

EL AGUA Y LA INDUSTRIA EXTRACTIVA DEL CARBON  
MODALIDAD SUBTERRANEA

MARCELA ANDREA CORREDOR GUTIERREZ  
RODRIGO ANDRES PERTUZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA

2013

EL AGUA Y LA INDUSTRIA EXTRACTIVA DEL CARBON  
MODALIDAD SUBTERRANEA

MARCELA ANDREA CORREDOR GUTIERREZ  
ING RODRIGO ANDRES PERTUZ

Monografía para optar al título de  
Especialista en Ingeniería Ambiental

DIRECTOR  
ESP. RICHARD DIAZ GUERRERO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA

2013

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION.....	17
1. GENERALIDADES.....	19
1.1. EL CARBON.....	19
1.2. CLASIFICACION Y USOS DEL CARBON.....	20
2. LA CADENA DEL CARBÓN EN COLOMBIA.....	21
2.1. RESERVAS CARBONÍFERAS.....	21
2.2. CALIDADES DEL CARBÓN COLOMBIANO.....	23
2.3. MINERÍA DEL CARBÓN POR REGIONES.....	24
2.3.1. Departamento de Boyacá.....	24
2.3.2. Departamento de Cundinamarca.....	25
2.4. EXPLOTACIÓN Y PRODUCCIÓN.....	25
2.5. EFICIENCIA PRODUCTIVA DEL CARBÓN.....	27
2.5.1. Economía de Escala.....	27
2.5.2. Extracciones Ilegales.....	27
2.5.3. Materiales Empleados.....	27
2.5.4. Poder de Negociación.....	27
2.5.5. Estacionalidad Climática.....	28
2.5.6. Programa de Uso Racional de Energía.....	28
3. CICLO DE LOS PROYECTOS MINEROS.....	29
3.1. FASES DE LOS PROYECTOS MINEROS.....	29
3.1.1. Gestación del Proyecto:.....	29
3.1.2. Exploración:.....	29
3.1.3. Exploración General:.....	30
3.1.4. Exploración Detallada:.....	30
3.1.5. Desarrollo:.....	31
3.1.6. Producción:.....	31
3.1.7. Desmantelamiento:.....	32

3.2. PLANIFICACIÓN DE LA MINERÍA.....	32
3.2.1. Plan Minero Conceptual a Largo Plazo .....	32
3.2.2. Plan Minero Detallado a Corto Plazo: .....	33
3.3. INFORME ANUAL DE EXPLOTACIÓN.....	33
3.4. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ACTIVIDAD .....	33
3.4.1. Preparación del Yacimiento.....	34
4. DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DEL CARBÓN .....	36
4.1. TAJO LARGO.....	36
4.2. CÁMARAS Y PILARES .....	38
4.3. ENSANCHE DE TAMBORES.....	40
4.4. ESCALONES INVERTIDOS:.....	41
5. OPERACIONES UNITARIAS DE LA MINERÍA SUBTERRÁNEA .....	44
6. ZONA DE ESTUDIO.....	45
6.1. DEPARTAMENTO DE BOYACA.....	45
6.1.1. Localización.....	45
6.1.2. Hidrografía.....	46
6.1.3. Cuencas Hidrográficas .....	46
6.2. DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA .....	47
6.2.1. Localización.....	47
6.2.2. Límites .....	47
6.2.3. Fisiografía.....	48
6.2.4. Hidrografía.....	48
7. ASPECTOS AMBIENTALES .....	50
7.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁMBITO MINERO.....	50
7.2. IMPACTO AMBIENTAL Y MEDIDAS DE PROTECCIÓN .....	51
7.3. EFECTOS SOBRE EL YACIMIENTO Y LAS ROCAS ADYACENTES .....	52
7.3.1. Explotación de Recursos.....	52
7.3.2. Modificación de las Rocas Adyacentes.....	52
7.3.3. Alteración del Flujo de Aguas Subterráneas .....	52
7.3.4. Deterioro de la Calidad de las Aguas Subterráneas.....	53

7.4. EFECTOS AMBIENTALES BAJO TIERRA .....	53
7.4.1. Aire .....	53
7.4.2. Ruido .....	53
7.4.3. Polvo .....	54
7.4.4. Aguas de Mina .....	56
7.5. EFECTOS AMBIENTALES EN LA SUPERFICIE DEL TERRENO .....	56
7.5.1. Aire .....	56
7.5.2. Agua.....	57
7.5.3. Hundimientos .....	58
7.6. TERREROS, USO DE SUPERFICIES, PAISAJE .....	59
7.7. OTRAS CONSECUENCIAS DE LA MINERIA SUBTERRANEA.....	60
8. IMPACTOS AMBIENTALES DE LA MINERIA EN COLOMBIA.....	62
8.1. IMPACTOS AMBIENTALES OCASIONADOS POR LA MINERÍA EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACA .....	62
8.1.1. La Fauna Circundante:.....	63
8.1.2. Murete de Truchas por Minería de Carbón.....	64
8.1.3. Paramos de Boyacá. ....	64
8.2. IMPACTOS AMBIENTALES OCASIONADOS POR LA MINERIA EN EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA.....	65
8.2.1. Extracción Artesanal de Carbón en Minas Subterráneas.....	65
9. IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES .....	68
9.1. IMPACTOS SOBRE EL MEDIO BIOFISICO .....	68
9.1.1. Impactos Sobre la Atmósfera .....	68
9.1.2. Impactos Sobre el Agua .....	68
9.1.3. Impactos Sobre el Suelo .....	70
9.1.4. Impactos Sobre la Vegetación.....	70
9.1.5. Impactos Sobre la Fauna .....	71
9.1.6. Impactos Sobre el Paisaje.....	71
9.2. IMPACTOS SOBRE EL MEDIO SOCIAL .....	71
9.2.1. IMPACTOS ECONÓMICOS.....	71

9.2.2. Impactos Sociales .....	73
10. MATRIZ DE IMPACTOS AMBIENTALES EN LA MSC. ....	75
11. CONTAMINACION DEL AGUA DEBIDO A LA ACTIVIDAD MINERA.....	76
11.1. PROCESOS USADOS PARA EL TRATAMIENTO DE DAM .....	78
11.1.1. Proceso Físico Químico .....	78
11.1.2. Tratamiento Convencional .....	79
11.1.3. Electrocoagulación .....	81
11.1.4. Proceso Biológico .....	82
11.1.5. Biolixiviación.....	83
11.1.6. Bioacumulación .....	83
11.1.7. Bioadsorción .....	84
11.1.8. Reducción Biológica.....	84
11.1.9. Humedales Artificiales.....	86
12. MANEJO AMBIENTAL DE AGUAS RESIDUALES DE MINERÍA .....	88
12.1. IMPACTO A PREVENIR O MITIGAR.....	88
12.1.1. Acidificación .....	88
12.1.2. Sólidos en Suspensión.....	88
12.1.3. Compuestos en Solución .....	88
12.1.4. Agotamiento .....	88
12.2. CRITERIOS AMBIENTALES.....	89
12.2.1. Identificación .....	89
12.2.2. Definición de Sistemas de Tratamiento.....	90
12.2.3. Localización .....	91
12.2.4. Mantenimiento.....	91
12.2.5. Actividades a Desarrollar .....	95
12.2.6. Responsable .....	95
13. MARCO JURIDICO .....	96
13.1. MARCO LEGAL MINERO .....	96
13.2. TITULARIZACIÓN MINERA .....	97
13.3. LICENCIA DE EXPLORACIÓN .....	98

13.4. LICENCIA DE EXPLOTACIÓN .....	99
13.5. APORTES MINEROS.....	99
13.6. CONTRATOS MINEROS .....	99
13.6.1. Los Contratos de Concesión.....	99
13.6.2. Los Contratos con las Entidades Descentralizadas .....	99
13.7. ACTIVIDADES MINERAS CARBONÍFERAS .....	100
13.8. TITULOS MINEROS .....	101
13.9. REGISTRO MINERO .....	102
13.10. ZONAS MINERAS PARA LAS MINORÍAS ÉTNICAS .....	104
14. CONCLUSIONES.....	105
15. RECOMENDACIONES .....	107
BIBLIOGRAFIA.....	108
ANEXOS.....	110

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Clasificación de los carbones.....	19
Tabla 2. Recursos más reservas de carbón en Boyacá (Mt) .....	24
Tabla 3. Recursos más reservas de carbón en Cundinamarca .....	25
Tabla 4. Operaciones Unitarias de la Minería Subterránea .....	44
Tabla 5. Factores que influyen en el clima y el aire en la minería subterránea .....	55
Tabla 6. Contaminación de aguas superficiales y de mina .....	56
Tabla 7. Principales características fisicoquímicas de las aguas residuales de minería en Colombia .....	69
Tabla 8. Principales problemas sociales de la MSC en Colombia .....	73
Tabla 9. Bacterias Asociadas al Tratamiento de Residuos de Minería .....	85
Tabla 10. Marco Legal Minero .....	97
Tabla 11. Marco Legal Título Minero.....	101

## LISTO DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. La Cadena del Carbón Colombiano.....	22
Figura 2. Método de Tajo Largo.....	37
Figura 3. Método de Cámaras y Pilares.....	40
Figura 4. Método de Escalones Invertidos.....	43
Figura 5. Departamento de Boyacá. ....	47
Figura 6. Departamento de Cundinamarca.....	49
Figura 7. Interceptación de aguas por canales.....	92
Figura 8. Sellamientos y cubrimientos.....	92
Figura 9. Etapas de neutralización convencional con cal.....	93
Figura 10. Tanques de neutralización.....	93
Figura 11. Tipos de sedimentadores.....	94
Figura 12. Cascadas de aireación y corrección de pH.....	94
Figura 13. Mapa de Zonas Protegidas, Títulos y Solicitudes Mineras. ....	98

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A - LA CALIDAD DEL CARBON COLOMBIANO SEGÚN ZONA CARBONÍFERA.....	110
Anexo B - MATRIZ DE LOS PRINCIPALES IMPACTOS AMBIENTALES EN LA MINERIA SUBTERRANEA EN COLOMBIA .....	111
Anexo C - MATRIZ DE LOS PRINCIPALES IMPACTOS DE LA MINERIA SUBTERRANEA DEL CARBON.....	114

**TITULO:** EL AGUA Y LA INDUSTRIA EXTRACTIVA DEL CARBON MODALIDAD SUBTERRANEA<sup>1</sup>.

**AUTORES:** ING MARCELA ANDREA CORREDOR GUTIERREZ<sup>2</sup>  
ING RODRIGO ANDRES PERTUZ

**PALABRAS CLAVE:** Identificación de Impactos, Mitigación, Remediación, Drenajes Ácidos, Impacto Ambiental, Metales Pesados, Efectos Drenajes Ácidos.

**DESCRIPCION:**

Este trabajo fue realizado con el objeto de hacer un análisis sobre la incidencia negativa de la explotación y producción minera subterránea de carbón, identificando tanto las consecuencias como la afectación al entorno sobre el cual se desarrolla esta actividad; realizando una caracterización ambiental de la explotación minera en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá para así conocer los impactos ambientales más significativos existentes desde el punto de vista biofísico y social, extrayendo los aspectos de mayor relevancia en cuanto a la afectación a las corrientes de agua en donde se vierten los residuos propios de la explotación y plantear posibles tratamientos para mitigar este impacto. Los efectos negativos ambientales ocasionados por la minería en Colombia, a pesar del aumento en la reglamentación que ha venido progresivamente aplicándose en los departamentos productores, se constituyen como un tema de preocupación bastante álgido para las organizaciones del estado y no gubernamentales, que tienen en su haber, el cuidado de la multiplicidad de ecosistemas con que se dispone en el país.

Con esto no se trata de oponerse sin argumentos a una actividad que mucho le aporta a las regiones y que resulta clave para proyectos sociales del estado que “luchan” contra la corrupción en las regiones. Se trata de seguir evolucionando como sociedad al punto de llegar a una verdadera sinergia entre la minería y el medio ambiente, de modo que quienes resulten beneficiados sean la población colombiana y las generaciones del futuro.

---

<sup>1</sup> Trabajo de Grado

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director Ing. Richard Díaz Guerrero

**TITLE:** WATER AND COAL EXTRACTIVE INDUSTRY UNDERGROUND MODE<sup>3</sup>

**AUTHORS:** ING MARCELA ANDREA CORREDOR GUTIERREZ<sup>4</sup>  
ING RODRIGO ANDRES PERTUZ

**KEY WORDS:** Impact Identification, Mitigation, Remedation, Acid Drainage, Environmental Impact, Heavy Metals, Effects Acid Drainage.

**DESCRIPTION:**

This work was carried out in order to analyze the negative impact on the development and production of underground coal mining, identifying both the consequences and the effects on the environment on which this activity takes place; conducting an environmental characterization of mining in the departments of Cundinamarca and Boyacá order to know the most significant environmental impacts from existing biophysically and social, extracting the most relevant aspects concerning the effect on waterways where waste is discharged themselves from the exploitation and propose possible treatments to mitigate this impact. The negative environmental effects caused by mining in Colombia, despite the increase in regulation has been gradually applied in the producing departments, constitute a concern enough height to state organizations and NGOs, who have in their have, caring for the many ecosystems that are available in the country.

This is not no arguments to oppose an activity that brings much to the regions and social projects is key to state that "fight" against corruption in the regions. These continue to evolve as a society to the point of reaching a true synergy between mining and the environment, so that those who have been benefited are the Colombian population and future generations.

---

<sup>3</sup> Work of Grade

<sup>4</sup> Specialization In Eviromental Engineeering. School of Chemical Engineeering. Director Ing Richard Diaz Guerrero.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Analizar la incidencia de los agentes negativos de la explotación y producción minera subterránea del carbón y sus consecuencias e influencia de transformación y afectación del entorno, en el cual se desarrolla esta actividad.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Estudio de las labores características y particulares de la actividad minera subterránea.
- Caracterización ambiental del Sector de la explotación minera en los Departamentos de Cundinamarca y Boyacá.
- Definición de los impactos ambientales más significativos existentes en la minería, desde el punto de vista biofísico y social.
- Identificación de los aspectos de mayor relevancia en cuanto a la afectación de las corrientes de agua y su posible tratamiento.

## INTRODUCCION

La minería se ha consolidado en el sector que reviste mayor interés en la creciente economía colombiana; en el 2011 esta actividad estuvo en pleno auge y las perspectivas fueron absolutamente alentadoras para los años venideros. Estudios muy serios precisaron el considerable aumento en la producción de la mayor parte de los minerales que se explotaron en este país, sin embargo, a pesar de dicho panorama tan promisorio, los tópicos ambientales han sido un verdadero dolor de cabeza para las entidades encargadas de su control.

Los impactos ambientales ocasionados por la minería en Colombia, a pesar del aumento en la reglamentación que ha venido progresivamente aplicándose en los departamentos productores, se constituyen como un tema de preocupación bastante álgido para las organizaciones del estado y no gubernamentales, que tienen en su haber, el cuidado de la multiplicidad de ecosistemas con que se dispone en el país.

Los puntos críticos del impacto ambiental en este sector se concentran básicamente en tres causas que acomplejan la temática: la minería ilegal, la ineficiencia de los organismos ambientales del estado y la falta de concienciación de las grandes empresas mineras frente a la excelencia medioambiental.

Primero, la minería ilegal, artesanal, rudimentaria, informal, como quiera llamársele, se constituye en un foco devastador de la naturaleza que no mide los daños que genera en los recursos ambientales, sencillamente porque vulnera el uso de los mismos, priorizando temas financieros, en muchos casos de sustento básico, desarrollando acciones eco-irracionales que no producen beneficios de fondo para el estado y que comprenden un verdadero cáncer para los intereses nacionales, desde la óptica en que se le mire.

Segundo, todas las entidades del estado, direccionadas o no por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, de la Republica de Colombia, añadiendo por supuesto, las ONGs con fines ecológicos, todas en suma, realizan esfuerzos importantes en Pro del cuidado y conservación de los recursos naturales y “tratan”(porque nunca ha sido suficiente) de controlar los devastadores efectos de laminería, pero, a nivel mundial y acentuado en Colombia existe una crisis de valores ambientales, que, a pesar de todas las leyes que se han implementado en ese sector, hacen que las acciones sean insuficientes y los resultados sean inocuos.

Tercero, las grandes corporaciones mineras que tienen sus operaciones en Colombia, adolecen todavía de ambiciosas metas en materia ambiental, incluso de marketing ecológico, que invitan a los cuestionamientos de la sociedad frente a los daños que causan en las zonas donde funcionan.

Los temas de responsabilidad ambiental corporativa son materia reprobada y la minería responsable es todavía absolutamente utópica. En conclusión, se puede apuntar a la minería como una división primordial para el desarrollo de Colombia.

No se trata de oponerse sin argumentos a una actividad que mucho le aporta a las regiones y que resulta clave para proyectos sociales del estado que “luchan” contra la corrupción en las regiones. Se trata de seguir evolucionando como sociedad al punto de llegar a una verdadera sinergia entre laminería y el medio ambiente, de modo que quienes resulten beneficiados sean la población colombiana y las generaciones del futuro.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. EL CARBON

Un mineral es una sustancia natural homogénea, de origen inorgánico, con composición química definida y, en general, con estructura cristalina, por lo que se excluyen de esta definición las sustancias generadas por la transformación de materia orgánica en ambientes reductores como carbón, petróleo y resinas fósiles. Este origen asociado a procesos geológicos ha llevado a varios autores a clasificar los materiales con hidrocarburos como minerales; sin embargo, resulta más adecuado referirse a éstos como materiales energéticos y en este sentido se utiliza en este documento.

