,10	0,12	0,14
Mototraillas empujadas	0,09	0,11	0,13
Palas de ruedas	0,08	0,10	0,12
Volquetes convencionales	0,05	0,08	0,10

TABLA 18.VIII

EQUIPO	CONDICIONES DE TRABAJO		
	FAVORABLES	MEDIAS	DESFAVORABLES
Tractores	0,8	1,3	1,8
Mototraillas	0,7	0,8	1,05
Palas de ruedas	0,6	0,8	1,0
Volquetes convencionales	0,75	0,9	1,2

TABLA 18.IX

EQUIPO	CONDICIONES DE TRABAJO		
	FAVORABLES	MEDIAS	DESFAVORABLES
Mototraillas	4.000	3.000	2.500
Palas de ruedas	4.000	3.000-3.500	1.000-2.500
Volquetes convencionales	4.000	3.000-3.500	2.000-2.500

Cifras en horas.

La valoración de los elementos de desgaste constituye una tarea difícil por la gran cantidad de variables que influyen en la duración de los mismos.

A continuación, a modo de ejemplo, se indican las vidas operativas, en horas, más usuales de algunos de los útiles empleados en los tractores y mototraillas.

TABLA 18.X. TRACTORES DE ORUGAS

ELEMENTO DE DESGASTE	TIPO DE ROCA		
	BLANDA	MEDIA	DURA
Puntas	150	30	15
Protectores	1.500	450	150
Rejón	10.000	3.500	1.000
Cuchillas	300	200	100

Cifras en horas.

TABLA 18.XI. MOTOTRAILLAS

ELEMENTO DE DESGASTE	TIPO DE ROCA		
	BLANDA	MEDIA	DURA
Cuchillas	750	500	200

Cifras en horas.

e. Operador

El coste del operador debe incluir el salario, la seguridad social a cargo de la empresa y las vacaciones, así como las dietas en algún caso particular. Especial cuidado debe ponerse al calcular el coste horario, pues si el operador está en plantilla de la empresa, se deberá partir del coste anual, que es el gasto en el que se incurre, independientemente del número de horas que trabaje la máquina.

3.1.2. COSTE INDIRECTO O DE PROPIEDAD

a. Amortización

Está determinada por la pérdida del valor producida por el paso del tiempo y por el deterioro, y merma del valor subsiguiente, generada por el uso.

La suma a amortizar se calcula habitualmente restando al precio de adquisición el valor residual y el valor de los neumáticos, si es que la máquina los utiliza. Existen numerosos métodos de cálculo de la amortización, pero en lo relativo a maquinaria se suele aplicar el método lineal que consiste en dividir la suma a amortizar por el período de amortización expresado en horas.

b. Cargas indirectas

Incluyen el resto de las partidas correspondientes. Los intereses del capital que son las cantidades anuales que se deben cargar al coste de la máquina en concepto de las cantidades que se hubiesen obtenido a partir del ca-

pital invertido en la misma, si en lugar de adquirir ésta se hubiese utilizado el dinero para otro tipo de negocio. Los tres conceptos mencionados como cargas indirectas dependen directamente del precio de la máquina, y pueden evaluarse como un porcentaje del valor de la misma. El procedimiento de cálculo más empleado es el de la Inversión Media Anual que se obtiene de la ecuación.

$$\text{INVERSION MEDIA ANUAL} = \frac{\text{Precio de adquisición} (1 + N)}{2N}$$

siendo «N» el número de años en los que se amortiza el equipo. De acuerdo con esto, las cargas indirectas horarias serán iguales a:

$$\text{CARGAS INDIRECTAS HORARIAS} = \frac{\text{Inv. Media Anual} \cdot \text{Carga Ind. (\%)}}{\text{Horas de trabajo al año}}$$

En la Tabla 18.XII se recoge un modelo de hoja de cálculo del coste horario de un equipo.

Por último, para calcular el coste de una determinada unidad de obra en la que sean necesarios diferentes equipos, es preciso estimar el rendimiento previsto para cada uno de ellos, en función de las condiciones en las que van a trabajar. No se pueden dar unos valores estándar, pues son muchos los factores a tener en cuenta, según el tipo de obra que se desea llevar a cabo. Se aconseja, pues, un análisis particular para cada caso específico.

TABLA 18.XII

MAQUINA:		MODELO:	
Condiciones de trabajo:			
Horas de vida estimada (h):			
Horas de trabajo al año (h):			
Período de amortización en años (N):			
Valor residual (%):			
Cargas indirectas.			
• Interés del capital (%):			
• Seguros e impuestos (%):		TOTAL:	
Costes de Propiedad			
1. AMORTIZACION			
• Precio de adquisición		PTA.	
• Valor residual		PTA.	
• Valor de neumáticos		PTA.	
SUMA A AMORTIZAR		PTA.	
AMORTIZ. HORARIA = $\frac{\text{Suma a amortizar}}{\text{Horas vida estimada}}$ =		PTA/h	
2. CARGAS INDIRECTAS			
• Inversión media = $\frac{\text{Precio adquisición} (N + 1)}{2N}$ =		PTA.	
Cargas ind. horarias = $\frac{\text{Inv. media} \cdot \text{Cargas ind. (\%)}}{\text{Horas de trabajo al año}}$ =		PTA/h	
Costes de Operación			
3. COMBUSTIBLE	l/h	PTA/l =	PTA/h
4. ACEITES, GRASAS Y FILTROS (3)	(%)	=	PTA/h
5. REPARACIONES (1) · (Factor reparaciones)		=	PTA/h
6. NEUMATICOS $\frac{\text{Precio de los neumáticos}}{\text{Horas de vida útil}}$ =		=	PTA/h
7. ELEMENTOS DE DESGASTE		=	PTA/h
8. OPERADOR		=	PTA/h
Coste horario total		=	PTA/h

4. PRESUPUESTOS PARCIALES Y GENERALES

Para elaborar los presupuestos de los trabajos de restauración se parte de los cuadros de precios en los que figuran los costes correspondientes a todos los conceptos (maquinaria, mano de obra y materiales) de las unidades de obra, siguiendo el esquema representado en la Fig. 18.1, plasmados en un impreso similar al de la Tabla 18.XIII.

Las unidades de obra van a tener unos volúmenes de trabajo, resultado de las mediciones y unas características del mismo en las que, por un lado, cada tipo de maquinaria tendrá unos rendimientos y, por tanto, exigirá unas determinadas horas de trabajo; en relación con éstas y los costes unitarios de esas máquinas y de la mano de obra se obtendrán las correspondientes partidas del presupuesto. Por otro lado, se estimará el coste de los materiales propios de las labores de restauración (semillas, plantas, fertilizantes, tierra vegetal, obras de acondicionamiento, etc.), como resultado de multiplicar los consumos previstos en cada unidad de obra por el precio unitario correspondiente.

No hay que olvidar que pueden aparecer partidas alza-

das, que se tendrán que sumar a las cifras obtenidas anteriormente.

La ejecución de la restauración de manera progresiva y simultánea con la explotación, según ésta vaya alcanzando situaciones de posición final de diseño en hueco o vertederos, tiene ventajas operativas y económicas, que ya se mencionaron.

Por ejemplo, el tendido de un talud final del hueco de una cantera requiere una labor de arranque, tanto mecánica como mediante explosivos que da lugar a material vendible. Luego es una labor productiva y desde el punto de vista de la unidad de obra, «modelado», del presupuesto de la restauración se puede proceder de dos maneras: o darla coste cero, o asignarla el sobrecoste que tiene la perforación, en caso de arranque con explosivo, o el sobrecoste por horas adicionales del tractor en un taluzado más cuidadoso, en caso de arranque mecánico. Lo correcto es éste último tratamiento.

Situación parecida se presenta en el modelado de los taludes finales de un vertedero, cuando la operación se realiza en las últimas fases de vertido con las máquinas en esa zona.

La suma de los costes obtenidos por cada unidad de obra dará lugar al presupuesto total de la restauración.