El carbón, compuesto principalmente por carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre, se origina en transformaciones físicas y químicas de grandes acumulaciones vegetales depositadas en ambientes palustres (pantanos), lagunares o deltaicos. Una de las clasificaciones más aceptadas para el carbón corresponde a la *American Society for Testing and Materials* (ASTMD-388-777), mostrada en la Tabla 1, que lo divide en cuatro clases según las propiedades referidas a la composición de los vegetales y las condiciones de presión y temperatura (grado de metamorfismo) a que fueron sometidos durante su formación.

**Tabla 1.** Clasificación de los carbones

TIPO	CARBON O FIJO (%)	MATERIAL VOLATIL (%)	CONTENIDO HUMEDAD (%)	PODER CALORIFICO (BTU/LB)	PODER CALORIFICO (MJ/KG)	PODER CALORIFICO KCAL/KG
Antracita	86 - 98	1	< 15	>14.000	>32,6	>7.780
Bituminoso	45 - 86	32	15 - 20	10.500-14.000	24,5 – 32,6	5.800-7.780
Sub bituminoso	35 - 45	50	20 - 30	7.800 - 10.500	18,2 – 2,5	4.300- 7.780
Lignito y Turba	25 - 35	96	> 30	4.000 - 7.800	9,3 – 18,2	2.200 – 4.300

FUENTE: EL CARBON COLOMBIANO, Ministerio de Minas y Energía 2004.

## 1.2. CLASIFICACION Y USOS DEL CARBON

- **Antracita:** o carbón duro, con alto contenido de carbono (86% al 98%), bajo contenido de materia volátil y poder calorífico superior a 32,6 MJ/Kg (14.000 BTU/lb). Usado como combustible en generación de calor o vapor en la industria térmica y siderúrgica, también se usa en la fabricación de goma sintética, colorantes y purificación de agua para consumo humano (filtros).
- **Hulla Bituminosa:** este tipo de carbón posee un menor contenido de carbono y menor poder calorífico que los carbones antracíticos. Por su forma de uso se conocen como carbones coquizables, usados en procesos de obtención del acero, y carbones térmicos, usados en la producción de vapor para generación de energía.
- **Hulla Sub-bituminosa:** con menor poder calorífico que los carbones bituminosos, su composición en carbono está entre 35% y 45%, tiene un elevado contenido de material volátil, algunos con poder coquizable. Es empleado en la generación de energía eléctrica y en procesos industriales.
- **Lignito y Turba:** son carbones con alta humedad y alto contenido de ceniza y de material volátil, lo cual hace que posean un bajo poder calorífico. Es empleado para la generación de calorífica (calefacción), energía eléctrica, para algunos procesos industriales en donde se requiere generar vapor y más recientemente se han fabricado briquetas de turba y lignito para quemarlas en hornos.

Además de generación eléctrica, gasificación y producción de coque, el carbón es empleado en la producción de benceno, aceites, alquitran y, mediante la licuefacción, como sustituto del petróleo.

## **2. LA CADENA DEL CARBÓN EN COLOMBIA**

Las principales actividades que componen la cadena colombiana del carbón, donde se eslabonan diferentes etapas que van desde la exploración minera hasta los usos finales del carbón, teniendo en cuenta, además de los aspectos generales, las características departamentales más relevantes.

En el país la cadena del carbón puede explicarse en las siguientes etapas:

- Exploración - reservas y calidades.
- Explotación - desarrollo y montaje, preparación y producción.
- Beneficio - clasificación y lavado del carbón.
- Transformación, en la producción de coque y otros procesos
- Transporte desde la mina hasta el sitio de beneficio y los patios de acopio.
- Transporte, comercialización, distribución y usos.

### **2.1. RESERVAS CARBONÍFERAS**

Como se ha indicado, Colombia cuenta con recursos de carbón de excelente calidad, suficientes para participar en el mercado mundial por largo tiempo. Las reservas medidas son de 7.063,6 Mt, ubicadas principalmente en la Costa Atlántica, donde se encuentra el 90% del carbón térmico que a su vez corresponde al 98% del carbón nacional.

El 95% de las reservas se ubica en los departamentos de La Guajira, Cesar, Córdoba, Norte de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle del Cauca y Cauca.

Figura 1. La Cadena del Carbón Colombiano



Fuente : ECOCARBÓN Tomado y adaptado de Manual para el Control de los Factores de Degradación Ambiental en la Minería Subterránea del Carbón, Londoño, J. y Rada, M., 1995

## 2.2. CALIDADES DEL CARBÓN COLOMBIANO

La calidad de los carbones está referida a las propiedades físicas y químicas, descritas a continuación (Coal Processing Consultants Ltd. 1980), que son las que finalmente determinarán el uso final del material.

- **Humedad:** se presenta como humedad total, inherente o de equilibrio, superficial, agua de hidratación o agua de descomposición. Tiene importancia en contratos de compraventa, en evaluación y control de procesos industriales y en manejo y pulverización del carbón.
- **Cenizas (Cz):** residuo no combustible de origen orgánico e inorgánico.
- **Materias volátiles (Mv):** su contenido determina los rendimientos del coque y sus productos y es criterio de selección del carbón para gasificación y licuefacción.
- **Carbono fijo (CF):** es una medida de material combustible sólido y permite clasificar los carbones y definir los procesos de combustión y carbonización.
- **Azufre total (St):** parámetro en la definición de gases tóxicos de los procesos de gasificación y licuefacción.
- **Poder Calorífico (PC):** representa la energía de combustión del carbono e hidrógeno y del azufre. Es el parámetro más importante en la definición de los contratos de compraventa de carbones térmicos y en la clasificación de los carbones por rango.

De acuerdo con los estudios de caracterización adelantados en las zonas carboníferas del país (Ingeominas, 2004), en la cordillera Oriental se encuentran los mejores carbones bituminosos para uso térmico y metalúrgico junto con carbones antracíticos, tanto para el consumo interno como de exportación; en la

cordillera Occidental se hallan carbones bituminosos y sub-bituminosos en Córdoba, norte de Antioquia, Valle del Cauca y Cauca; en la cordillera Central existen carbones bituminosos en las zonas carboníferas de Antioquia y Antiguo Caldas y, menos conocidos, en Huila y Tolima.

### 2.3. MINERÍA DEL CARBÓN POR REGIONES

La Calidad del carbón colombiano según zona carbonífera, se puede apreciar en el Anexo n°A.

#### 2.3.1. Departamento de Boyacá

El área carbonífera en Boyacá va desde el municipio de Jericó, al norte, hasta los límites con el departamento de Cundinamarca; la principal área minera se encuentra entre los municipios de Sogamoso y Jericó la cual cuenta con carbones tipo bituminosos y reservas medidas de 102.84 Mt, otras áreas de importancia son: Tunja - Paipa - Duitama con 24,03 Mt, Suesca - Albarracín con 7,81 Mt y Chequa - Lenguaque con 35,69 Mt, compartida con Cundinamarca. La minería de esta región es poco tecnificada y de subsistencia.

**Tabla 2.** Recursos más reservas de carbón en Boyacá (Mt)

ZONA	AREA	RECURSOS MAS RESERVAS BASICAS			RECURSOS	POTENCIAL
		MEDIDOS	INDICADOS	INFERIDOS	HIPOTETICOS	
BOYACA	Chequa-Lenguaque	35,69	129,87	115,84		281,4
	Suesca-Albarracín	7,81	43,29	106,26		157,36
	Tunja-Paipa-Duitama	24,03	97,21	171,41		292,65
	Sogamoso-Jericó	102,84	412,25	473,71		988,8
	<b>Totales</b>	<b>170,37</b>	<b>682,62</b>	<b>867,22</b>		<b>1.720,21</b>

**Fuente:** INGEOMINAS (2004) La Cadena del Carbón en Colombia.

### 2.3.2. Departamento de Cundinamarca

Esta área se encuentra ubicada en el centro del país, la formación carbonífera en la región va desde el municipio de Zipaquirá hasta los límites con el departamento de Boyacá. El carbón es del tipo bituminoso y cuenta con las siguientes zonas mineras: Chequa - Lenguazaque, San Francisco - Subachoque - La Pradera con 11,35 Mt, Tabio - Río Frío – Carmen de Carupa con 19,43 Mt, Zipaquirá - Neusa con 1,64 Mt, Guatavita - Sesquilé - Chocontá con 21,90 Mt, Suesca - Albarracín con 32,92 Mt y Chequa - Lenguazaque con 140,42 Mt, en total se calculan unas reservas medidas de 236,23 Mt. La clase de explotación está asociada a la minería poco tecnificada y de subsistencia.

**Tabla 3.** Recursos más reservas de carbón en Cundinamarca

ZONA	AREA	RECURSOS MAS RESERVAS BASICAS			RECURSOS	POTENCIAL
		MEDIDOS	INDICADOS	INFERIDOS	HIPOTETICOS	
CUNDINAMARCA	Jerusalén-Guataquí	1,81	5,73	5,28	3,23	16,05
	Guaduas-Caparrapí	6,76	32,68	21,36	0,91	61,71
	San Francisco- Subachoque-					
	La Pradera	11,35	48,2	60,89	6,46	126,9
	Guatavita- Sesquilé-					
	Chocontá	21,9	64,31	106,88	10,14	203,23
	Tabio-Río Frío- Carmen de Carupa	19,43	55,82	54,84	24,78	154,87
	Chequa-Lenguazaque	140,42	345,44	210,66	16,25	712,77
	Suesca-Albarracín	32,92	87,71	68,9		189,53
	<b>Zipaquirá-Neusa</b>	1,64	4,96	10,41		17,01
	<b>Totales</b>	<b>236,23</b>	<b>644,85</b>	<b>539,22</b>	<b>61,77</b>	<b>1.482,07</b>

Fuente: INGEOMINAS (2004) La Cadena del Carbón en Colombia

### 2.4. EXPLOTACIÓN Y PRODUCCIÓN

Después de la etapa de exploración con resultados económicamente factibles, se da comienzo a la etapa de explotación, que a su vez se subdivide en: desarrollo –

montaje (vías de acceso, obras de infraestructura, servicios a la mina), preparación (delimitación de áreas dentro del yacimiento, bancos, niveles, subniveles, tambores, entre otros) y finaliza con el arranque, extracción o producción en mina, por diferentes métodos y sistemas de explotación, según las condiciones del yacimiento carbonífero.

En la Costa Atlántica predomina la minería a cielo abierto tecnificada y a gran escala mientras que en el interior del país prevalecen las explotaciones poco tecnificadas y bajo tierra.

Entre las características más relevantes de cada tipo de minería se tienen:

- **Minería tecnificada o a gran escala:** presenta altos niveles de inversión que garantizan infraestructura tecnológica adecuada para desarrollar eficientemente las labores de exploración, explotación, transporte y embarque, además de las actividades de control y monitoreo; como ejemplo de esto se tienen los Proyectos del Cerrejón y del Cesar.
- **Minería medianamente tecnificada:** aunque existe tecnología y conocimiento sobre la exploración y la explotación del material y hay cierto grado de control ambiental, las inversiones son menores que en la minería tecnificada.
- **Minería a pequeña escala y de subsistencia:** actividad extractiva desarrollada de manera artesanal, con arranque manual del material y sin tecnología. Por lo general está asociada con contaminación, deterioro, erosión y desestabilización del terreno debido a la ausencia de diseños de explotación minera

## **2.5. EFICIENCIA PRODUCTIVA DEL CARBÓN**

La diversidad minera colombiana está representada en numerosas unidades productivas con diferentes ambientes geológicos y métodos extractivos que particularizan, en cada caso, los retos sobre la eficiencia productiva, así:

### **2.5.1. Economía de Escala.**

Asociada con la minería tecnificada, disminuyendo la competitividad la minería de pequeña escala que deberá enfrentar el reto a través de asociaciones de productores y con las actividades de transporte, cuyo incremento ha encarecido la explotación del recurso, y de comercialización.

### **2.5.2. Extracciones Ilegales.**

El impacto social, sumado al desconocimiento de las autoridades locales con respecto a sus obligaciones al respecto y al apoyo de productores legales y comercializadores, quienes en ocasiones se apoyan en estas extracciones para satisfacer la demanda de sus clientes, ha dificultado la erradicación de esta actividad.

### **2.5.3. Materiales Empleados.**

Existen sobrecostos en las labores de explotación, en especial en regiones donde prevalecen las extracciones ilegales, asociadas a la sobreexplotación del recurso maderero y la dificultad para la consecución de explosivos.

### **2.5.4. Poder de Negociación.**

Hasta que el Código de Minas estableció la libertad de empresa para la actividad minera la obligación a los productores mineros de abastecer la demanda nacional

causó desequilibrio en el poder de negociación a favor de los consumidores quienes en muchos casos pagaban el carbón a precios inferiores a los costos de producción. A partir de 2003 la nueva condición de libertad de empresa sumada a los precios internacionales altos inclinó la balanza hacia los productores por lo que se alcanzó a temer un desabastecimiento en las Termo eléctricas a carbón debido a los precios solicitados por éstos últimos. Para evitar abusos de posición dominante como los descritos es necesario crear vínculos de largo plazo entre productores y consumidores que garanticen ingresos adecuados a los primeros y abastecimiento a los segundos.

#### **2.5.5. Estacionalidad Climática.**

Con el fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENSO), cuya ocurrencia es cada cuatro años en promedio, se incrementa el consumo de carbón para la generación eléctrica; sin embargo, durante condiciones normales o de fenómeno La Niña, la demanda interna se reduce significativamente y las estructuras productivas poco sólidas causan interferencia minera y altos costos de producción, en especial por los costos de cierre y apertura de dichas minas.

#### **2.5.6. Programa de Uso Racional de Energía.**

Los programas de uso racional de energía buscan reducir el consumo de ésta a través de procesos eficientes. Entre estos programas se incluye la utilización industrial de gas que muestra reducciones en costos y energía. Tal es el caso de la industria cementera en donde el cambio en una de las fases del proceso húmedo por proceso seco ha alcanzado reducciones, en términos de eficiencia, del 25 % y de acuerdo a estimativos internacionales podría lograrse una disminución en la carga térmica entre 1680 MJ/kg y 2100

### **3. CICLO DE LOS PROYECTOS MINEROS**

#### **3.1. FASES DE LOS PROYECTOS MINEROS**

En el Plan Nacional de Desarrollo Minero, el Ministerio de Minas y Energía establece las fases para el ciclo minero, el cual abarca desde la gestación de un proyecto hasta su cierre. El Ciclo minero tiene las siguientes 5 fases, que a continuación se describen.

##### **3.1.1. Gestación del Proyecto:**

Constituye la fase inicial de un proyecto; la información básica se obtiene por medio de estudios de reconocimiento y de prospección geológica. Estos estudios identifican, a escala regional, las zonas con fuerte potencial minero e investigan el yacimiento delimitando las zonas más prometedoras que serán objeto de una exploración más amplia. Generalmente en esta fase el Estado, a través de Ecocarbón, promueve el desarrollo de futuros proyectos y concluye esta etapa con el otorgamiento del título minero que da a los particulares el derecho a explorar y explotar el área. En este período el inversionista privado toma la decisión de contratar y explorar el área.

##### **3.1.2. Exploración:**

La exploración de un yacimiento generalmente se efectúa en dos etapas, exploración general y exploración detallada; su duración depende de las características y tamaño del proyecto, y varía desde varios meses a 2 o 3 años. La fase de exploración comprende: la exploración de superficie, la exploración del subsuelo, el modelamiento geológico del yacimiento, la evaluación de las reservas y su calidad, la identificación de potenciales proyectos mineros y la definición de la viabilidad minera del área.

### **3.1.3. Exploración General:**

Es la delimitación inicial de un yacimiento identificado, con evaluación preliminar de la cantidad y calidad. El objetivo es establecer las principales características geológicas del yacimiento proporcionando una indicación razonable de su continuidad y una primera evaluación de sus dimensiones, su configuración, su estructura y su contenido. El grado de exactitud deberá ser suficiente para decidir si se justifican posteriores estudios de previabilidad minera y una exploración detallada.

### **3.1.4. Exploración Detallada:**

Consiste en delimitar un yacimiento conocido, de forma detallada y en sus tres dimensiones, mediante el muestreo en varios puntos. La información obtenida permitirá decidir si debe procederse a un estudio de viabilidad minera.

La fase de exploración generalmente concluye con la presentación del Estudio de Factibilidad Minera, en el cual se recopila la información geológico-minera obtenida desde el reconocimiento hasta la exploración detallada, se modela el yacimiento, se diseña la explotación, se determina el volumen de reservas recuperables, se evalúa la calidad técnica y la viabilidad económica del proyecto de explotación minera.

Este estudio permite verificar todas las informaciones geológicas, técnicas, ambientales, jurídicas y económicas relativas al proyecto, lleva a la toma de decisiones en materia de inversiones y constituye un documento aceptable por los bancos para obtener la financiación del proyecto.

### **3.1.5. Desarrollo:**

Comprende el conjunto de actividades que permiten el acceso al yacimiento y el establecimiento de la infraestructura del proyecto. Incluye la adquisición de derechos y permisos para iniciar la explotación, el diseño detallado y construcción de las obras de infraestructura, el diseño y planeamiento detallado de la explotación, la compra de equipos y materiales, la preparación de presupuestos y la financiación del proyecto. Su duración también varía de acuerdo a las características y tamaño del proyecto, desde varios meses a 2 o 3 años.