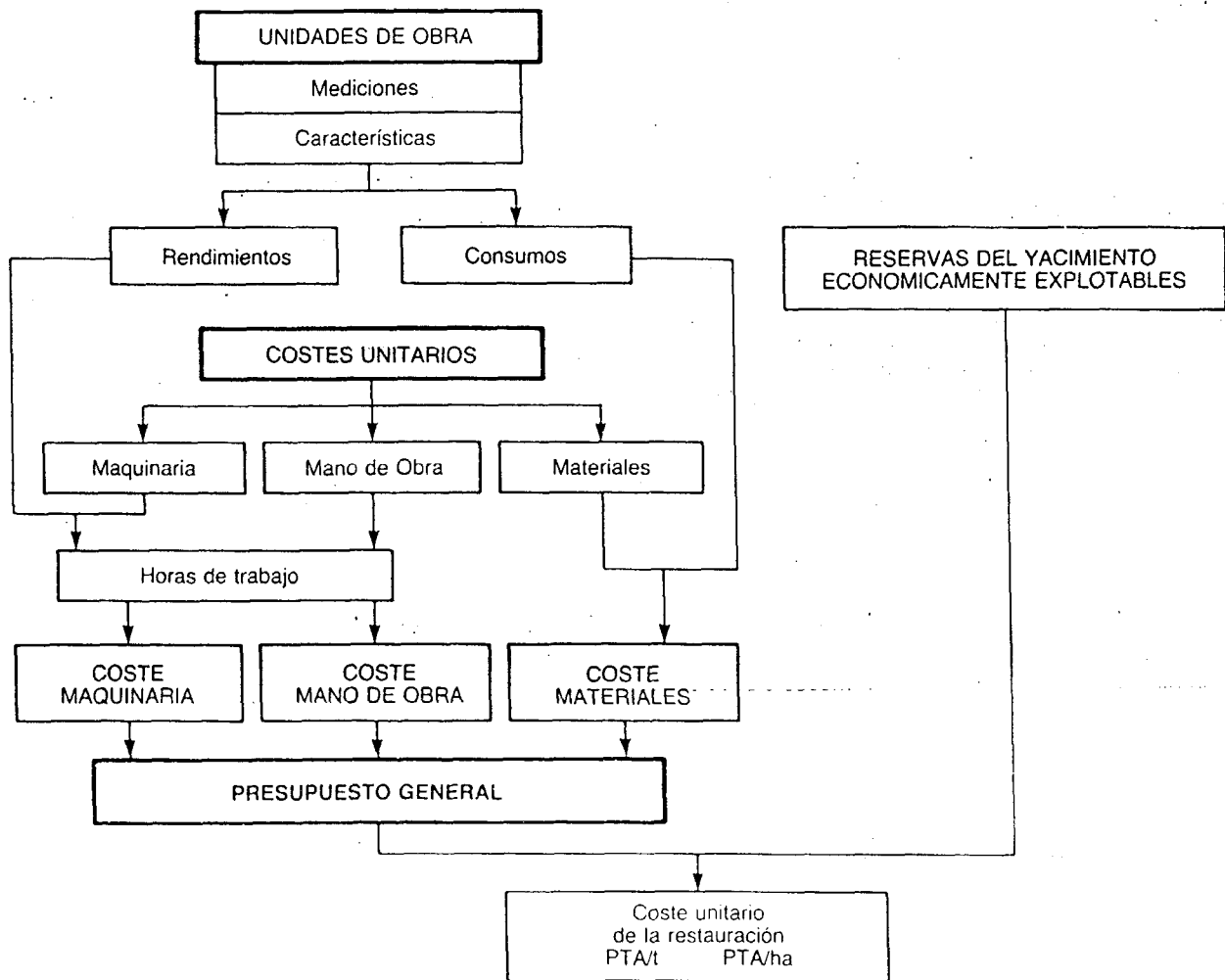


Figura 18.1. Metodología para la elaboración de los presupuestos.

TABLA 18.XIII

N.º ORDEN	NUMERO DE UNIDADES	DESIGNACION DE LA CLASE DE OBRA	PRECIO DE LA UNIDAD	IMPORTE
				PESETAS

5. INDICES DE REPERCUSION ECONOMICA DE LA RESTAURACION EN LOS COSTES DE EXPLOTACION

Una vez elaborado el presupuesto global de la restauración de todos los terrenos afectados por una explotación, es interesante analizar la repercusión que pueden tener sobre la economía de la operación. Esto se puede llevar a cabo mediante la utilización de diferentes índices. Los que se recomiendan para efectuar comparaciones o estimaciones económicas rápidas son los que se refieren a la unidad de superficie recuperada o a la tonelada de mineral extraída.

Con respecto al primer índice, los costes pueden enmarcarse dentro de unos rangos como son los recogidos en las Tablas 18.XIV a 18.XVI contrastados por experiencias nacionales y del extranjero.

El segundo índice, que se refiere al coste de restauración para la tonelada de mineral extraída, tiene mayor variación que el anterior, pues depende de las dimensiones del yacimiento, fundamentalmente de la potencia de la masa de mineral y espesor del recubrimiento.

A modo de ejemplo, considérese el caso de una cantera que se explota para áridos, en la que la superficie total afectada es de 30 ha con una profundidad media de explotación de 16 m. Si el coste de restauración estimado es de 800.000 PTA/ha, resulta que el presupuesto total asciende a 24 millones de pesetas.

Como el volumen de reservas medio recuperable por unidad de superficie para una densidad de 2,5 t/m³ es de 40 t/m², significa que la repercusión de la restauración es de 2 PTA/t, que si se refiere al precio de venta, previsto en unas 500 PTA/t, se traduce en un 0,3 % de este último, cantidad a todas luces insignificante.

Por último, se considera una mina de carbón con capas inclinadas en la que se extraen 4 t/m² de superficie afectada, valor medio que resulta del hueco total de la corta en la que se realiza autorrelleno, y se supone que el precio de venta del mineral es de 10.000 PTA/t y que el coste de la restauración de los terrenos para destinar estos a un uso agrícola es de 1,4 millones de pesetas por hectárea. La repercusión de tales trabajos resulta ser 35 PTA/t de carbón, pero sobre los costes totales de operación, supuesto un ratio medio de 10 m³b/t, asciende sólo al 0,99 % y referido al precio de venta del mineral al 0,35 %.

TABLA 18.XIV. COSTES DE LAS UNIDADES DE OBRA MAS FRECUENTES EN LOS TRABAJOS DE RESTAURACION (INDEPENDIENTEMENTE DEL CLIMA O GEOGRAFIA)

TRABAJO	COSTE (PTA/ha)	OBSERVACIONES
Instalación de la vegetación en taludes, en excavaciones, en presas de residuos o escombreras, usando hidrosiembra con mulch de fibra.	500.000-1.000.000	Estimados utilizando 50 kg/ha, de semillas y 3 kg/ha de fertilizante, más sembradora, 2 operadores y un vehículo auxiliar.
Transplante manual de árboles o arbustos sobre pendientes moderadas.	1.000.000-1.500.000	Supuesto de 1.200 árboles por hectárea plantados manualmente y 1.000 PTA. por árbol o arbusto.
Restauración de graveras y areneros, incluida la nivelación, el modelado, el extendido de suelos y la siembra.	500.000-1.000.000	Supuesto una gravera típica sin profundidad excesiva.
Mantenimiento anual (adición de fertilizantes en terrenos previamente recuperados).	30.000-60.000	Coste de aplicación de fertilizantes y riego.
Restauración de canteras, nivelación del material de relleno.	60.000-100.000	—

TABLA 18.XV. COSTES DE UNIDADES DE OBRA EN TRABAJOS DE RESTAURACION EN TERRENOS MONTAÑOSOS

TRABAJO	COSTE (PTA/ha)	OBSERVACIONES
Modelado y siembra sin incluir movimientos de tierra vegetal.	500.000-1.000.000	Modelado para minimizar la erosión, garantizar el drenaje, preparación del terreno, y siembra.
Mantenimiento (adicional al coste de remodelado).	15.000-20.000	Coste de aplicación de fertilizantes y riegos para un año.
Recogida, acopio, transporte, descarga y extendido de tierra vegetal (adicional al coste de remodelado). Si fuera necesario el movimiento de tierra vegetal para descubrir el mineral, sólo se considerará un coste de unas 150.000 PTA/ha por este concepto atribuido a la restauración.	400.000-700.000	Estimado un coste de 300 PTA/m ³ de manipulación de la tierra vegetal para cubrir los terrenos alterados con una profundidad de 30 cm. Si los suelos deben ser apilados para su posterior utilización se debe considerar un coste doble.

TABLA 18.XVI. COSTES DE LAS UNIDADES DE OBRA MAS FRECUENTES EN LA RESTAURACION DE TERRENOS MINEROS UBICADOS EN CLIMA ARIDO O SEMIARIDO

TRABAJO	COSTE (PTA/ha)	OBSERVACIONES
Extendido de suelos de préstamo (incluidos el suministro, transporte descarga y extendido).	200.000-500.000	Necesario para efectuar la recuperación en terrenos muy alterados. Generalmente sirve para acelerar el ritmo de obtención de una cubierta vegetal permanente.
Siembra y riego en presa de residuos, escombreras y taludes de pistas.	1.000.000-1.500.000	Coste del sistema de riego por aspersores o con goteo estimado en 1.000.000 de PTA/ha. Caudal de agua estimado entre 12.000 y 18.000 m ³ /ha a un coste de 8.000 a 9.000 PTA por 1.000 m ³ .
Siembra a voleo con semillas y fertilizantes sobre terrenos sin recubrir por suelos o mulch	80.000-100.000	Pendientes de talud mínimas, siembra manual a voleo.
Hidrosiembra con 680 kg de mulch por hectárea más semillas y fertilizantes.	900.000-1.500.000	Mezclas de hidromulch capaces de retener las semillas y los fertilizantes en terrenos escarpados y con pendientes suaves.
Extendido mecánico de paja o heno sobre la superficie en cantidades de 3.400 kg/ha.	250.000-400.000	No utilizado en terrenos con fuerte pendiente. Incremento de costes significativos si no existen accesos.

BIBLIOGRAFIA

- BENNETT, R. J., and CHORLEY, R. J.: «Environmental Systems: Philosophy, Analysis and Control». Methven & Co. Ltd. London. 1978.
- BERGILLOS, J. M., y NIETO, M. G.: «Evaluación Empresarial de Proyectos Agrarios». E.T.S. Ingenieros Agrónomos de Córdoba. Córdoba.
- BUREAU OF MINES: «Bureau of Mines Cost Estimating System Handbook». United States Department of the Interior. 1987.
- CATERPILLAR. INC.: «Caterpillar Performance Handbook». Ed. 17. Peoria. 1986.
- GARCIA OVEJERO, R.: «Técnicas y Máquinas de Movimientos de Tierras-Costes». Rocas y Minerales. N.º 119 y 122. 1981.
- GREGERSEN, H. M., y CONTRERAS, A. H.: «Análisis Económico de Proyectos Forestales». FAO, Roma. 1980.
- THUESEN, H. G.; FABRYCKY, W. J., y THUESEN, G. J.: «Economía del Proyecto de Ingeniería». Editorial Prentice-Hall Internacional. Buenos Aires. 1974.
- TUTT, P., y ADLER, D.: «Proyectos». BLUME, Madrid. 1985.

SEGUIMIENTO Y CONTROL

1. INTRODUCCION

Las evaluaciones de Impacto Ambiental tienen entre sus objetivos como ya se ha indicado, analizar la explotación minera en relación con el medio donde se va a desarrollar, y una de las partes que tienen estos proyectos consiste en la restauración del área afectada con la que se pretende evitar en lo posible un dictamen negativo de impactos.

El análisis de los impactos producidos por la explotación es independiente de la restauración ambiental de la mina y áreas adyacentes, pero se presenta como una medida más, la última que tiene el proyectista para subsanar los daños ocasionados en el Medio Ambiente, si es que efectivamente existen.