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. Entre las obras de infraestructura se destacan aquellas dirigidas al control de las aguas de escorrentía; las vías de acceso al área de explotación; las redes para el suministro de energía, agua potable y evacuación de aguas residuales; las edificaciones para oficinas y talleres de mantenimiento, y las instalaciones superficiales para el manejo y acopio del carbón.

En proyectos donde los mantos afloran en superficie y las condiciones de la estructura geológica lo permite, las labores de desarrollo del yacimiento se confunden con las actividades de explotación.

### **3.1.6. Producción:**

Tiene como objetivo la extracción, preparación y/o beneficio, transporte y comercialización del mineral. Es la fase de mayor duración, generalmente entre 10 y 30 años, dependiendo del nivel de reservas, tipo de explotación y condiciones de la contratación.

### **3.1.7. Desmantelamiento:**

Durante esta fase tiene lugar la disminución gradual de la producción, la elaboración del plan de cierre de la mina, el retiro de los equipos mineros, la disposición de activos y excedentes, el cierre y restauración de las excavaciones mineras, y las actividades para la prevención y mitigación de los impactos ambientales pos cierre de la operación.

Tras finalizar la vida productiva de las explotaciones se pondrá en marcha el plan de desmantelamiento y clausura de las mismas. El plan incluye el desmantelamiento y demolición de las instalaciones que no cumplen ninguna función, el acondicionamiento de las bocaminas y tambores de ventilación, y la restauración de los depósitos de estériles, con miras a eliminar posibles fuentes de contaminación de las aguas, riesgos de accidentes, erosión de los terrenos, etc.

En esta fase terminal del proyecto se previene el drenaje de aguas superficiales o subterráneas contaminadas hacia los cauces naturales, se toman precauciones para hacer frente a los futuros hundimientos de terrenos en las zonas explotadas y se completa la restauración de las áreas intervenidas por la minería, al tiempo que se inician las labores de seguimiento y control propias de la fase pos operacional.

## **3.2. PLANIFICACIÓN DE LA MINERÍA**

Para una adecuada planeación de la mina es necesario elaborar diferentes posibles desarrollos, de acuerdo con los objetivos y alcance de los mismos:

### **3.2.1. Plan Minero Conceptual a Largo Plazo**

Identificado en el estudio de factibilidad para un período de 10 a 20 o más años; incorpora tanto las reservas medidas como las indicadas; esboza y asigna

prioridades a las zonas de extracción; identifica el programa de exploración adicional que se requiere para mantener el inventario de reservas; define la curva de producción, el equipo mayor de minería, la infraestructura y el estimativo de personal para la vida del proyecto. Este plan se actualiza cada 5 años o cada vez que se considere necesario por cambios substanciales en el diseño minero o en los parámetros económicos.

### **3.2.2. Plan Minero Detallado a Corto Plazo:**

Es un elemento integral del programa de operaciones y le permite al minero optimizar su explotación; comprende todos los detalles operacionales sobre la base de tiempo real; identifica los paneles mineros, su secuencia de extracción, los materiales requeridos, el personal de la mina y demás recursos relevantes; identifica los programas básicos para el desarrollo de la mina y las metas de producción. Es actualizado y mejorado según sus necesidades; en la mayoría de las explotaciones a nivel de mediana y gran minería se realiza anualmente siguiendo los delineamientos del plan a largo plazo, y en las pequeñas explotaciones de carbón se elabora generalmente para un período de 5 años y sobre los precios de venta del mineral y los gastos de la operación minera.

### **3.3. INFORME ANUAL DE EXPLOTACIÓN**

Es la documentación relativa al estado de desarrollo y de explotación del depósito, reporta la cantidad y calidad del mineral extraído, describe la situación actual del yacimiento, las condiciones que dieron lugar a cambios significativos en el diseño original, proporciona información detallada sobre las reservas y recursos que quedan.

### **3.4. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ACTIVIDAD**

### 3.4.1. Preparación del Yacimiento

Mediante actividades de exploración y análisis geológico se determina:

- La geología estructural del área: fallas, pliegues, y demás estructuras geológicas
- El modelo del yacimiento: forma, extensión, inclinación, número de mantos, espesores, etc.
- El volumen de reservas y la calidad del carbón in situ
- De acuerdo con la geomorfología del área donde están ubicados, los yacimientos pueden ser:
  - De llanura: localizados en áreas planas, como los de la Guajira y el Cesar
  - De montaña: localizados en los flancos de las montañas, como la gran mayoría de los yacimientos de las áreas carboníferas del interior del país
- De acuerdo con el número de mantos los yacimientos pueden ser:
  - Simples: un solo manto, horizontal o inclinado
- **MULTIMANTOS:** varios mantos, horizontales o inclinados, separados por estratos rocosos.
- De acuerdo con la inclinación de los mantos los yacimientos pueden ser:
  - Horizontales: cuando los mantos tienen inclinación  $< 25^\circ$ .
  - Inclinados: cuando los mantos tienen inclinación entre  $25^\circ$  y  $45^\circ$ .
  - Verticales: cuando los mantos tienen inclinación  $> 45^\circ$ .
- De acuerdo con las características del yacimiento, mediante actividades de diseño y planeamiento minero, se determina la preparación del yacimiento y su sistema de explotación.

La preparación consiste en construir el acceso al depósito y dividir el yacimiento en sectores y bloques de explotación. El acceso al yacimiento se realiza por uno de los siguientes medios:

- **Túneles o cruzadas horizontales:** construidas en roca sobre el flanco de una colina, atravesando perpendicularmente los estratos hasta interceptar el primer manto.
- **Pozos o galerías inclinadas:** generalmente construidas sobre el manto de carbón; algunas veces, según las condiciones del yacimiento, es necesario construir galerías parte en roca y parte en carbón.
- **Pozos verticales:** construidos en roca, atravesando los estratos hasta una profundidad determinada por condiciones técnico - económicas. Este tipo de acceso se usa en yacimientos donde los mantos se encuentran a gran profundidad.

En el país solo se utiliza para acceder al yacimiento los túneles y las galerías inclinadas.

#### **4. DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DEL CARBÓN**

Los métodos de extracción del carbón están determinados por las condiciones geológicas del yacimiento (tamaño, calidad, continuidad, geometría, inclinación, ubicación profundidad, competencia del mineral y las rocas adyacentes, etc.), por el valor del recurso, y por las restricciones ambientales y legales prevalecientes al momento del desarrollo del proyecto. Los sistemas de arranque y transporte, los procedimientos específicos para la extracción de los materiales y los equipos utilizados permiten distinguir diversos métodos de explotación.

Los métodos de explotación que pueden aplicarse a un yacimiento difieren según el buzamiento de los mantos. Como se mencionó anteriormente, Se distinguen:

- Horizontales: con buzamientos  $< 25^\circ$ .
- inclinados: con buzamientos entre  $25^\circ$  y  $45^\circ$ .
- Verticales: con buzamientos  $> 45^\circ$ .

Para cada una de estas pendientes se tienen dos categorías de métodos:

- Métodos de tajos.
- Métodos de frentes cortos.

En la pequeña y mediana minería subterránea del interior del país se distinguen principalmente, por sus dimensiones y características técnicas, cuatro sistemas de explotación:

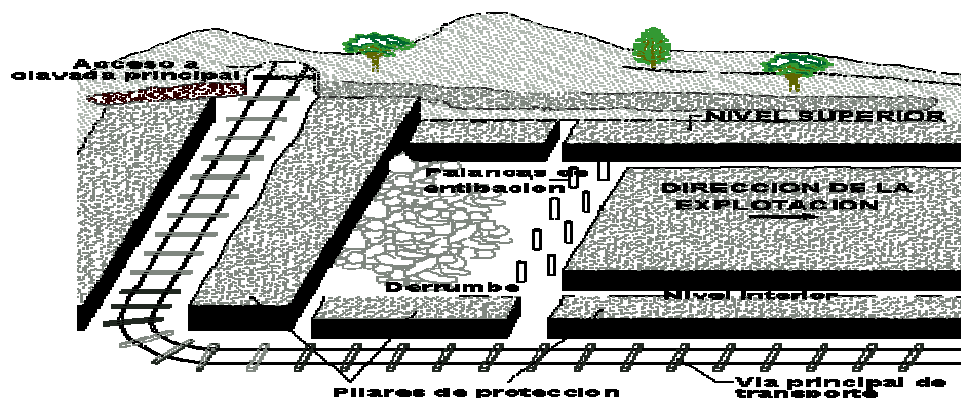
##### **4.1. TAJO LARGO.**

Es un sistema de explotación que se aplica en yacimientos horizontales, con espesores entre 1m y 2,5 m, desarrollando un sector, bloque o panel de explotación con un frente amplio y continuo, el cual se puede trabajar en avance o en retirada, presentándose derrumbe del techo en las áreas ya explotadas. El

panel es de gran longitud, cubriendo desde varios cientos de metros hasta unos 2 km y el ancho es mucho menor, variando entre unos 60 m y 200 m. Para su desarrollo se requiere la preparación de un bloque de carbón denominado panel de explotación, delimitado por dos vías, normalmente trazadas sobre el rumbo del manto, una inferior para el transporte del carbón y otra superior para el acceso y suministro de materiales; entre estas dos vías se construye otra vía normal a las dos anteriores y en el sentido del buzamiento del manto, cuya longitud es igual al ancho del panel y constituye el frente del tajo de explotación.

El panel, con desplazamiento continuo del frente y cuya forma se mantiene aproximadamente invariable durante la vida útil, es extraído de manera regular, en franjas con longitud igual al ancho del panel, altura igual al espesor del manto y profundidad de 1,0 – 1,5 m. La perforación y voladura con explosivos permite avanzar en la dirección del rumbo y el espacio que va quedando detrás del frente de explotación se llena normalmente con el derrumbe del techo o, en algunos casos, llenado con material estéril para equilibrar las presiones y aliviar los esfuerzos generados por la explotación. Para controlar el derrumbe se disponen de machones de protección en carbón y canastas de madera.

**Figura 2. Método de Tajo Largo**



**Fuente:** ECOCARBÓN Tomado y adaptado de Manual para el Control de los Factores de Degradación Ambiental en la Minería Subterránea del Carbón, Londoño, J. y Rada, M.,1995

## 4.2. CÁMARAS Y PILARES

Este método consiste en la extracción del mineral dejando pilares de carbón con el fin de sostener el techo. Las cámaras son aberturas que se construyen en forma múltiple y paralelamente, y cuando se conectan con aberturas transversales, se forman los pilares de protección que sirven de soporte natural en la explotación. Las cámaras se hacen tan anchas como la seguridad lo permita, cuya limitación depende de las características y propiedades de resistencia de las rocas del techo, del piso y del mismo carbón.

Los pilares, de sección circular o cuadrada, se disponen generalmente en forma rectangular, formando galerías perpendiculares entre sí como la malla vial de una ciudad con un patrón regular de calles y carreras, o bien pueden formar muros o franjas gruesas que soportan los frentes de explotación. La selección del tamaño del pilar depende de la resistencia del carbón, así como de las rocas del techo, de la presión ejercida por el terreno suprayacente y por los esfuerzos residuales que puedan existir en la explotación.

El carbón que queda en los pilares puede recuperarse parcialmente en la última fase de la explotación, pero se considera una actividad riesgosa si las explotaciones son muy superficiales o el hundimiento del techo afecta frentes adyacentes o estructuras en superficie.

Por su naturaleza, la extracción por cámaras y pilares se aplica idealmente en la explotación de yacimientos multimantos, con capas horizontales o con un buzamiento moderado (menor de 30°). Las cámaras, por razones de producción y recuperación del carbón, deberían ser de gran tamaño pero su dimensionamiento está limitado por la resistencia y composición de la roca del techo y por la presión ejercida por éste. Es posible compensar un techo deficiente o un mineral poco

resistente con dimensiones adecuadas de las cámaras de explotación y de los pilares, dejando gran parte del carbón para sostenimiento.

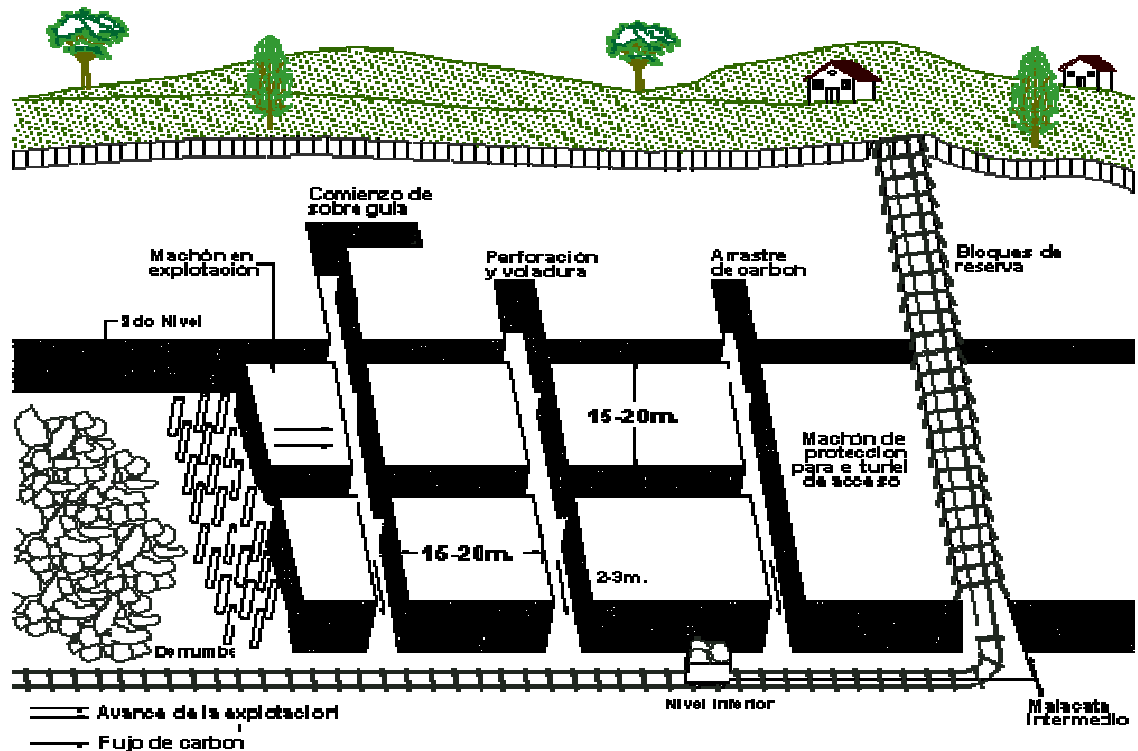
Para desarrollar el sistema se avanzan varias galerías subterráneas en el sentido del rumbo del manto y luego se construyen tambores o galerías inclinadas en el sentido del buzamiento del manto, que se interceptan entre sí con una separación variable de 10 a 15 m, o viceversa, dependiendo de la posición de las capas con respecto a la superficie.

El arranque del carbón se hace generalmente en forma manual, a pico y pala, o eventualmente con explosivos; se comienza en la parte superior de los tambores descendiendo hasta llegar a las galerías de transporte o niveles, dejando así, cámaras del mayor ancho posible.

El carbón se carga directamente en los niveles, desde la parte inferior de cada tambor, en vagonetas o coches para ser llevado a tolvas que se disponen en cada nivel y de allí se carga nuevamente el carbón en coches que son jalados por un malacate hasta el nivel de superficie. En la mayoría de los casos, las cámaras se sitúan perpendicularmente a las galerías principales, pero se pueden trazar en forma sesgada para que la pendiente sea favorable al transporte del mineral. En algunos casos el transporte se realiza por medio de rastrillos y, en otros, por medio de cargadores de llantas de poca altura diseñados especialmente para trabajar en espacios restringidos o de poca altura.

El proceso de explotación se puede realizar en avance o retirada. En la práctica se diferencian dos etapas: en la primera se forman las cámaras y pilares, y en la segunda, una vez desarrollada la explotación hasta sus límites de diseño, se hace la recuperación o barrido de los pilares, dejando solamente los pilares de borde de panel.

Figura 3. Método de Cámaras y Pilares



FUENTE: ECOCARBÓN Tomado y Adaptado de Manual para el Control de los Factores de Degradación Ambiental en la Minería Subterránea de Carbón, Calad et al, 1989

#### 4.3. ENSANCHE DE TAMBORES

Este método se aplica en yacimientos inclinados y verticales ( $20^\circ$  a  $70^\circ$ ), con espesores de manto entre 0,6 m y 2,5 m, mantos y respaldos resistentes de tal forma que permitan el arranque seguro del carbón. El rendimiento de la explotación es alto, aproximadamente de un 80%.

A partir de las cruzadas o inclinados principales de transporte se dimensionan bloques por medio de dos niveles separados unos 60 m y preparados mediante

tambores separados cada 80 m y la explotación se realiza en retroceso o en avance.

En una primera etapa se construyen tambores cada 20 m y sobreguías cada 20 m, a medida que progresa la preparación, se atacan los dos machones superiores bajo el nivel superior a partir del primer tambor para obtener dos frentes de arranque, cada tambor se ensancha unos 8 m en los dos costados hasta formar una cámara de 16 m de ancho por 18 m de longitud. Se crean simultáneamente varios frentes de arranque, la línea de corte avanza aproximadamente 1 m por turno y consecutivamente se van instalando líneas de tacos con cabecera espaciadas cada 1 m.

La línea del tajo está limitada en un costado por el frontón del carbón y en el otro costado por el espacio sostenido por tacos en madera, le sigue el otro frontón, luego el machón de protección y por último el derrumbe de la cámara anterior.