Ambos tienen en común la existencia de un plan de seguimiento y control. En el caso del proyecto de restauración recibirá ese nombre solo cuando esté asociado a un proyecto de explotación minera sujeto a Evaluación de Impactos Ambientales. Sino, pasará a ser el cuidado de la obra, como parte del plazo de garantía, el que mediante el mantenimiento y control de policía asuma las veces del seguimiento y control.

En los estudios de impacto este seguimiento y control se puede entender de una forma más clara como un análisis de las diferentes fases del proyecto. Por el contrario, en un proyecto de restauración no se contempla este análisis y todo gira alrededor de la exigencia al explotador a cumplir el Pliego de Condiciones Técnicas, elaborado junto con el de Mantenimiento de las obras realizadas.

2. EVALUACION DE IMPACTO AMBIENTAL

En la fase de seguimiento y control, se debe contemplar, de una parte, que las características del proyecto de explotación minera recogidas en las distintas etapas: investigación, instalación, explotación y abandono sean esas y no otras. Segundo, que los impactos que se puedan generar sean los previstos y no otros, con el fin de evitar riesgos e incertidumbres. Tercero, prever que se puede modificar la explotación minera, o tomar nuevas medidas correctoras, cuando los efectos imprevistos sean nefastos para el medio ambiente. Y cuarto, verificar las previsiones a fin de comunicar la experiencia e incorporarla en actividades futuras de otras explotaciones mineras.

En definitiva, se puede decir que estos puntos están relacionados de una parte con la gestión ambiental propiamente dicha: puntos primero, segundo y tercero. Y de otra, el punto cuarto, con el desarrollo del proyecto.

Si se considera que es fundamental que se cumplan los aspectos de procedimiento y administrativos, tanto del proyecto de explotación minera como de los procesos de Evaluación de Impacto Ambiental, surge inmediatamente un quinto punto que es la Eficacia de la Gestión.

2.1. Exposición de un ejemplo

Uno de los objetivos del plan de seguimiento y control es conocer el rendimiento de los materiales vegetales y las técnicas empleadas en la restauración de una zona como medida correctora para la evaluación de impactos. Se considera que la reposición vegetal ha sido un éxito si se consigue el establecimiento de una vegetación duradera, con un alto grado de superficie cubierta, que permite progresivamente la introducción espontánea de la vegetación autóctona (en el caso de un uso directamente ligado a la restauración del ecosistema o para evitar la erosión).

De la evaluación y el análisis de los datos proporcionados por el plan se elaborarán unos criterios generales de tratamiento del sustrato, mezcla de semillas, técnicas de plantación y siembra y cuidados culturales que ayuden a optimizar los resultados de posteriores proyectos de recuperación, de modo que disminuya el riesgo de fracaso de la restauración y el coste de la ejecución.

El plan consistirá en un programa de inspecciones visuales periódicas y recogida de material de la zona restaurada, en la que se anotarán sistemáticamente todos aquellos aspectos de la vegetación y el suelo que permitan conocer la evolución en el tiempo de las siembras y plantaciones realizadas y detectar cualquier problema de desarrollo que presenten, así como otros aspectos relacionados con el proyecto de restauración ejecutado y la evolución de éste.

Algunos de los parámetros interesantes para conocer la evolución de la vegetación y el suelo, son:

- Tiempo que tardan en aparecer las primeras plántulas.
- Época de foliación de las especies leñosas de hoja caduca.
- Tasa de germinación de la siembra.

- Grado de cubierta total.
- Composición específica.
- Índice de presencia de especies sembradas.
- Grado de cubierta por especie (si es posible).
- Presencia de enfermedades: virosis, hongos, etc.
- Pattern de distribución de las especies.
- Presencia de especies leñosas no sembradas.
- Análisis químico del suelo para verificar si las aportaciones orgánicas o químicas efectuadas en el sustrato han sido efectivas, y en que grado.

Además de estos parámetros se inventarían otros que faciliten la detección de cualquier problema de desarrollo de las plantas.

Algunos aspectos útiles son los siguientes:

- Existencia de «calvas» en la zona revegetada.
- Decaimiento progresivo de la vegetación.
- Crecimiento lento.
- Malformaciones.
- Carácter de las especies presentes.

Si tras estos chequeos periódicos aparece algún síntoma evidente, será preciso entonces realizar un estudio más detallado que la simple inspección visual, que concrete el problema y determine sus causas, y poner en práctica las medidas oportunas que lo palien.

La duración del plan de seguimiento depende de las características del área restaurada: ubicación, uso destinado, inversión de ejecución del proyecto, etc., pero como mínimo se aconseja que en el primer año, tras su ejecución sea visitado frecuentemente.

La frecuencia de inspección de las parcelas puede fijarse de la siguiente forma:

- En caso de parcelas de experimentación.
 - Observaciones quincenales durante los 3 primeros meses posteriores a la siembra.
 - Observaciones al comienzo y al final de cada estación (primavera, verano, otoño e invierno).
 - Dos observaciones más repartidas a lo largo del año.
- En caso de proyectos donde se establezca un nuevo uso:
 - Tres veces al año coincidiendo con los finales y principios de las estaciones climáticas anuales más influyentes para las plantas.

3. PROYECTOS DE RESTAURACION

En estos proyectos todo se basa en la exigencia de un cumplimiento (Pliego de Condiciones Técnicas) que por una parte contempla los aspectos relacionados con las características de la explotación que están ligadas directamente con la posibilidad o no de instaurar la vegetación, como es el caso de pendientes más o menos fuertes en

las escombreras y huecos excavados, o el diseño final de la explotación relacionado con el uso futuro previsto para ella, etc.

Por otra parte, el seguimiento de los aspectos del tipo de seguridad e higiene en el trabajo, tales como forma y diseño de las presas de residuos para que no se rompan, ubicación de balsas de decantación, eliminación de ruidos y polvo, etc. y, por último; a través de la selección de especies, la adecuación, en lo posible, del medio a las exigencias de las especies, la utilización de materiales apropiados en lo relativo a cantidad y calidad, etc.

Cuando se manejan materiales vivos como es el caso de las plantas, el seguimiento y control se centra entre otros aspectos, en diferentes momentos: la recepción de los materiales, el almacenaje de estos, su colocación y distribución y, en la respuesta de estos al medio. Para asegurarse de que se cumplen los objetivos del plan de restauración, se incorporan medidas de mantenimiento durante un tiempo que se planifica, durante este plazo no sólo se deben cuidar y reponer los materiales que estén en mal estado, sino recoger toda la información posible apuntada en el apartado anterior.

La manera de realizar un seguimiento y control óptimo queda determinada en gran medida por el contenido que recoja el Pliego de Condiciones Técnicas. En ocasiones, la supervisión regular y pormenorizada del Director del Proyecto facilita la ejecución del Plan de Seguimiento y control.

3.1. Exposición de un ejemplo

A continuación, se especifican a modo de ejemplo las exigencias relativas a los materiales, en el supuesto de que la restauración la efectuará una empresa contratista.

A. Condiciones de carácter general

1. Examen y aceptación

Los materiales que se propongan para su empleo en un Proyecto de restauración minera deberán:

- Ajustarse a las especificaciones del Pliego y a la descripción hecha en la Memoria o en los Planos.
- Ser examinados y aceptados por la Dirección de Obra.

La aceptación de principio no presupone la definitiva, que queda supeditada a la ausencia de defectos de calidad o de uniformidad, considerados en el conjunto del proyecto.

Este criterio tiene especial vigencia y relieve en el suministro de plantas, caso en que el Contratista viene obligado a:

- Reponer todas las marras producidas por causas que le sean imputables.
- Sustituir todas las plantas que, a la terminación del plazo de garantía, no reúnan las condiciones exigidas en el momento de suministro o plantación.

La aceptación o el rechazo de los materiales compete a la Dirección de Obra, que establecerá sus criterios de acuerdo con las normas y los fines del Proyecto.

Los materiales rechazados serán retirados rápidamente de la obra, salvo autorización expresa de la Dirección de Obra.

Todos los materiales que no se citan en el presente Pliego deberán ser sometidos a la aprobación de la Dirección de Obra, quién podrá someterlos a las pruebas que juzgue necesarias, quedando facultada para desechar aquellos que, a su juicio, no reúnan las condiciones deseadas.

2. Almacenamiento

Los materiales se almacenarán, cuando sea preciso, de forma que quede asegurada su idoneidad para el empleo y sea posible una inspección en cualquier momento.

El almacenamiento en obra no supone la entrega de los materiales en el entender que estos sólo se consideran como integrantes de la obra tras la ejecución de la partida donde deban incluirse.

3. Inspección y ensayos

El contratista deberá permitir a la Dirección de Obra y a sus delegados el acceso a los viveros, talleres, almacenes, fábricas, etc., donde se encuentren los materiales y, la realización de todas las pruebas que la Dirección de Obra considere necesarias.

Los ensayos y pruebas de control, tanto de materiales como de unidades de obra, serán realizados por Laboratorios especializados en la materia, que en cada caso serán designados por la Dirección de Obra.

Los ensayos o reconocimientos verificados durante la ejecución de los trabajos no tienen otro carácter que el de simples antecedentes para la recepción, por consiguiente, la admisión de materiales o piezas en cualquier forma que se realicen antes de la recepción, no atenúa las obligaciones de subsanar o reponer que el Contratista contrae, si las obras o instalaciones resultasen inaceptables parcial o temporalmente, en el acto de reconocimiento final y pruebas de recepción.

4. Sustituciones

Si por circunstancias imprevisibles hubiera de substituirse algún material, se recabará, por escrito, autorización de la Dirección de Obra, especificando las causas que hacen necesaria la sustitución; la Dirección de obra contestará, también por escrito y determinará, en caso de sustitución justificada, qué nuevos materiales han de reemplazar a los no disponibles, cumpliendo análoga función y manteniendo indemne la esencia del Proyecto.

En caso de ser especies vegetales, la sustitución se realizará con especies del mismo tipo que las que sustituyen.

5. Materiales para fuera de especificación

Los materiales no especificados en las disposiciones, normativa o condiciones específicas de cada tipo, deberán cumplir las condiciones que la práctica de la buena construcción ha determinado por su empleo reiterado.