#### **4.4. ESCALONES INVERTIDOS:**

Este método solo se ha utilizado en las minas del Valle del Cauca y Cauca, y se emplea en yacimientos verticales, cuando los mantos de carbón presentan buzamientos muy altos, entre 50° y 90°, y espesores entre 0,4 m a 2 m. El rendimiento de la explotación es muy alto, mayor del 85%.

Este método se comienza con la construcción de una cruzada que atraviesa los estratos en forma perpendicular o en diagonal hasta cortar los mantos que se van a extraer posteriormente; otra forma de acceder al depósito es por medio de guías, clavadas o pozos.

Luego de construirse las cruzadas se inician unas guías de 2 m de altura por 1,5 m de ancho siguiendo el rumbo del manto de carbón. A partir de estas guías se

construyen los tambores o pozos inclinados sobre los mantos de carbón siguiendo la máxima pendiente del manto, con ancho de 2 m, 5,5 m de altura y por el espesor del manto, y a partir de estos tambores se construyen diagonales sobre las cuales se iniciará la explotación.

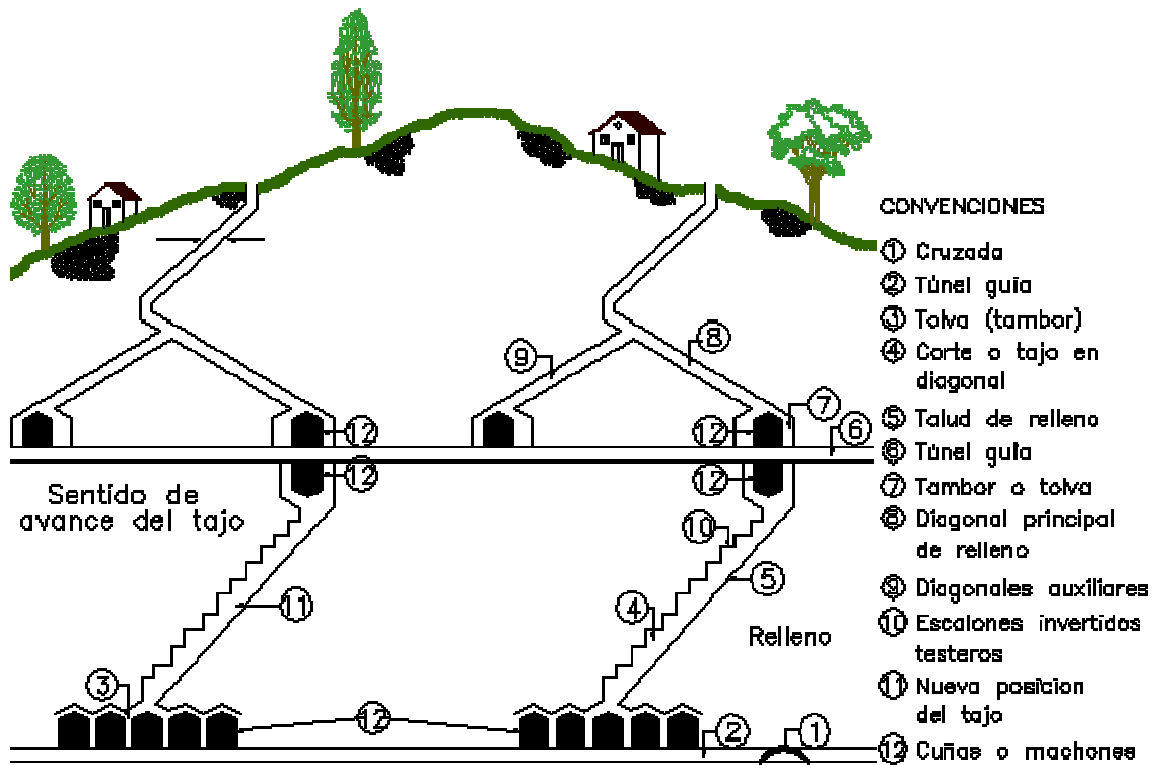
Sobre cada diagonal se trazan escalones invertidos de 5 m de altura por 4 m de base; por el tambor baja el carbón formándose una tolva natural, que luego será el punto inicial para rellenar el tambor con material estéril o se asegura con machones de protección. Los rellenos de estéril se hacen después de que el tajo ha avanzado un determinado número de metros evitando así que los esfuerzos aparezcan en el tajo y lo traten de cerrar. A medida que avanza el tajo de un nivel es necesario ir construyendo otras diagonales ubicadas en un nivel superior al anterior, que se comunicarán cuando se termina la explotación del nivel anterior.

El arranque del mineral se hace manualmente utilizando picos o martillos picadores. Por la disposición inclinada de los mantos de carbón, se facilita el cargue de éste por acción de la gravedad; el carbón se almacena en los tambores y por medio de teclas se facilita el cargue a los coches que lo llevan a superficie.

En este método algunas veces se utiliza el relleno con material estéril acarreado desde la superficie para controlar la convergencia que sufre el tajo a medida que avanza y se generan vacíos en la explotación. El arranque por este método tiene la ventaja de que el tajo se puede atacar en varios puntos al mismo tiempo para obtener más producción.

El grado de inclinación de los mantos permite el uso efectivo de la gravedad en las operaciones de cargue y transporte, pero presenta el inconveniente de que al caer el carbón al piso del relleno se fractura y se contamina con material de relleno, desmejorando su calidad. Igualmente al caer el carbón se genera gran cantidad de polvo y siempre existe un alto riesgo de accidentalidad para los trabajadores.

Figura 4. Método de Escalones Invertidos



FUENTE: ECOCARBÓN Tomado y Adaptado de Manual para el Control de los Factores de Degradación Ambiental en la Minería Subterránea de Carbón, Calad et al, 1989.

## 5. OPERACIONES UNITARIAS DE LA MINERÍA SUBTERRÁNEA

Las operaciones unitarias que se realizan durante la extracción del mineral son: arranque, cargue, sostenimiento, transporte y descargue. Enseguida se ofrece una breve descripción de cada una de ellas.

**Tabla 4.** Operaciones Unitarias de la Minería Subterránea

OPERACIÓN	DESCRIPCIÓN
ARRANQUE	<p>Se utilizan métodos como el barroteo, la perforación y voladura, y las máquinas cortadoras.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● El barroteo es un método manual en el que un trabajador extrae el carbón con la ayuda de un pico o barreta, con un rendimiento muy bajo y muy costoso.</li> <li>● Las perforaciones se realizan a 1m o 1.5 m, distribuidas de acuerdo con un patrón definido y se cargan los explosivos para detonarlos posteriormente con una secuencia predeterminada. De esta manera se arranca el carbón o se afloja para extraerlo con mayor facilidad.</li> <li>● El método de máquinas cortadoras no se utiliza en el país por los elevados costos de inversión pero es conveniente cuando se requiere mantener altos volúmenes de producción.</li> </ul>
CARGUE	Se efectúa manualmente con palas, o con máquinas cargo-transportadoras como la "Shuttle Car".
SOSTENIMIENTO	Tiene como propósito evitar que las excavaciones se derrumben o se cierren por efecto de las presiones internas del macizo rocoso. Se puede utilizar madera, para el entibamiento, o soportes mecánicos o hidráulicos.
TRANSPORTE	El transporte consiste en la movilización del mineral desde el frente de trabajo hasta la superficie para lo cual se emplean métodos manuales: cubetas empujadas, malacates o métodos más eficientes como pequeños trenes.
DESCARGUE	Una vez el carbón llega a superficie es necesario descargarlo, usualmente en una tolva acondicionada para transferirlo a las volquetas, o vehículos similares, que lo llevarán a su destino.

**Fuente:** GUIA AMBIENTAL MINERIA SUBTERRANEA DEL CARBON.

## **6. ZONA DE ESTUDIO**

### **6.1. DEPARTAMENTO DE BOYACA**

#### **6.1.1. Localización**

Se encuentra ubicado en el centro oriente del país, siendo Tunja su capital. Su creación data de la reforma constitucional de la Confederación Granadina del 22 de mayo de 1858.<sup>4</sup> Su territorio ocupa una superficie de 23.102 km<sup>2</sup>

El departamento de Boyacá está situado en el centro del país, en la cordillera oriental de los Andes; localizado entre los 04°39'10" y los 07°03'17" de latitud norte y los 71°57'49" y los 74°41'35" de longitud oeste. Cuenta con una superficie de 23.189 km<sup>2</sup> lo que representa el 2,03 % del territorio nacional. Limita por el norte con los departamentos de Santander y norte de Santander, por el este con los departamentos de Arauca, Casanare y con el país vecino de Venezuela, por el sur con Meta y Cundinamarca, y por el oeste con Cundinamarca y Antioquia.

En el territorio de Boyacá se presenta una diversidad de accidentes geográficos que forman las regiones fisionómicas del valle del río Magdalena, la cordillera Oriental, el Altiplano Cundiboyacense y el piedemonte de los llanos orientales.<sup>14</sup> Gracias a ello, en el departamento se presentan todos los pisos térmicos con temperaturas desde los 35 °C en Puerto Boyacá, hasta temperatura bajo cero grados, en la Sierra Nevada de Güicán y El Cocuy, las cuales presentan alturas de hasta 5.490 m y en el Páramo de Pisba con alturas de hasta 4.000 m.

En el centro del departamento hay un área hondonada bañada por el río Gacheneca conocida como el desierto de la Candelaria, ubicada siete kilómetros al nororiente de Ráquira y en la cual se destaca el monasterio agustino construido

en 1604.<sup>17</sup> Al occidente del departamento se ubica el Territorio Vásquez en el valle del Magdalena Medio que se caracteriza por presentar alturas inferiores a 500 msnm y por constituir una región rica en petróleo.

### **6.1.2. Hidrografía**

Boyacá es un Departamento rico en agua, sus tierras están surcadas por numerosos ríos que constituyen un gran potencial eléctrico para el Departamento y el país ejemplo de ello es la represa de Chivor ubicada en la provincia de Neira que tiene 22 kilómetros de longitud y cubre 1200 hectáreas, con un volumen de 815 millones de metros cúbicos de agua. Su construcción se inició en el año 1969 y finalizó en 1976 «con una inversión total de diez mil millones de pesos financiados por empresas nacionales, empréstitos concedidos por el Banco Interamericano de Reconstrucción y Fomento, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y algunos créditos de proveedores y bancos comerciales».

Los ríos que corren por el territorio boyacense conforman cinco cuencas hidrográficas que llevan sus aguas a cinco ríos importantes como son: el Magdalena, el Suárez, el Chicamocha, el Arauca, el Meta y además por las sub-cuencas de los ríos Guavio, Cravo Sur, Lengupá, Upía, Cusiana y Pauto.

### **6.1.3. Cuencas Hidrográficas**

El departamento de **Boyacá** cuenta con tres cuencas hidrográficas sobre los ríos Magdalena, Arauca y el Meta.



los departamentos de Tolima y Caldas. Por el oriente, también limita con el departamento de Casanare.

### **6.2.3. Fisiografía**

El territorio corresponde a la Cordillera Oriental que penetra por el sur formando el complejo de los páramos de Sumapaz y de Cruz Verde; en su parte media presenta la altiplanicie de la Sabana de Bogotá; y más al norte el valle de Ubaté y Simijaca. Los sectores planos y cálidos del departamento corresponden al valle del Magdalena y la parte de los Llanos Orientales.

### **6.2.4. Hidrografía**

Al occidente del departamento, el Río Magdalena emerge como el principal afluente fluvial del departamento, especialmente en el puerto de Girardot, donde se realizan actividades como navegación de contemplación y pesca artesanal. En otra época el puerto servía para el transporte de mercancía desde Barranquilla hacia Bogotá, y allí se embarcaba el café de exportación proveniente del centro del país.

Otro río muy importante es el Bogotá, que nace en el alto de la Calavera Villapinzón y desemboca en el Magdalena, luego de pasar por el Salto del Tequendama, sitio turístico por excelencia, ubicado a 30 km al suroeste de Bogotá, a 2.467 metros sobre el nivel del mar, con una caída de agua de aproximadamente 157 metros. No obstante, debido a la contaminación generada por curtiembres, industrias, basuras, y desechos humanos, el río Bogotá es considerado como uno de los más contaminados del mundo. También son relevantes los ríos Guavío y Humaca.

Por otra parte, el río Sumapaz nace en el páramo del mismo nombre, el más alto del mundo. Hace parte del Parque nacional natural Sumapaz, que se extiende al departamento del Meta.

Es de resaltar la presencia de las lagunas del Guatavita, Fúquene, Chisacá, Sibaté, Tominé, La Regadera, El Hato y las represas de Chingaza, Néusa, Sisga y el Guavio. Esta última, conocida como la Central Hidroeléctrica del Guavio es la represa más grande de Colombia. Está ubicada en el municipio de Gachalá y opera desde el 15 de diciembre de 1992. Junto a las represas anteriores sirven como principales abastecedores de agua potable para Bogotá.

Figura 6. Departamento de Cundinamarca



Fuente: SIGAC.

## **7. ASPECTOS AMBIENTALES**

### **7.1. DESCRIPCION DEL AMBITO MINERO**

La minería tiene por objetivo extraer recursos minerales de la tierra. La minería subterránea, por su parte, abarca todas las actividades encaminadas a extraer materias primas depositadas debajo de la tierra y transportarlas hasta la superficie. El acceso a los recursos se efectúa por galerías y pozos que están comunicados con la superficie. En el presente capítulo se examina únicamente la extracción subterránea de recursos minerales sólidos. Existen unos 70 minerales económicamente útiles, los cuales forman depósitos en la tierra, ya sea solos o en combinación con otros (intercrecimiento).

La minería subterránea abarca todas las labores destinadas a explotar materias primas por medios técnicos. Además de la extracción y el transporte, comprende las actividades de prospección y exploración, la dotación de infraestructura (conexión a la red vial, construcción de depósitos e instalaciones exteriores tales como oficinas administrativas, talleres, etc.), así como las medidas destinadas a garantizar la seguridad de los mineros. Las actividades mineras incluyen:

- Arranque
- Carga
- Extracción
- Ventilación
- Desagüe
- Entibación

Las excavaciones de cateo de escasa profundidad son comunes en muchos países y constituyen una técnica intermedia entre la minería subterránea y la minería a cielo abierto.

En casos especiales, la materia prima puede ser extraída y preparada para el transporte en su entorno natural, sin necesidad de realizar trabajos preliminares (por ejemplo, explotación de salinas, lixiviación in situ y gasificación de carbón in situ).

La minería subterránea crea espacios bajo tierra en los cuales trabajan seres humanos. Las condiciones de trabajo -incluidas la humedad ambiental, la temperatura del aire, la presencia de radiaciones nocivas o de gases explosivos, la presencia de agua, la formación de polvo y la emisión de ruido- dependen tanto del mineral como de la roca encajante, de la profundidad de la mina y del uso de maquinaria.

La ubicación de las explotaciones subterráneas depende siempre de la presencia de yacimientos de materias primas. La explotación subterránea se realiza en todas las zonas climáticas, tanto en lugares remotos como bajo grandes ciudades, en el fondo oceánico y en regiones montañosas. El volumen de extracción diario puede ser inferior a 1 tonelada o superar las 15.000 toneladas. La profundidad de extracción va desde unos cuantos metros hasta más de 4 kilómetros.

## **7.2. IMPACTO AMBIENTAL Y MEDIDAS DE PROTECCION**

La minería subterránea produce efectos ambientales en tres ámbitos distintos:

- En el depósito y las rocas adyacentes.
- En los espacios abiertos bajo tierra.
- En la superficie del terreno.

La planificación detallada de las operaciones y la selección acertada de los métodos y técnicas de extracción son un requisito indispensable para el aprovechamiento óptimo de los recursos y contribuyen a limitar los efectos ambientales.

### **7.3. EFECTOS SOBRE EL YACIMIENTO Y LAS ROCAS ADYACENTES**

#### **7.3.1. Explotación de Recursos**

El efecto ambiental más importante de la minería subterránea es la extracción de recursos naturales no renovables. Durante la extracción de materias primas se pierden recursos y se deterioran otras secciones del yacimiento. La mejor forma de contrarrestar estas consecuencias consiste en planificar cuidadosamente las operaciones de extracción, relleno con estéril, etc.

#### **7.3.2. Modificación de la Rocas Adyacentes**

La construcción del conjunto de galerías crea cavidades y causa tensiones y movimientos en la roca adyacente. Los efectos de la explotación sobre las rocas adyacentes incluyen:

- Hundimientos causados por la caída de rocas en los espacios excavados. Este proceso puede modificar incluso la superficie del terreno, provocando daños en edificios e instalaciones (daños mineros).
- Colapso de partes del techo de la mina (generalmente como resultado de una planificación deficiente de los trabajos de extracción).

#### **7.3.3. Alteración del Flujo de Aguas Subterráneas**

La construcción de galerías subterráneas desestabiliza el régimen de aguas en la roca, debido a la creación de nuevos conductos de agua. El desagüe de minas (bombeo) puede provocar un descenso considerable del nivel freático, lo cual, además de otros efectos, puede degradar seriamente la vegetación en la zona afectada.

#### **7.3.4. Deterioro de la Calidad de las Aguas Subterráneas**

La minería subterránea puede contaminar las aguas freáticas de diversas maneras. Las aguas de mina son una fuente importante de contaminación, al igual que las soluciones utilizadas en la lixiviación in situ y los refrigerantes que se escapan durante los trabajos de apertura de pozos y cuadros. Las aguas de superficie provenientes de la lixiviación de terrenos y de otras fuentes también pueden infiltrarse en las aguas subterráneas y alterar su calidad.

El sellado de suelos, pozos y secciones abandonadas del yacimiento constituye una medida de protección eficaz, junto con el desagüe y/o la canalización.

#### **7.4. EFECTOS AMBIENTALES BAJO TIERRA**

El hombre, las máquinas, las rocas y el clima actúan conjuntamente en el medio subterráneo. Dado que el hombre suele ser el más afectado por esta interacción, debe darse prioridad a las cuestiones relacionadas con la seguridad y la salud de los mineros.

##### **7.4.1. Aire**

El clima bajo tierra está determinado por la temperatura elevada de las rocas y por su contenido en gases y líquidos, así como por la actividad minera en sí.

##### **7.4.2. Ruido**

En la explotación minera subterránea, el ruido es producido por motores de combustión interna, de aire comprimido e hidráulicos, por equipos de perforación y voladuras, así como por los medios de transporte (trenes, vehículos, cintas transportadoras, etc.) y ventiladores.

El ruido generado por las máquinas puede reducirse parcialmente mediante un diseño adecuado de las mismas. Los dispositivos de protección auditiva son indispensables a partir de ciertos niveles de intensidad acústica.

#### **7.4.3. Polvo**

La contaminación con polvo (por ejemplo, polvo de roca en minas de carbón) debe limitarse a fin de minimizar la incidencia de enfermedades, de las cuales la más peligrosa es la silicosis causada por la inhalación de partículas de sílice. El polvo es producido por la destrucción mecánica de rocas al barrenar, detonar, machacar, cargar y descargar material, etc.

Los siguientes minerales producen polvos nocivos: asbesto, berilio, fluorita, minerales de níquel, cuarzo, mercurio, cinabrio, dióxido de titanio, óxidos de manganeso, compuestos de uranio y minerales de estaño. El asbesto pulverizado, el polvo respirable con contenido en minerales de níquel y berilio, así como el hollín de los motores diesel son cancerígenos. Las partículas ultra finas de carbón, por su parte, pueden provocar explosiones de polvo.

Las medidas preventivas destinadas a evitar este tipo de contaminación se basan en la fijación del polvo durante las perforaciones y el transporte. Para ello se recurre a la aspersión con agua o a la impregnación de los frentes de arranque a través de perforaciones practicadas antes de la extracción. El uso de mascarillas protectoras evita la inhalación de polvos. La instalación de filtros en los motores de combustión interna, por su parte, permite retener las partículas de hollín.

Tabla 5. Factores que influyen en el clima y el aire en la minería subterránea

FUENTE DE PELIGRO	CAUSAS	PELIGRO	MEDIDAS PREVENTIVAS
Deficiencia de oxígeno (O <sub>2</sub> )	Desplazamiento debido al enrarecimiento del aire (clima sofocante), grisú*, respiración, lámparas de llama abierta, incendios de mina	Fatiga, asfixia	Ventilación
Radiación	Componentes radiactivos de la roca, sondas de medición	Efectos nocivos de la radiación	Restricción de las horas de trabajo con control dosimétrico
Radón	Emisiones gaseosas de la roca	Efectos nocivos de la radiación	Ventilación, restricción de las horas de trabajo
Metano (CH <sub>4</sub> )	Emisiones gaseosas del carbón	Explosión	Extracción de gas, ventilación, instalación de dispositivos de seguridad en las máquinas para evitar explosiones de grisú
Polvo de carbón	Extracción y transporte del carbón	Explosión	Uso de técnicas de precipitación de polvo, prevención de explosiones de grisú
Monóxido de carbono (CO)	Gases de escape, emisiones gaseosas en minas de carbón de piedra paradas	Intoxicación	Ventilación
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Emisiones gaseosas en depósitos de sal, gases de escape, desprendimiento de gas de aguas termales	Asfixia	Ventilación
Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	Desprendimiento de gas en aguas de mina y termales	Intoxicación	Ventilación
Oxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) vapores de voladura	Voladuras	Intoxicación	Ventilación, restricción de voladuras a horas determinadas
Gases de escape	Motores de combustión interna	Intoxicación	Ventilación
Gases de fuegos latentes, humo	Incendios en galerías	Intoxicación	Apagado y contención del incendio, medidas preventivas
Aerosoles de aceite	Aparatos neumáticos	Intoxicación	Precipitación del aceite
Calor	Temperatura elevada de las rocas, calor emitido por motores	Fatiga	Ventilación, enfriamiento del aire

**Fuente:** ANALISIS AMBIENTAL DE LA MINERIA SUBTERRANEA.

Gas natural, consistente en metano casi puro, que se desprende de los yacimientos de carbón mineral, de esquistos bituminosos, de potasa, calizas bituminosas, etc.

#### 7.4.4. Aguas de Mina

Las actividades mineras alteran la calidad de las aguas de mina. Donde haya aguas agresivas, los mineros deben usar trajes de protección adecuados. La corrosión de equipos puede prevenirse utilizando materiales resistentes.

Tabla 6. Contaminación de aguas superficiales y de mina

TIPO DE CONTAMINACION	SUSTANCIAS CONTAMINANTES	MEDIDAS PREVENTIVAS
Modificación del Ph	-	Neutralización
Sustancias inorgánicas solubles	Metales pesados, sales, azufre	Precipitación
Sustancias inorgánicas insolubles (en suspensión)	Lodo	Aglomeración y sedimentación
Sustancias orgánicas	Aceite, grasa, lubricantes y emulsionantes	Precipitación en tanques de sedimentación
Calor	-	Enfriamiento, mezcla

**Fuente:** ANALISIS AMBIENTAL DE LA MINERIA SUBTERRANEA.

#### 7.5. EFECTOS AMBIENTALES EN LA SUPERFICIE DEL TERRENO

La comunicación entre las galerías y la superficie del terreno, la ventilación, el desagüe de minas, el transporte del material extraído así como la construcción de la infraestructura necesaria para la explotación minera producen efectos ambientales en la superficie del terreno. Además, se perciben en la superficie las vibraciones producidas por las voladuras y los movimientos de roca.

##### 7.5.1. Aire

En caso de no filtrar el aire de escape de los piques y cuadros, éste puede contaminar la atmósfera y producir daños, especialmente en la vegetación

circundante. El viento transporta polvo procedente de las operaciones de vertido y de las escombreras, produciendo una fuerte contaminación atmosférica.

La formación de polvo puede reducirse con técnicas apropiadas de aspersión durante el vertido, mediante la restauración inmediata de la cubierta vegetal (ya sea al finalizar la extracción o en fases intermedias de ésta) y mediante la construcción de terraplenes u otras barreras provistas de vegetación. En zonas áridas en las que no se pueden ejecutar dichas medidas, conviene prevenir los posibles daños restringiendo el uso del terreno en la dirección principal de los vientos.

Las minas de carbón desprenden grandes cantidades de metano ( $\text{CH}_4$ ), uno de los principales causantes del “efecto invernadero”. La mejor forma de controlar este gas en el foco de emisión consiste en efectuar perforaciones preliminares y aspirar el gas, el cual puede ser aprovechado posteriormente. Las partículas sólidas contenidas en el aire evacuado de las explotaciones subterráneas pueden eliminarse casi totalmente mediante filtros.

### **7.5.2. Agua**

Las aguas de mina pueden ser en menor o mayor grado ácidas (es decir, pueden tener un pH inferior a 5,5), especialmente si contienen minerales sulfurosos. No deben excederse las concentraciones límite legalmente establecidas de sulfatos, cloruros y metales.

Dichas concentraciones deben controlarse en el caso de que las aguas subterráneas se destinen al consumo humano o de que las aguas de mina se viertan en aguas superficiales. Conviene determinar ante todo qué aniones y cationes están presentes en el agua de la mina y cuáles de ellos constituyen un posible riesgo para la salud humana debido a su grado de concentración en el agua y/o a su toxicidad.

Es importante mencionar, además, que las escombreras de material extraído de explotaciones subterráneas pueden contener altas concentraciones de cloruros y de sulfatos. Esto debe tenerse en cuenta ante todo en las escombreras de sal en clima húmedo, donde las precipitaciones disuelven las sales acumuladas.

Al verter aguas de mina en aguas superficiales debe prevenirse la degradación de ecosistemas frágiles y la acumulación a largo plazo de contaminantes en el sedimento. Además, deben evitarse perjuicios para otras formas de aprovechamiento de las aguas (actividades pesqueras, por ejemplo).

Las aguas contaminadas acarreadas por los ríos hasta el mar contaminan las aguas marinas y producen alteraciones en el suelo oceánico, así como en las zonas de pesca y desove.

Por último, la minería subterránea consume agua para actividades de perforación, relleno, explotación y transporte hidráulico, etc.

### **7.5.3. Hundimientos**

Los daños más importantes ocasionados por la minería subterránea en la superficie del terreno son los hundimientos. Estos incluyen asentamientos, desniveles, curvaturas, deslizamientos, así como el estiramiento y la compresión de la superficie. Los mayores daños se presentan en instalaciones de infraestructura y edificaciones, así como en el medio ambiente natural. Los sistemas de conducción de agua (canales, ríos, etc.) son sumamente sensibles al más mínimo cambio en la inclinación del terreno; lo mismo ocurre, por ejemplo, con los arrozales en tierras anegadas.

Las medidas de protección empiezan con un ordenamiento territorial oportuno, el cual debe tener en cuenta las posibles consecuencias de los hundimientos causados por la minería.

El refuerzo y la entibación de galerías, el relleno con estéril de los espacios que quedan al arrancar el mineral y el uso de ciertas técnicas de extracción permiten evitar o reducir los hundimientos. Una extracción bien planificada y controlada favorece el hundimiento lento y parejo de superficies relativamente extensas, evitando daños a las construcciones y a las instalaciones de servicio público.

#### **7.6. TERREROS, USO DE SUPERFICIES, PAISAJE**

Las actividades mineras tienen como resultado la formación de escombreras en las inmediaciones de la mina, en las cuales se acumula el estéril proveniente del avance del tajo y de las galerías. Aunque el mayor riesgo de contaminación proviene de los montones de mineral a tratar, deben examinarse también las escombreras a fin de determinar en qué medida contienen residuos de metal. A menudo resulta sumamente difícil restaurar la vegetación en las escombreras, por lo que deben preverse medidas de recultivo desde un principio, es decir en la fase de planificación de las operaciones.

Las explotaciones subterráneas requieren áreas adicionales en la superficie del terreno para las instalaciones de infraestructura (equipos de extracción y transporte, edificaciones, talleres, depósitos, instalaciones de suministro de energía, conexión a la red vial). Las instalaciones exteriores constituyen un complejo industrial que altera el paisaje en las inmediaciones de las explotaciones mineras y cuyos efectos sólo pueden ser contrarrestados en parte por medidas arquitectónicas. Además, la construcción de instalaciones puede hacer necesario el reasentamiento de la población, en cuyo caso deben preverse indemnizaciones apropiadas para los grupos afectados.

El descenso del nivel freático repercute en la vegetación, pudiendo causar la desecación de ríos, lagos, etc. Asimismo, puede producir asentamientos del

terreno que afectan a las construcciones. Por otra parte, la modificación del régimen hídrico en muchos casos conlleva efectos negativos para la población y la fauna (por ejemplo, merma de las reservas de agua potable).

En algunos casos puede ser necesario recargar artificialmente los acuíferos a fin de conservar zonas húmedas.

Por último, se perciben en la superficie las vibraciones causadas por las voladuras y los movimientos tectónicos inducidos por la minería.

## **7.7. OTRAS CONSECUENCIAS DE LA MINERÍA SUBTERRÁNEA**

En zonas apartadas, la explotación minera y la consiguiente dotación de infraestructura pueden producir efectos indeseados, tales como el establecimiento de asentamientos y el uso incontrolado de la tierra. Para contrarrestar estos efectos, deben preverse medidas complementarias en la planificación.

El uso intensivo de madera para la entibación puede ocasionar la tala de árboles en gran escala, con la consecuente erosión de los suelos expuestos. La gestión de los recursos forestales y la plantación de árboles de crecimiento rápido en el entorno de las minas contribuyen a evitar este tipo de problemas. No obstante, la alteración permanente del ecosistema es un hecho inevitable. Las técnicas de anclaje y la entibación con elementos de acero reducen considerablemente el consumo de madera en las minas subterráneas.

En casi todo el mundo existen tradiciones y prejuicios culturales que impiden a las mujeres trabajar bajo tierra. Por consiguiente, en la mayoría de los casos, la minería subterránea genera empleo únicamente para la población masculina. A lo sumo, las mujeres encuentran empleo en el procesamiento y la comercialización de minerales o en servicios relacionados. El trabajo de menores en las minas

subterráneas no es admisible y debe abolirse. Otros problemas sociales relacionados con la minería surgen de la escasez de viviendas para los mineros y sus familias, de la infraestructura deficiente (agua, mercados, escuelas, etc.) y de la falta de un sistema de seguridad social.

## 8. IMPACTOS AMBIENTALES DE LA MINERIA EN COLOMBIA

### 8.1. IMPACTOS AMBIENTALES OCASIONADOS POR LA MINERÍA EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACA

En el departamento de Boyacá se vive un constante debate gracias a las consecuencias en los diferentes aspectos de las pretensiones del incremento del desarrollo minero en la región. Si bien es sabido en el departamento se ha venido desarrollando minería desde hace muchos años, siendo la esmeralda el mineral que le da el impulso a esta actividad en la historia regional, dominada por grupos familiares que obtuvieron su debido enriquecimiento sin traerle el apropiado desarrollo a la sociedad



Efluentes de minas de carbón. UN PERIODICO UNIVERSIDAD NACIONAL.  
Contaminación en arroyos del Municipio de Samacá. Fotos: Cortesía Sonia Carolina Pardo

Desde entonces se ha ido incrementando esta actividad de forma gradual pero letal para el medio ambiente, abarcando muchos otros minerales como el carbón (mineral de mayor explotación en la zona en este momento), el hierro, la caliza y la

propia esmeralda .En Boyacá se pueden encontrar empresas como MERCACOAL entidad explotadora de carbón a cielo abierto e IMBORBUR LTDA encargada de la extracción de la esmeralda a modo subterráneo.

Son muy notables los impactos generados en la región gracias a la minería subterránea, entre estos tenemos la contaminación auditiva sobre:

### **8.1.1. La Fauna Circundante:**

Debido al minado y transporte del mineral, destrucción de los ecosistemas adyacentes, contaminación de los efluentes y depósitos subterráneos de aguas, la desestabilización de los taludes, el desencaje de las rocas soportantes del subsuelo, movimiento de masas de suelos, influencia en la aceleración de los movimientos de placas en las fallas geológica, hundimiento de la superficie del suelo, entre otros impactos que se ocasionan por esta actividad y los estados geológicos del territorio.



Efluentes de minas de carbón. UN PERIODICO UNIVERSIDAD NACIONAL.  
Contaminación en arroyos del Municipio de Samacá. Fotos: Cortesía Sonia Carolina Pardo

Gracias al incremento en la extracción del carbón a cielo abierto, entre diciembre del 2010 y enero de este año, se generó la muerte de aproximadamente 95.000 truchas de la Piscícola Tasco, a causa de la contaminación de las aguas donde se abastecen las crías de peces, en las cuales son descargadas una gran cantidad de aguas industriales y residuales de las minas

### **8.1.2. Murete de Truchas por Minería de Carbón.**

Otro impacto de vital importancia sucede al momento de conocerse la información de la presencia de carbón en los páramos del departamento, originándose la idea descomunal de permitir la minería en los páramos de Boyacá, desde ese entonces se ha incrementado la minería ilegal en esta zona, además de la inclusión de la minería legal que ha sido permitida por las autoridades competentes, acciones que han devastado aproximadamente el 30% de los páramos del departamento.

### **8.1.3. Paramos de Boyacá.**

El gobierno nacional no hace mucho frente a esta situación ambiental, haciendo presencia con su apoyo a la actividad minera, al momento de legitimar leyes que le permitan modificar y estructurar nuevamente la delimitación de zona deparamos, para beneficio de los grandes inversionistas que pretenden desarrollar minería a gran escala en estos ecosistemas, lo que ha permitido la destrucción de las fuentes más importantes para la formación del agua.

Toda esta situación de interés productivo ha llevado a los inversionistas locales a incurrir en acciones que atentan contra el medio ambiente, sin medir las consecuencias de sus ambiciones, lo que lleva a reflexionar en la necesidad de controlar las actividades que pongan en riesgo nuestro ambiente, para evitar daños irremediables en la región. Esta problemática lleva a realizar un balance y

estimar si el desarrollo industrial justifica el daño a la fuente de vida más importante de cualquier ecosistema, como lo es el agua, a causa de un enriquecimiento de un sector minoritario y que a fin de cuentas no trae el desarrollo proyectado en la región.

## **8.2. IMPACTOS AMBIENTALES OCASIONADOS POR LA MINERIA EN EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA**

El departamento de Cundinamarca se caracteriza por ser un departamento altamente productivo debido a la explotación de recursos naturales, especialmente la extracción de hierro, azufre, esmeraldas, carbón especialmente carbón bituminoso, sólido relativamente duro, de color negro que contiene betún de mejor calidad que el lignito pero peor que la antracita.

La explotación de carbón bituminoso se ha convertido en una de las actividades mineras, generadoras de mayor impacto al medio ambiente (alteración del relieve y del entorno paisajístico, cambios de uso y deterioro del suelo y del subsuelo, afectación en la red de drenaje, detrimento de la calidad de las corrientes por aporte de sustancias tóxicas como mercurio y cianuro en la minería de oro) así como causa principal de la muerte de gran cantidad de mineros. La creciente demanda de carbón bituminoso en el departamento, obliga la extracción del mineral en su mayoría de minas subterráneas, actividad que aporta altos índices de contaminación al medio ambiente en su mayoría por el inadecuado manejo de aguas de superficie provenientes de la lixiviación de terreros, acumulación de gases que pueden provocar explosiones, ruido, polvo, etc.