B. Modificaciones de suelos

1. Aspectos generales

Las actuaciones necesarias para la realización de la explotación minera dejarán los suelos que se pretende recuperar en un estado inadecuado para el desarrollo de la vegetación que se intenta instalar.

En ningún caso se realizará una modificación radical del medio, salvo en las plantaciones, que requerirán las consiguientes excavaciones (hoyos, zanjas...). Se realizarán únicamente refinados o labores superficiales.

Los inconvenientes de la inadecuación del terreno serán subsanados mediante el empleo de materiales que actúen como protectores (mulches), estabilizadores o acondicionadores *v/o* fertilizantes, haciendo uso de las técnicas de hidrosiembra. También a veces se procederá al aporte de tierra vegetal.

Los materiales y técnicas aludidas proporcionarán un medio menos hostil, en el que la vegetación puede pervivir ya con mejores perspectivas.

2. Abonos orgánicos

Se definen como abonos orgánicos las sustancias orgánicas de cuya descomposición, causada por los microorganismos del suelo, resulta un aporte de humus y una mejora en la textura y estructura del suelo.

La utilización de abonos distintos y los aquí reseñados sólo podrá hacerse previa autorización de la Dirección de Obra.

Pueden adoptarse las siguientes formas:

— Estiércol.

Se considera estiércol la mezcla de las deyecciones sólidas y líquidas del ganado, con la paja que sirve de cama al mismo, en período de estabulación. Esta mezcla tendrá las siguientes características:

- Estará desprovista de cualquier otra materia, como serrín, cortezas, orujo, etc.;
- Habrá sido sometida a una completa fermentación anaerobia, y la riqueza mínima de elementos fertilizantes, expresada en tantos por mil, será: cinco para el nitrógeno, tres para el ácido fosfórico y cinco para la potasa;
- La proporción de materia seca estará comprendida entre el 23 y 33 %;
- Su coeficiente isohúmico estará comprendido entre 0,4 y 0,5;
- La densidad mínima será de 0,75;
- El aspecto exterior será el de una masa untuosa, negra y ligeramente húmeda.

— Compost.

Procedente de la fermentación de restos vegetales durante un tiempo no inferior a un año o del tratamiento industrial de las basuras de población. Su contenido en materia orgánica será superior al cuarenta por ciento (40 %) y en materia orgánica oxidable al quince por ciento (15 %).

3. Abonos minerales

Se definen como abonos minerales los productos que proporcionan al suelo uno o más elementos fertilizantes. Deberán ajustarse en todo a la legislación vigente (Ordenes Ministeriales de 20 de junio de 1950 y 19 de julio de 1955 y cualesquiera otras que pudieran dictarse posteriormente).

Se aportará abono foliar complejo (N-P-K: 8-24-8). El 80 % del fósforo (P_2O_5) deberá ser soluble en agua, y el nitrógeno de asimilación lenta.

4. Agua

La que se emplee para riegos y en las hidrosiembras tendrá un contenido inferior al uno por ciento (1 %) en cloruros y sulfatos, y su pH será igual o superior a seis (6).

Se admitirán, para cualquier uso, todas las aguas que estén calificadas como potables.

5. Turba

Se denomina turba al material orgánico procedente de la descomposición anaerobia de residuos vegetales. La turba a utilizar será de tipo rubia o finlandesa:

- No contendrá cantidades apreciables de cinc, leña u otras maderas, ni terrones duros.
- Su pH será inferior a siete y medio (7,5).
- Su porcentaje mínimo de materia orgánica será del ochenta y cinco por ciento (85 %).
- Tendrá, como mínimo, capacidad para absorber el doscientos por ciento (200 %) de agua, sobre la base de su peso seco constante.

6. Tierra vegetal

Los cánones de aceptación que se deben considerar, son los siguientes:

- Composición granulométrica de la tierra fina: Arena, 60/75 %, limo y arcilla 10/20 %, humus 4/10 %.
Estos porcentajes corresponden a una tierra franca bastante arenosa. Índice de plasticidad, menor que 8.
- Granulometría: ningún elemento superior a 1 cm de diámetro. El 20/25 % de los materiales deben estar comprendidos entre 2-10 mm de diámetro.
- Composición química:
Porcentajes mínimos: Nitrógeno, 1 por 1000.
 P_2O_5 asimilable, 0,3 por 1000
 K_2O asimilable, 0,1 por 1000

C. Revestimiento vegetal

1. Materiales a utilizar en la hidrosiembra

- Agua.
Ver el Apartado B.4.
- Mulch.

Se define como «mulch» toda cubierta superficial del suelo, orgánica o inorgánica, que tenga un efecto protector.

Se empleará mulch de fibra corta procedente de una mezcla al 50 % de pasta mecánica y heno picado y deshidratado, de alfalfa u otra herbácea de características similares.

— Estabilizador.

Se entiende por «estabilizador» cualquier material, orgánico o inorgánico, aplicado en solución acuosa, que penetrando a través de la superficie del terreno reduzca la erosión por aglomeración física de las partículas, a la vez que ligue las semillas y el mulch, pero sin llegar a crear una película impermeable.