### **8.2.1. Extracción Artesanal de Carbón en Minas Subterráneas**

La extracción del agua del nivel freático por medio del bombeo disminuye gradualmente su nivel, afectando de manera directa la vegetación en la zona y sus

alrededores. La comunicación entre las galerías y la superficie del terreno, la ventilación, el desagüe de minas, el transporte del material extraído así como la construcción de la infraestructura necesaria para la explotación minera producen efectos ambientales en la superficie del terreno. Además, se perciben en la superficie las vibraciones producidas por las voladuras y los movimientos de roca, entre otros. El desarrollo industrial del departamento obliga a extraer materiales para la construcción principalmente gravas, arenas, arcillas, calizas, arenas silíceas, feldespato, grafito, asbesto, barita, talco, asfaltitas, fluorita, micas, diatomitas, calcita, dolomita, mármol, rocas ornamentales etc.

Su explotación y comercialización generan impactos negativos al medio ambiente sobresaliendo las emisiones de gases contaminantes, polución en el aire, inestabilidad en las masas de suelo, entre otros.

Por otra parte la explotación de arcillas, arenas y caolines fundamentalmente requiere que algunas empresas mineras exploten y comercialicen estos minerales. La extracción, lavado, distribución y transporte contamina de manera paulatina el medio ambiente manifestándose de alguna manera en la creciente deforestación, contaminación de cauces en los ríos, dispersión de partículas en el aire, así como emisión de grandes cantidades de gases tóxicos y contaminantes a la atmosfera.

La minería en gran escala o pequeña escala es una actividad que genera impactos negativos al medio ambiente. En la mayor parte del departamento de Cundinamarca, la minería poco tecnificada y de subsistencia, falta de seguridad industrial, y el escaso aporte de las empresas mineras para el restablecimiento de la biodiversidad, son variables que afectan directa e indirectamente el equilibrio biológico del medio y por consiguiente en un futuro suelen presentar consecuencias lamentables.



Efluentes de minas de carbón. UN PERIODICO UNIVERSIDAD NACIONAL. Fotos: Cortesía Sonia Carolina Pardo

De acuerdo con lo anteriormente planteado, es preciso señalar que en el departamento de Cundinamarca prevalecen un sin número de empresas en su mayoría ilegales dedicadas a la extracción minerales como carbón, yeso, caliza, gravas arcillas, entre otros y la explotación de algunos minerales metálicos como cobre y hierro principalmente. Algunas empresas mineras legalmente constituidas cuenta con tecnología y maquinaria necesaria para la extracción de minerales, por consiguiente estas, generan un mayor impacto ambiental y alteración del equilibrio ambiental del medio, sumado a esto el crecimiento excesivo de la población, desarrollo industria, inexistencias de medidas ambientales implica una contaminación inminente con consecuencia severas a futuro.

## **9. IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES**

### **9.1. IMPACTOS SOBRE EL MEDIO BIOFISICO**

#### **9.1.1. Impactos Sobre la Atmósfera**

Los gases que migran de una excavación subterránea hacia la atmósfera provienen fundamentalmente de la liberación debida a la descompresión de la roca, y en algunos casos a los gases producto de las voladuras. Estas concentraciones de gases pueden ser letales dentro del ambiente confinado de la mina, sin embargo no alcanzan a alterar, la composición de la atmósfera superficial, ni presentan incidencia alguna en los cambios climáticos.

En la superficie se pueden presentar emisiones de partículas generadas por la manipulación del carbón o por la acción del viento sobre las pilas de materiales acumulados; estas emisiones son muy localizadas y discontinuas, y se presentan en niveles muy bajos de emisión

#### **9.1.2. Impactos Sobre el Agua**

Los principales impactos sobre el medio hídrico generados por la MSC se reflejan en contaminación química de las aguas, incrementos de turbidez, aportes importantes de sólidos en suspensión y disueltos, alteración del curso de los cauces y la variación de los niveles freáticos.

Los mantos carboníferos del Valle del Cauca, Boyacá y Cundinamarca presentan zonas con altos contenidos de azufre, generando descargas ácidas, que deben corregirse antes de ser vertidas. A continuación se muestra un resumen de las principales características de las aguas residuales de minería en Colombia.

**Tabla 7.** Principales características fisicoquímicas de las aguas residuales de minería en Colombia

REGIÓN	NO. MINAS	VALORES PROMEDIO MEDIDOS				
		PH	SÓLIDOS DISUELTOS	SÓLIDOS SUSPENDIDOS	HIERRO	SULFATOS
			(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Cundinamarca	25	5,02	953.22	8,00	14,00	215,08
Boyacá	8	3,51	1,362.50	ND.	ND.	ND.
N/Santander	8	6,44	950.00	ND.	ND.	ND.
Antioquia	5	8,42	1,363.20	151,20	7,92	35,51
Valle	54	4,23	2,426.13	556,55	187,10	1,670,74
Total	100					
Promedio Ponderado		4,76	1,801.58	369,16	124,92	1,140,17

**Fuente:** Ecocarbón, Control de Contaminación del Agua en la Pequeña Minería Subterránea del Carbón, Álvaro Orozco Asociados, Febrero 1995.

Es muy común que las bocaminas de la MSC se localicen en los puntos más bajos del terreno con el fin de lograr las mayores coberturas de excavación, esto hace que los botaderos de estéril queden ubicados en zonas bajas donde generalmente están ubicados drenajes naturales o cauces de agua, obstruyéndolos, y constituyéndose en riesgos potenciales por avenidas de crecientes en los cauces obstruidos, y en fuente permanente de aporte de sedimentos a las corrientes de aguas con todos los perjuicios ambientales que ello implica.

Las aguas residuales domésticas aportan a los cuerpos de agua vertimientos con contenidos de materia orgánica y bacterias, siendo más importantes mientras más personas estén vinculadas a la actividad minera.

### **9.1.3. Impactos Sobre el Suelo**

Las explotaciones subterráneas a poca profundidad (menores de 30m), sin soporte adecuado generan hundimientos del terreno que alteran abruptamente la topografía, en cambio las excavaciones profundas causan hundimientos lentos y de contorno suave denominados subsidencia; estos hundimientos pueden causar daños a las obras civiles y edificaciones.

El área afectada por hundimientos y los daños producidos a las edificaciones por efecto de la subsidencia son dos impactos que deben ser tenidos en cuenta en la evaluación ambiental de la MSC.

En la mayoría de las zonas carboníferas colombianas, los suelos son de carácter arcillo arenosos, semiáridos, la cobertura vegetal es muy pobre, poco densa, esto facilita la acción de las aguas de escorrentía generando erosión en el terreno, este efecto no está directamente relacionado con las actividades de la MSC, sin embargo las empresas mineras pueden hacer campañas de repoblación y densificación de las áreas expuestas a la erosión como actividad compensatoria. La erosión que se presenta sobre los botaderos de estéril cuando no existen obras de control, si está relacionada directamente con la MSC y debe ser incluida dentro de su evaluación ambiental.

### **9.1.4. Impactos Sobre la Vegetación**

Existen dos formas de afectación de la vegetación por parte de la MSC; la primera está relacionada con su intervención directa para abrir paso a las obras de infraestructura que requeridas para construcción de vías, campamentos, patios de acopio y botaderos de estéril, la segunda está relacionada con la intervención de zonas boscosas productoras de las palancas de madera empleadas en la mayoría de las minas en las labores de sostenimiento, siendo esta última la que más área deforestada genera.

### **9.1.5. Impactos Sobre la Fauna**

La MSC impacta indirectamente la fauna acuática y terrestre de las regiones carboníferas. Las descargas de aguas ácidas y con alto contenido de sólidos al ser vertidas sin tratamiento afectan la fauna que habita en los cuerpos de agua que reciben esas descargas; de igual forma la deforestación que se realiza para obtener la madera necesaria para las labores de sostenimiento de la mina, reduce la disponibilidad del hábitat a las especies terrestres que habitan en dichas zonas. El impacto sobre la fauna puede ser tratado directamente en la evaluación de la MSC o puede ser derivado de los impactos generados por el vertimiento de aguas y la deforestación, como una consecuencia de ellos. Como una primera aproximación, en esta Guía, se va a realizar su evaluación derivándola de los impactos antes mencionados.

### **9.1.6. Impactos Sobre el Paisaje**

El impacto sobre el paisaje es evidente en la MSC, especialmente en aquellas zonas donde hay alta concentración de minas, que ofrecen a la vista infraestructura en mal estado de conservación y una disposición desordenada de materiales.

En zonas donde la vegetación es pobre, la discontinuidad en el paisaje debida a las obras de la MSC, se hace más evidente, pues ofrece un campo visual más extenso. El impacto sobre el paisaje está bien definido dentro de la MSC y por lo tanto debe ser objeto de evaluación.

## **9.2. IMPACTOS SOBRE EL MEDIO SOCIAL**

### **9.2.1. IMPACTOS ECONÓMICOS**

Las zonas en donde se desarrolla la MSC en Colombia tienen un gran tradición minera, sin embargo la capacitación y el nivel empresarial en general es deficiente, esta situación está cambiando gracias a las acciones adelantadas por Ecocarbón y el Ministerio de Minas.

La falta de infraestructura para llevar la producción hacia los puertos para exportación ha limitado a este tipo de minería al abastecimiento del mercado interno del carbón, el cual ha crecido en un ritmo muy bajo del 2,1% anual en los últimos 15 años.

El consumo interno lo representan por 35 empresas que consumen el 85% de la producción, las cuales tienen poder para imponer los precios y plazos de pago; esto se ve favorecido por la imposibilidad de los mineros para cambiar de actividad pues las zonas donde se encuentran los recursos carboníferos no aptas para la agricultura o ganadería a gran escala, debido a la erosividad de los suelos y a la pobre capa orgánica que poseen los terrenos, lo que obliga a los habitantes de las zonas carboníferas a permanecer en la minería para subsistir.

La MSC se ha destacado por ser intensiva en el uso de la mano de obra, ofreciendo gran cantidad de empleos, en especial a personas con bajo nivel de capacitación; sin embargo el nivel de ingresos por trabajador es muy bajo, de aquí se derivan muchos otros problemas de tipo social que caracterizan a la MSC, es por esto que este par de factores deben ser tenidos en cuenta en la evaluación de impactos ambientales de la MSC.

Desde el punto de vista económico es importante destacar el aporte que por regalías hace la minería del carbón a la nación, parte de las cual se retribuyen a los municipios. Sin embargo dado el bajo nivel de producción de la mayoría de las minas sus aportes son pequeños comparados con los de los que hacen los grandes proyectos mineros.

### 9.2.2. Impactos Sociales

Desde el punto de vista social la MSC genera expectativas en la población, demanda de servicios públicos, demanda de servicios de salud, cambios en las costumbres y sistemas productivos, procesos de migración, aumento de riesgos a la salud, demanda de capacitación, demanda de equipos de seguridad y protección minera.

A continuación se hace un resumen de los principales problemas sociales identificados en Boyacá y Cundinamarca por ser regiones carboníferas del país en donde se desarrolla la MSC.

**Tabla 8.** Principales problemas sociales de la MSC en Colombia

REGIÓN	PROBLEMA
<b>CUNDINAMARCA</b>	
Tausa / Sutatausa	Deficientes condiciones de seguridad social y laboral.
Cucunuba / Lenguazaque	Bajos niveles de bienestar social
	Escasos ingresos y beneficios derivados de la actividad minera. Inexistencia de una lógica empresarial. Heterogeneidad en la composición de la población minera.
<b>BOYACA</b>	
Sogamoso / Nobsa	Deficientes condiciones de seguridad social y laboral.
Paz de Río Bateitiva	Bajos niveles de bienestar social. Escasos ingresos y beneficios derivados de la actividad minera. Inexistencia de una lógica empresarial. Heterogeneidad en la composición de la población minera.

**Fuente:** Ecocarbón, "Manual para el control de los factores de degradación ambiental en la minería subterránea del carbón", Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Febrero de 1997.

Del análisis del cuadro anterior se destaca que en general la calidad de vida de los pobladores de las zonas carboníferas está seriamente afectada, y que los bajos niveles de capacitación, especialmente empresarial, no han permitido a los mineros mejorar sus condiciones sociales.

## **10. MATRIZ DE IMPACTOS AMBIENTALES EN LA MSC.**

En el Anexo N° C muestra un cuadro resumen con los principales impactos identificados en la MSC y se hace una primera evaluación de su magnitud.

De igual forma en el Anexo N° C se muestra la matriz de evaluación de impactos propuesta para la MSC, en la cual solo se han considerado para los impactos más importantes, es decir aquellos identificados como de magnitud alta y media. La evaluación de impactos se realizó dentro del marco del Sistema de Gestión Ambiental y con ayuda de indicadores de impacto ambiental.

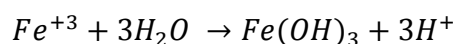
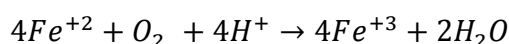
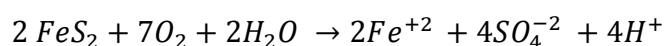
## 11. CONTAMINACION DEL AGUA DEBIDO A LA ACTIVIDAD MINERA

Los drenajes ácidos de mina son considerados como uno de los contaminantes más problemáticos sobre los afluentes naturales de agua, estos drenajes se caracterizan por su acidez, alto contenido de sales disueltas en su mayoría sulfatos y elevadas concentraciones de metales pesados como el Hierro, Aluminio, Manganeso y Zinc.

Dependiendo del territorio donde se ubican las minas de carbón los DAM presentan ciertas concentraciones de sustancias toxicas, entre ellos metales como el cobre, níquel, cromo, plomo y arsénico los cuales son perjudiciales cuando llegan a efluentes hídricos sin tratamiento reflejando una baja sensible en la calidad del agua así como un impacto negativo en el suelo.

El ciclo comienza cuando las rocas mineralizadas se exponen a la acción del aire y agua ocasionando un proceso complejo que lleva al desarrollo de fenómenos físicos y químicos, estos procesos se pueden resumir en los siguientes:

- **Oxidación:** llevan a la transformación de sulfuros en sulfatos con producción de ácido. Se ha evidenciado que estas oxidaciones son catalizadas por bacterias como *Thiobacillus Ferroxidans* las reacciones químicas que se llevan a cabo son las siguientes:



- Existen además reacciones químicas secundarias entre los productos de las reacciones químicas anteriores y los demás minerales presentes en la roca, estos al permanecer en medio ácido se disuelven, los metales

presentes son: Plomo, zinc, cobre, arsénico, mercurio, cadmio, aluminio, manganeso.

Cada fase mineral se solubiliza y cada metal precipita dependiendo del pH de la solución sin embargo la precipitación de las fases minerales asociadas a los metales tanto en soluciones naturales como en sistemas de tratamiento es un proceso complejo y lento que depende de una serie de factores ambientales como temperatura, fuerza iónica, condiciones redox, actividades de los iones como el azufre.

En el ambiente se presentan diversos minerales del grupo de los sulfuros (Pirita, Marcasita, Pirrotina, Galena, Esfalerita, Calcosita, etc. De ellos los más comunes son los sulfuros de hierro los cuales son los más susceptibles a formar el DAM; sin embargo todos los sulfuros de una u otra forma tienen el potencial de generación de agua muy ácida por la oxidación de los sulfuros.

Los componentes básicos para la generación del DAM son la presencia de sulfuros, agua y oxígeno, sin embargo en la mayoría de los casos las bacterias como la *Acidithiobacillus ferroxidans* juega un papel fundamental en la generación del DAM ya que aceleran la generación de ácido por lo que la inhibición de la actividad bacteriana puede bajar el ritmo de generación del drenaje.

Entre los numerosos problemas ambientales que produce el DAM algunos de los más relevantes son:

- Asfixia de los organismos bentónicos por precipitación de oxi - hidróxidos de ion férrico.
- Daño en los ecosistemas y organismos por toxicidad asociada a la acidez de las aguas, salinidad y concentraciones elevadas de los metales solubles que son ingeridos por planta y animales acuáticos.
- Estrés en el ecosistema por los bajos valores de pH.

La generación del DAM comienza con la oxidación de sulfuros en esta etapa la acidez generada es rápidamente neutralizada cuando la roca que tiene minerales sulfurados, se expone al agua y oxígeno, mientras se produce la oxidación de los minerales sulfurados existe suficiente alcalinidad disponible como para neutralizar la acidez y precipitar el hierro en forma de hidróxido con producción elevada de sulfatos y acidez. En esta etapa la oxidación química del ion ferroso es rápida a un pH superior a 7 y el ion férrico se precipita de la solución como hidróxido, también el agua de drenaje posee elevados niveles de sulfatos con pH cercano a 7, si existen minerales de Zinc asociados con los sulfuros de hierro también podría detectarse concentraciones elevadas de Zinc en la solución de salida.

En la siguiente etapa de generación del DAM a medida que se continua generando ácido y se agotan los minerales carbonatados el pH del agua disminuye hasta 4,5 ocurren reacciones de oxidación tanto químicas como biológicas, a medida que la velocidad de generación de ácido aumenta el pH disminuye aunque en algún momento pueda presentarse nivel de pH relativamente constantes esto se debe a la disolución instantánea de un mineral neutralizante que se vuelve soluble a esos niveles de pH.

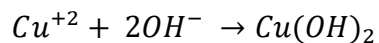
En la tercera etapa a medida que los minerales alcalinos se consumen y se agotan la acidez se produce a una velocidad mayor que la alcalinidad esto hace que el pH se vuelva más ácido, las reacciones dominantes se transforman de oxidación química a oxidación biológica catalizada en consecuencia el hierro ferroso que se produce se oxida biológicamente y se convierte en hierro férrico que a su vez reemplaza al oxígeno como el oxidante principal.

## **11.1. PROCESOS USADOS PARA EL TRATAMIENTO DE DAM**

### **11.1.1. Proceso Físico Químico**

El proceso para tratar DAM por métodos químicos denominados comúnmente como tratamientos convencionales, consisten en agregar sustancias alcalinas que neutralizan los compuestos ácidos formados permitiendo así la precipitación de compuestos; los productos más utilizados en dicha neutralización son: Piedra Caliza, Cal Hidratada, Carbonato de Sodio, La Soda Caustica, el Amoniaco, Peróxido de Calcio y las cenizas de horno.

La disolución de estas sustancias aumenta el pH del medio y desencadena la precipitación de los metales en forma de hidróxido, como ejemplo se podría observar la precipitación del cobre:



Los principales metales presentes en las aguas de drenaje son principalmente el Hierro, Aluminio y Manganeso adicional a estos la presencia de trazas de metales pesados le dan un carácter de toxico al agua, la precipitación de los metales no es inmediata una vez se introduce la solución alcalina se debe exceder un valor mínimo de potencial de hidrogeno para que la precipitación del metal sea segura. Por ejemplo los pHs a los que precipitan algunos de los metales son, para el caso del hierro este precipita en pH 3, el aluminio se encuentra en un rango entre 3,7 y 4,5 el Níquel a pH 8 precipitaría y el Zinc a pH mayor de 9.

### **11.1.2. Tratamiento Convencional**

Es Posible usar piedra caliza como agente neutralizante aunque es un reactivo de bajo costo y la aplicación produce un volumen menor de lodos no es recomendable su uso para como neutralizante ya que el dióxido de carbono interfiere directamente y no permite que el pH se eleve por encima de 6.

Uno de los métodos más usados para las neutralizaciones de los DAM es hacerlas pasar a través de un lecho de piedra caliza, este proceso presenta grandes

desventajas ya que el lecho tiende a cubrirse rápidamente de hierro y sulfato de calcio lo que reduce sustantivamente el área de reacción del lecho. Es posible también combinar el lecho de piedra caliza con adición de cal esta combinación produce mejores resultados.

La precipitación de los metales se realiza usualmente en tanques y es acelerada por adición de floculantes que permiten la sedimentación hasta en un 7 % de los lodos para el caso de floculantes comunes, para el caso de floculantes modernos en procesos de alta densidad es posible precipitar hasta el 30 % de los lodos.

Para el caso de la adición de cal hidratada a las aguas de drenaje, se realiza con la adición de cal en forma seca o humedecida a tanques de mezcla en donde para aguas con concentraciones menores a 50 ppm de ión ferroso el tratamiento se realiza a pH menor a 8, si la concentración del ion ferroso es mayor a 520 ppm el pH debe ser mayor a 9 para que se dé la precipitación, una vez hecho esto el agua pasa a un tanque de aireación donde el precipitado de hidróxido ferroso se convierte en hidróxido férrico este último se retira en una cámara de sedimentación en donde es posible hacer el retiro manual de los lodos .

Estos lodos deben ser manipulados correctamente ya que podría darse el caso de que los metales atrapados puedan re disolverse y generar de nuevo un impacto en el ambiente, este método de neutralización con cal ha sido ampliamente usado ya que es un método simple y robusto pero genera una serie de problemas ambientales tales como :

- Los lodos son residuos especiales de costoso tratamiento y disposición.
- A medida que aumenta la cantidad de agua en los lodos es necesario disponer mayor volumen de residuos especiales.
- Para reducir el volumen de lodos el proceso de secado consume gran cantidad de energía o de tiempo.
- El lodo es químicamente complejo.

### 11.1.3. Electrocoagulación

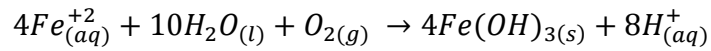
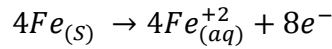
En la actualidad existen procesos más eficientes tanto en remoción de acidez como minimizando los impactos al medio ambiente, uno de estos procesos es la electrocoagulación la cual tiene sus raíces en la coagulación convencional consiste en adicionar cationes metálicos a las aguas a tratar los cuales se generan in situ como consecuencia de la aplicación de corriente eléctrica al agua se realiza por etapas que se describen a continuación:

- **Formación de coagulantes:** inicialmente se da la corrosión del metal producto del paso de corriente eléctrica por el sistema, a continuación el metal se desprende en forma de cationes desde la superficie del ánodo de sacrificio mientras que en la superficie del cátodo se puede dar la hidrólisis del agua obteniendo como producto iones hidroxilo e hidrógeno gaseoso. Los iones hidroxilos reaccionan para formar complejos metálicos.
- **Desestabilización de Partículas Suspendidas:** Las partículas coloidales se desestabilizan debido a la compresión de la doble capa difusa, esto se da por la interacción de las partículas con los complejos metálicos estos últimos favorecen la neutralización de cargas presentes y la repulsión electrostática entre los coloides.
- **Coagulación de las fases desestabilizadas:** Se forman redes que atrapan las partículas coloidales desestabilizadas.

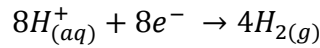
Las reacciones químicas que se involucran en este proceso se dan dependiendo de las características del drenaje ácido por ejemplo los mecanismos relacionados para el caso de la remoción de los iones de hierro es la siguiente:

- **Formación del Hidróxido Férrico**

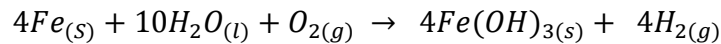
Para el Ánodo:



Para el Cátodo:

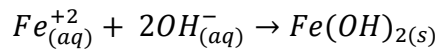
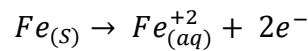


La reacción global es:

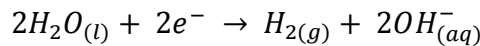


- **Formación del Hidróxido Ferroso**

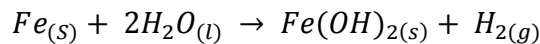
Para el Ánodo



Para el Cátodo



La reacción Global es:



Debido a la formación de los anteriores sustancias estas proporcionan superficies activas que permiten a los coloides aglomerarse y posteriormente ser retirados logrando así la descontaminación de sustancias acidas presentes en los drenajes. También es posible que se den otras reacciones químicas las cuales ayudarían a: Reducir el contenido de cationes presentes en el agua así como la electro flotación de las partículas coaguladas por burbujas de hidrogeno y oxigeno generadas.

#### 11.1.4. Proceso Biológico

Dentro de la gran gama de procesos tanto biológicos como microbiológicos para mitigar el impacto que las DAM aportan a las fuentes hídricas es posible

considerar para el alcance de este trabajo: la biolixiviación, La bioadsorción, La bioacumulación y la oxidación y reducciones biológicas. Lo que se busca al implementar este tipo de técnicas es propiciar el crecimiento de los microorganismos en los DAM para degradar o extraerlos mediante las actividades metabólicas de dichos microorganismos para lograr esto se le deben suministrar las condiciones adecuadas su óptimo desarrollo tales como : nutrientes, humedad, pH y temperatura. Este proceso se realiza gracias a que los microorganismos consumen los contaminantes como fuente de carbono principal convirtiéndolos así mediante la digestión en compuestos menos complejos como dióxido de carbono y agua.

#### **11.1.5. Biolixiviación**

Es una técnica que emplea microorganismos específicos para extraer un metal de un medio acuoso es posible biolixiviar metales como: cobre, zinc, níquel, cobalto, oro y plata. Actualmente es una de las técnicas más estudiadas para el tratamiento de DAM debido a sus ventajas las cuales son:

- Las bacterias pueden ser aisladas a partir de las mismas DAM
- En comparación se con los procesos fisicoquímicos presentan menor costo de operación
- Si existen minerales bioacumulados estos pueden ser tratados eficientemente

#### **11.1.6. Bioacumulación**

Es una técnica usada cuando se requiere tratamiento inmediato de un sitio contaminado consiste en la adición de microorganismos con capacidad suficiente para degradar los contaminantes estimados de esto depende el tamaño del inóculo así como de la dispersión que haya tenido el contaminante en el ambiente.

#### **11.1.7. Bioadsorción**

Es un fenómeno en donde los metales se absorben pasivamente sobre los componentes de la pared celular polianionica microbiana; es un proceso rápido que no está relacionado a inhibidores del metabolismo pero si limitado por condiciones fisicoquímicas como el pH, el mecanismo de transporte consiste en un sistema que lleva al interior de la célula el metal posteriormente este se incorpora al citoplasma de la célula allí es secuestrado por la presencia de proteínas llamadas metalotioneinas la cual se potencia en presencia de metales pesados . Los microorganismos responsables de este proceso se encuentran divididos en los siguientes géneros: *Thiobacillus Leptospirillum*, *Sulfolobus*, *Sulfobacillus* y *Acidianus*; Estos son capaces de soportar condiciones extremas de pH y temperatura.

#### **11.1.8. Reducción Biológica**

Es un fenómeno en donde acontecen reacciones naturales que producen alcalinidad, reducen los sulfatos y promueven la precipitación de los metales en solución en forma de sulfuros metálicos, esto es realizado por bacterias anaeróbicas especializadas de los géneros *Desulfovibrio* y *Desulfotomaculum*, estas bacterias son organismos heterotróficos y tienen un metabolismo respiratorio en el que sulfatos y sulfitos y otros componentes reducibles de azufre los cuales sirven como aceptores finales de electrones con la producción de sulfuro de hidrogeno.

**Tabla 9.** Bacterias Asociadas al Tratamiento de Residuos de Minería

Microorganismo	Ph	Temperatura
<i>Thiobacillus ferroxidans</i>	1,5 y 2	Mesofilas
<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	2 y 3	
<i>Thiobacillus intermedius</i>	2 y 3	
<i>Thiobacillus napolitanus</i>	2 y 3	
<i>Thiobacillus acidophilus</i>	2 y 3	
<i>Thiobacillus thioparus</i>	2 y 3	
<i>Thiobacillus ferroxidans</i>	2 y 3	
<i>Thiobacillus TH2 y TH3</i>	6 y 7	Termófilas
<i>Acidiphilium Cryptum</i>	1,5 y 2,5	Mesofilas
<i>Leptospirillum ferroxidans</i>	1 y 2	
<i>Leptospirillum ferriphilum</i>	1,5 y 2,5	
<i>Leptospirillum thermoferrooxidans</i>	1,5 y 2,5	
<i>Sulfolobus</i>	1,5 y 2,5	Termófilas
<i>Heterotrofos</i>	2 y 3	Mesofilas
<i>Maetallogenium sp</i>	2 y 3	
$\beta$ - <i>Proteobacteria</i> <i>Ferrimicrobium acidiphilum</i>	1,5 y 2,5	
<i>Actinobacteria</i> <i>Ferroplasma aciciphilum</i>	1,5 y 2,5	

Fuente MCGINNESS (1999)

Este tipo de tecnología de relativo bajo mantenimiento es ideal para minas subterráneas abandonadas porque no solo modificara el pH en el efluente sino que también extraerá el contenido de metales solubles como compuestos sulfurosos estables. Las condiciones reductoras bajo las cuales estos compuestos se hacen estables proporcionan un almacenamiento ideal de largo plazo para la preservación de los lodos.

Los compuestos que son sensibles a este tipo de tratamientos son:

- **Sulfuro de Plomo:** se origina la formación de Sulfato de Plomo que es insoluble en medio ácido.
- **Sulfuro de Níquel:** se lixivia a partir de sulfuros encontrados en menas de hierro por medio de la bacteria *Thioacillus* mucho más rápido que por el tratamiento fisicoquímico.
- **Sulfuro de Antimonio:** Es removido por medio de la bacteria *T. ferrooxidans* la cual tiene la habilidad de oxidar antimonita a pH 2 y a 35 °C.
- **Sulfuros de Metales Raros:** Estos se ubican en la parte cristalina de los sulfuros o silicatos para liberarlos es necesario oxidar los sulfuros, la literatura reporta que es posible oxidar empleando *Thiobacillus*, entre los metales raros removibles se encuentran el galio, cadmio, germanio, cobalto, renio, selenio, telurio, titanio y uranio.

La precipitación de los metales por medio de la reducción de los sulfuros implica el empleo de bacterias para producir  $H_2S$  que posee la capacidad de precipitar la totalidad del metal contenido en una solución, la reducción del metal implica la disminución en la valencia del metal en algunos casos mientras que en otros el ion metálico es reducido a su estado libre.

#### 11.1.9. Humedales Artificiales

Este tipo de tratamiento para drenajes de mina es uno de los más eficientes consiste en un complejo sistema de plantas, microorganismos y sustratos que funcionan como un filtro biogeoquímico, el rol de las plantas en este complejo sistema es el depurar las aguas basado en las macrofitas que se disponen en tanques o zanjas poco profundos, la elección del tipo de plantas a usar debe basarse en la adaptabilidad de la planta a las condiciones ambientales de la región, además de la capacidad de transporte de oxígeno y de la tolerancia de altas concentraciones de contaminantes .

La remoción de metales pesados se da gracias a procesos biogeoquímicos que están compuestos por procesos aerobios y anaerobios, además de se realizan procesos de Fito extracción que se da a través de las hojas, posterior a esto se da la Fito volatilización que permite que los componentes extraídos sean volatilizados. La Fito degradación es otro proceso que se da a nivel radicular en donde se transforman los contaminantes en nutrientes aprovechables por la planta.

Un ejemplo de la efectividad de este este tipo alternativa de proceso es el aconteció en Corea en donde se evaluó el tratamiento de aguas acidas de mina con los residuos de un hongo de la familia Shitake el cual se mezcló con los residuos compostados de con lodos de una planta de reciclaje de papeles con altas concentración de sulfato, se introdujo la mezcla dentro de un reactor de columna, se alimentó continuamente el reactor con drenaje de minas durante 35 semanas para determinar la reducción de sulfato y metales asociados, resultado muy significativa la reducción de sulfato, sulfuro de hidrogeno y sulfuros de metales que se precipitaron por acción de los hongo inoculados con posterior formación de ácidos pirúvicos y fórmico. Se utilizaron volúmenes 250 ml de inoculo más la adición de nutrientes, el pH se ajustó a 7 logrando así la precipitación de los metales, las concentraciones iniciales de metales fueron: hierro 500 ppm, zinc 100 ppm, manganeso 50 ppm, cobre 50 ppm, y la de sulfato 2580 ppm. Se encontró luego de 5 semanas que los sulfatos disminuyeron a 550 ppm, el zinc y el cobre se redujeron a menos de 0,1 ppm.

## **12. MANEJO AMBIENTAL DE AGUAS RESIDUALES DE MINERÍA**

### **12.1. IMPACTO A PREVENIR O MITIGAR**

#### **12.1.1. Acidificación**

El agua, rica en oxígeno al entrar en contacto con la pirita y otros minerales inestables de azufre inestables presentes en los estériles de los yacimientos, sufre un proceso acelerado de oxidación, que da como resultado final la acidificación del agua que entre en contacto con estos compuestos.

#### **12.1.2. Sólidos en Suspensión**

Además de las partículas de carbón, los drenajes mineros arrastran partículas de otros compuestos, que aumentan la turbidez de las aguas receptoras, alterando los procesos fotosintéticos de las plantas acuáticas, especialmente en ambientes lacustres.

#### **12.1.3. Compuestos en Solución**

El drenaje minero subterráneo generalmente contiene componentes orgánicos como grasas, aceites y solventes, que provienen en su mayoría de máquinas y equipos utilizados en la actividad minera, y componentes químicos disueltos como sales, ácidos minerales y metales, que pueden presentar algún grado de toxicidad, y que no degradan naturalmente, pudiendo contaminar las fuentes de agua.

#### **12.1.4. Agotamiento**

Las fallas o fracturas en la roca inducidas por la minería pueden causar que las aguas subterráneas o freáticas que alimentan manantiales de aguas superficiales,

encuentren senderos entre las diferentes capas freáticas presentándose sitios de afluencia parcial o total de éstas aguas hacia la mina, haciendo disminuir o desaparecer estos manantiales.

## **12.2. CRITERIOS AMBIENTALES**

### **12.2.1. Identificación**

Se debe realizar una caracterización previa del yacimiento y de los componentes de los estériles para predecir la posible formación de aguas ácidas.

Los sitios de entrada de agua, bocaminas y bocavientos activos y abandonados, grietas por subsidencia, aguas lluvias y aguas de escorrentía, corrientes superficiales y subsuperficiales, deben ser considerados como canales de acceso del agua a los frentes de trabajo y como mecanismos de transporte de partículas en suspensión de metales pesados , azufre disuelto y algunos iones metálicos en solución.

Los drenajes mineros se deben realizar preferiblemente por bombeo, el drenaje a gravedad arrastra sedimentos, teniendo mayor porcentaje de turbidez que los drenajes bombeados. El botadero de estériles debe contar con un sistema de recolección y tratamiento de las aguas de escorrentía que hayan entrado en contacto con ellos, antes de ser vertidas a un cuerpo de agua o de infiltrarlo en el suelo.

Si se dispone de un sitio de almacenamiento, temporal o definitivo de carbón es necesario disponer de un sistema de recolección y tratamiento de aguas de escorrentía que hayan entrado en contacto con el mineral antes de ser vertido a un cuerpo de agua o de infiltrarlo en el suelo.