Se estima conveniente la utilización de un estabilizador del tipo del garrofín, de compuestos formados por alginatos de sodio procedentes de algas (como la *Laminaria fleicaulis* y *Ascophyllum nodosum*), o de una solución acuosa de un polímero sintético de tipo acrílico. Se procurará asimismo la utilización de productos que permitan el uso de fertilizantes minerales, reduciendo así el peligro de reacciones alcalinas y favoreciendo la formación de humus.

— Semillas.

La mezcla de semillas será la indicada en el Proyecto.

a) Definición:

Las semillas son el albergue de las plantas en embrión. Son los gérmenes de una nueva generación. Almacenan el germen del progenitor o progenitores, protegido de diversas maneras contra el calor, el frío, la sequía y el agua, hasta que se presenta una situación favorable para su desarrollo.

Las semillas son el vehículo que sirve para que la vida embrionaria, casi suspendida, renueve su desarrollo, luego de haberse separado de sus progenitores. Son, en definitiva, una forma de supervivencia de las especies vegetales.

b) Condiciones generales:

Las semillas procederán de casas comerciales acreditadas y serán del tamaño, aspecto y color de la especie botánica elegida. Para todas las partidas de semilla se exige el certificado de origen, y éste ha de ofrecer garantías suficientes al Director.

El peso de la semilla pura y viva (P_1) contenida en cada lote no será inferior al ochenta por ciento (80 %) del peso del material envasado.

El grado de pureza mínimo (P_p), de las semillas será al menos del ochenta y cinco por ciento (85 %) de su peso, y el poder germinativo (P_g), tal que el valor real de las semillas sea el indicado más arriba.

La relación entre estos conceptos es el siguiente:

$$P_1 = P_g \cdot P_p$$

No estarán contaminadas por hongos, ni presentarán signos de haber sufrido alguna enfermedad micológica. No presentarán parasitismo de insectos.

Cada especie deberá ser suministrada en envases individuales sellados o en sacos cosidos, aceptable-

mente identificados y rotulados, para certificar las características de la semilla.

Estas condiciones deberán estar garantizadas suficientemente, a juicio de la Dirección de Obra; en caso contrario podrá disponerse la realización de análisis, con arreglo al Reglamento de la Asociación Internacional de Ensayos de Semillas, que en el Hemisferio Norte entró en vigor el 1 de julio de 1960. La toma de muestras se efectuará con una sonda tipo Nobbe.

2. *Materiales a utilizar en la plantación*

1. *Plantas*

Se entiende por planta en un Proyecto de Plantaciones toda especie vegetal que habiendo nacido y sido criada en un lugar, es sacada de éste y se sitúa en la ubicación que indica el Proyecto.

La forma y dimensiones que adopta la parte aérea de un vegetal de acuerdo con sus características anatómicas y fisiológicas se llama porte.

Se distinguirán las siguientes dimensiones y características:

Arbol: vegetal leñoso, que alcanza cinco metros (5 m) de altura o más, no se ramifica desde la base y posee un tallo principal, llamado tronco.

Arbusto: vegetal leñoso que, como norma general, se ramifica desde la base y posee un tallo principal, llamado tronco.

Mata: arbusto de altura inferior a un metro (1 m).

Vivaz: vegetal no leñoso, que dura varios años; y también planta cuya parte subterránea vive varios años. A los efectos de este pliego, las plantas vivaces se asimilan a los arbustos y matas cuando alcanzan sus dimensiones y las mantienen a lo largo de todo el año: a los arbustos

cuando superan el metro de altura, y a las matas cuando se aproximan a esa cifra.

Anual: planta que completa en un año su ciclo vegetativo.

Bienal o bisanual: que vive durante dos períodos vegetativos; en general, plantas que germinan y dan hojas el primer año y florecen y fructifican el segundo.

Tapizante: vegetal de pequeña altura que, plantado a una cierta densidad, cubre el suelo completamente con sus tallos y con sus hojas. Serán en general, pero no necesariamente, plantas cundidoras.

Esqueje: fragmento de cualquier parte de un vegetal y de pequeño tamaño, que se planta para que emita raíces y se desarrolle.

— Procedencia.

Conocidos los factores climáticos de la zona objeto del Proyecto y los vegetales que van a ser plantados, el lugar de procedencia de éstos debe reunir condiciones climáticas semejantes o al menos favorables para el buen desarrollo de las plantas, y será, como norma general un vivero oficial o comercial acreditado.

— Condiciones generales.

Las plantas pertenecerán a las especies o variedades señaladas en la Memoria y en los Planos y reunirán las condiciones de edad, tamaño, desarrollo, forma de cultivo y de trasplante que asimismo se indiquen.

Las plantas suministradas poseerán un sistema radical en el que se hayan desarrollado las radículas suficientes para establecer prontamente un equilibrio con la parte aérea.

Las plantas estarán ramificadas desde la base, cuando éste sea su porte natural; en las coníferas, además, las ramas irán abundantemente provistas de hojas.