### **12.2.2. Definición de Sistemas de Tratamiento**

Las aguas de escorrentía que hayan transitado sobre materiales estériles, apilamientos de carbón, y las provenientes de los drenajes mineros deben ser interceptadas y conducidas a sistemas de tratamiento mediante canales hechos en tierra o impermeabilizados.

La entrada en contacto de agua y aire con los yacimientos que contienen materiales reactivos que favorecen la formación de aguas ácidas se deben cubrir y sellar por medio coberturas o sellos de baja permeabilidad, como suelos de textura fina, arcillas o limos, y materiales sintéticos, de polietileno o neopreno.

Para el tratamiento de los drenajes mineros ácidos, es necesario aplicar una técnica de neutralización, la técnica más utilizada y más aplicable a la MSC es la adición de cal, por su bajo costo y alta eficiencia.

Esta técnica se realiza en cinco etapas de tratamiento la homogeneización, la mezcla, la aireación, la sedimentación y la disposición final del lodo de desecho.

Para facilitar el tratamiento es conveniente que el bombeo del agua de la mina se realice de forma constante, y que la capacidad de almacenamiento permita manejar el volumen producido en por lo menos tres días de operación.

La cal se puede agregar en suspensión líquida, lo cual hace necesario un sistema de alimentación, el cual está compuesto de un bomba que alimenta un dosificador por medio del cual se inyecta al agua la cal.

También se puede adicionar cal seca o hidratada en el almacenamiento, con lo cual el sistema de alimentación se elimina. los requerimientos de cal de esta técnica son menos de 0.1 Kg/1000l , para minas con drenajes con pH entre 3.5 y 5.0.

Para el tratamiento de los sólidos en suspensión del drenaje minero, se proponen sedimentadores a gravedad mediante el almacenamiento temporal del agua, estos pueden ser pozos, tanques o lagunas de sedimentación, cuya condición principal es que deben tener una baja velocidad de flujo que permita la sedimentación de los sólidos en suspensión.

El tratamiento de los sólidos disueltos y la estabilización del pH, se logra mediante la aireación del drenaje minero para favorecer la oxidación, esto se puede lograr haciendo correr el agua a través de las pendientes por medio de cascadas artificiales, con lechos de roca de diferentes tamaños., para la estabilización del pH la roca debe ser caliza.

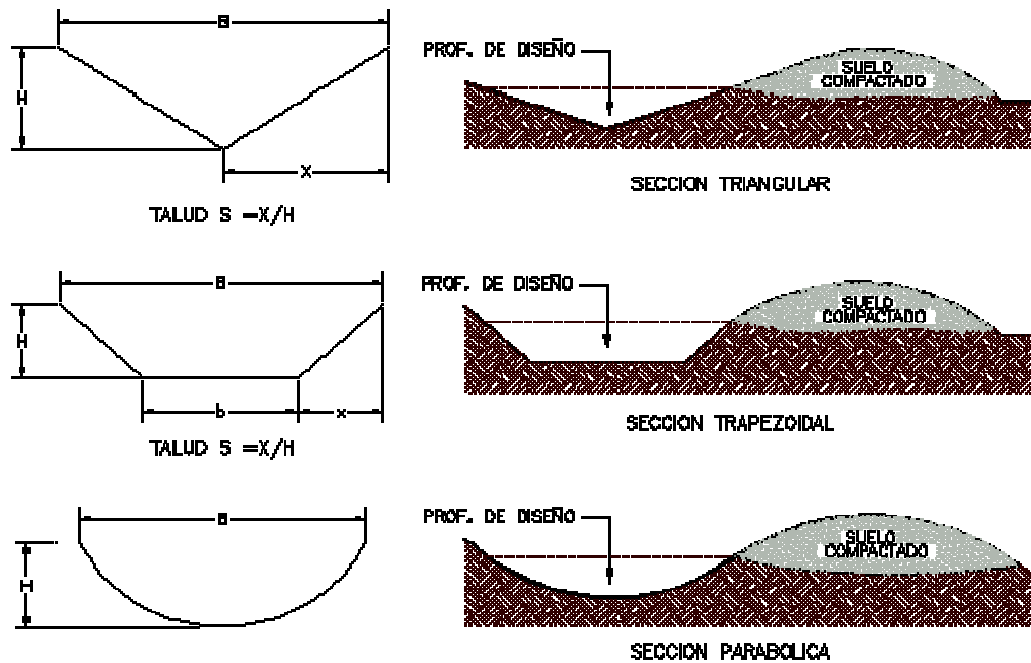
### **12.2.3. Localización**

Debe estar localizado donde menor Que referencia cause a la operación y donde se evite el contacto con los mineros. Otros factores a considerar son: la topografía, la cobertura vegetal y la cercanía al depósito de explotación.

### **12.2.4. Mantenimiento**

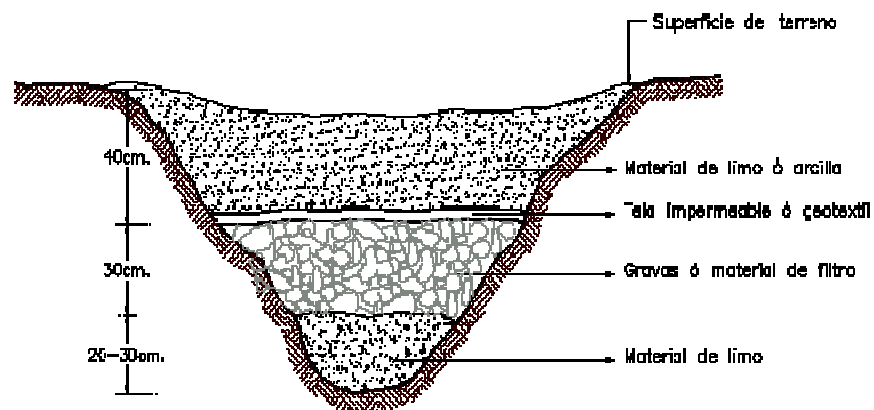
- Mensualmente se debe revisar que el sistema no presente fugas o infiltraciones.
- Semestralmente se deben retirar los sedimentos de las pocetas de neutralización y sedimentadores.

**Figura 7. Intercepción de aguas por canales**



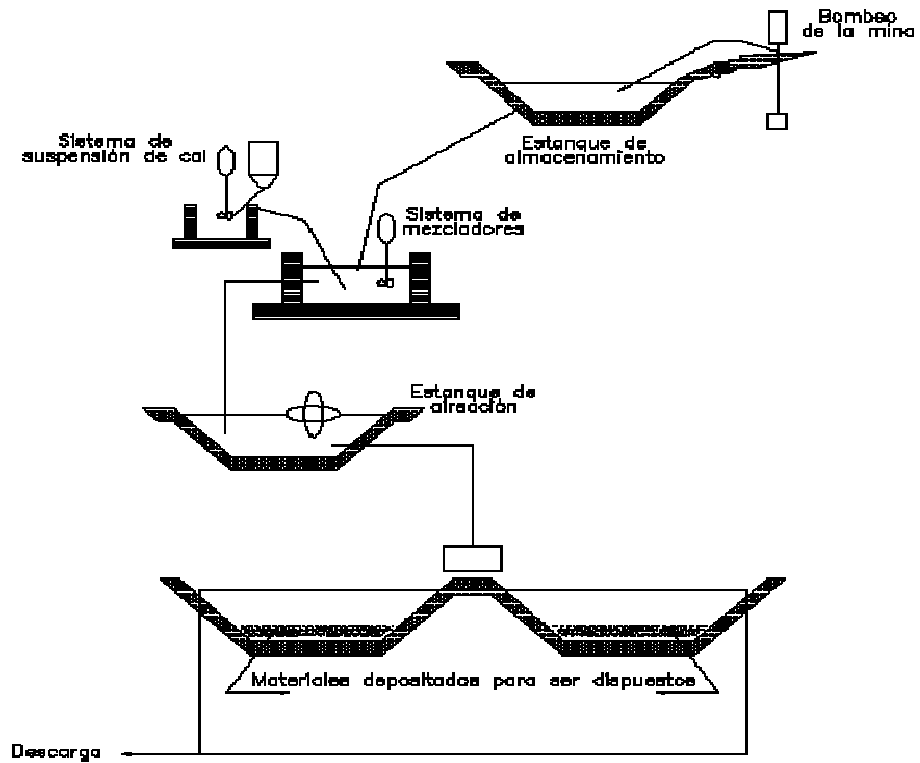
**FUENTE:** INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA, Tomado del Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería, 1989

**Figura 8. Sellamientos y cubrimientos**



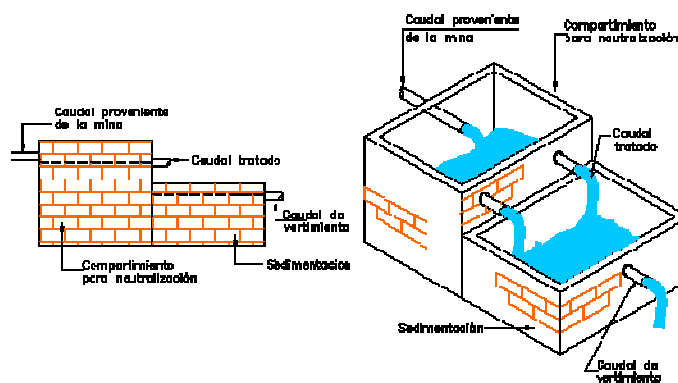
**FUENTE:** ECOCARBÓN, Tomado del Manual para el Control de los Factores de Degradación Ambiental en la Minería Subterránea del Carbón, 1997

**Figura 9.** Etapas de neutralización convencional con cal



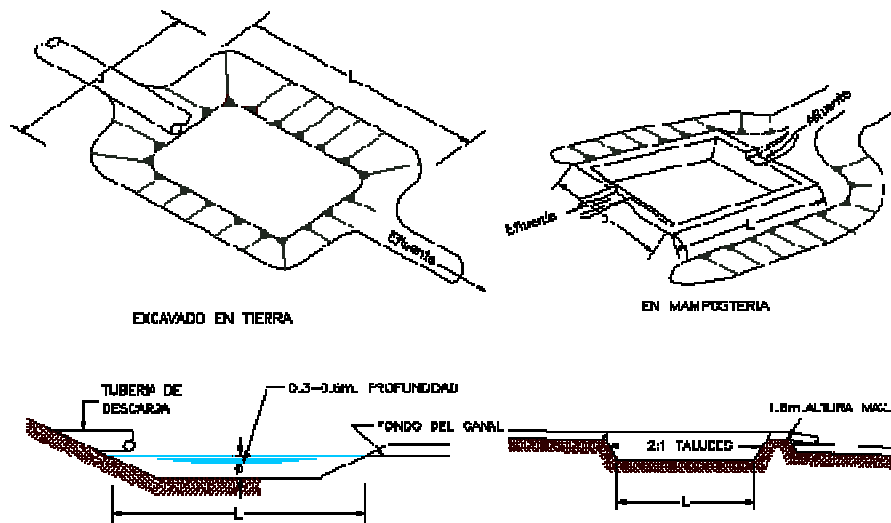
**FUENTE:** SEGRUPTA M. Tomado del Manual para el Control de los Factores de Degradación Ambiental en la Minería Subterránea del Carbón, 1993

**Figura 10.** Tanques de neutralización



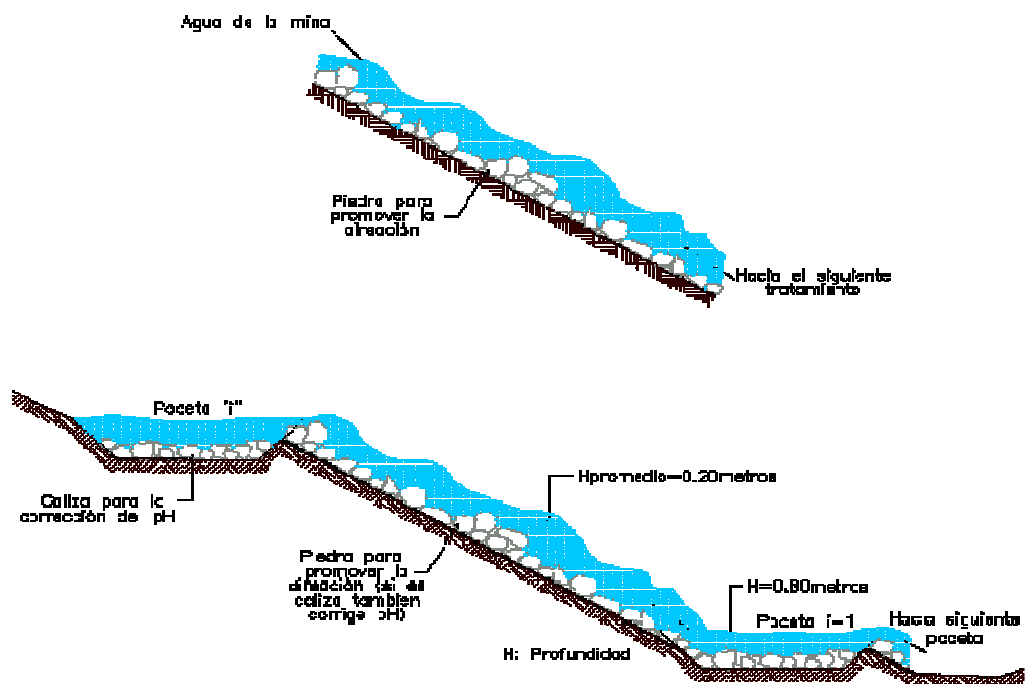
**FUENTE:** ECOCARBÓN. Tomado y adaptado de Guía Ambiental para Minería Subterránea del Carbón, 1997

**Figura 11.** Tipos de sedimentadores



**FUENTE:** INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. Tomado del Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería, 1989

**Figura 12.** Cascadas de aireación y corrección de pH



**FUENTE:** ECOCARBÓN. Control de contaminación de agua en la pequeña minería subterránea del carbón, Álvaro Orozco Asociados Ingenieros, 1995

#### **12.2.5. Actividades a Desarrollar**

- Instalación del sistema de drenaje de las minas.
- Localización de los sistemas de tratamiento, cascadas de aireación, pocetas de neutralización, sedimentadores y vertimiento final.
- Excavación y construcción de cascadas de aireación, pocetas de neutralización, sedimentadores y vertimiento final.
- Mantenimiento del sistema.
- Monitoreo y seguimiento de la efectividad de los sistemas de control y tratamiento.

#### **12.2.6. Responsable**

- La responsabilidad de ejecución física de estas actividades está a cargo del adjudicatario del contrato de explotación.
- La responsabilidad de asistencia técnica y seguimiento del desarrollo de estas actividades es de la entidad del subsector a través del delegado en campo.
- Es responsabilidad del interventor ambiental velar por el desarrollo y cumplimiento de las actividades por cada una de las partes.

## 13. MARCO JURIDICO

### 13.1. MARCO LEGAL MINERO

Para el desarrollo de la minería en general, el Ministerio de Minas y Energía (MME), expidió unas normas que regulan la ejecución de las actividades mineras. Estas normas se conocen como el **Código de Minas (Decreto - Ley 2655 de 23 de Diciembre de 1988)**. Con la expedición de este código se plantean los siguientes objetivos:

- El Código de Minas regula las relaciones entre los organismos y entidades del Estado y de los particulares entre sí, sobre las actividades de prospección, exploración, explotación, beneficio, transporte, aprovechamiento y comercialización de los recursos no renovables que se encuentren en el suelo o subsuelo, así sean de propiedad de la nación o privada.
- El Ministerio de Minas y Energía señala las zonas en las cuales no se pueden desarrollar actividades mineras en concordancia con lo establecido en el Decreto 2811 del 18 de Diciembre /1974 . Estas zonas hacen referencia a las áreas de uso exclusivo para la agricultura y ganadería, las reservas ecológicas y las que presenten incompatibilidad para el desarrollo de la actividad.

En los artículos 16 y 17 del Código Minero se definen los títulos mineros, su clasificación y su utilidad. Así mismo se establecen tres clases de minería: pequeña, mediana y gran minería.

Otros reglamentos que completan el marco legal minero se relacionan a continuación.

**Tabla 10. Marco Legal Minero**

<b>NORMA</b>	<b>TEMA</b>	<b>CONTENIDO</b>
Decreto 1335/1987	Reglamento de Seguridad en las labores subterráneas	Establece disposiciones sobre la higiene y seguridad minera en las labores subterráneas.
Ley 141 de 1994	Creación del Fondo Nacional y de la Comisión Nacional de Regalías	Crea el Fondo Nacional de regalías, Comisión nacional de Regalías y regula el derecho del estado a percibir regalías por la explotación de los recursos naturales no renovables.
Decreto 2636/1994	Explotaciones de hecho de pequeña minería	Legaliza las explotaciones de hecho de la pequeña minería
Decreto 501/1995	Inscripción de los títulos mineros en el Registro minero	Reglamenta la inscripción en el registro minero de los títulos para la exploración y explotación de minerales de propiedad nacional.
Decreto 1184/1995	Forma de Pago del canon superficiario	Modifica la forma de pago del canon superficiario en un plazo de diez días siguientes a la inscripción del Registro minero.
Decreto 1385/1995	Mecanismos de conciliación.	Establece el mecanismo de conciliación para los eventos de superposiciones de áreas entre explotadores de hecho y títulos mineros otorgados.
Decreto 1481/1996	Requisitos para la inscripción títulos en el Registro minero.	Establece la obtención de la licencia ambiental para la inscripción de los aportes en el registro minero nacional.

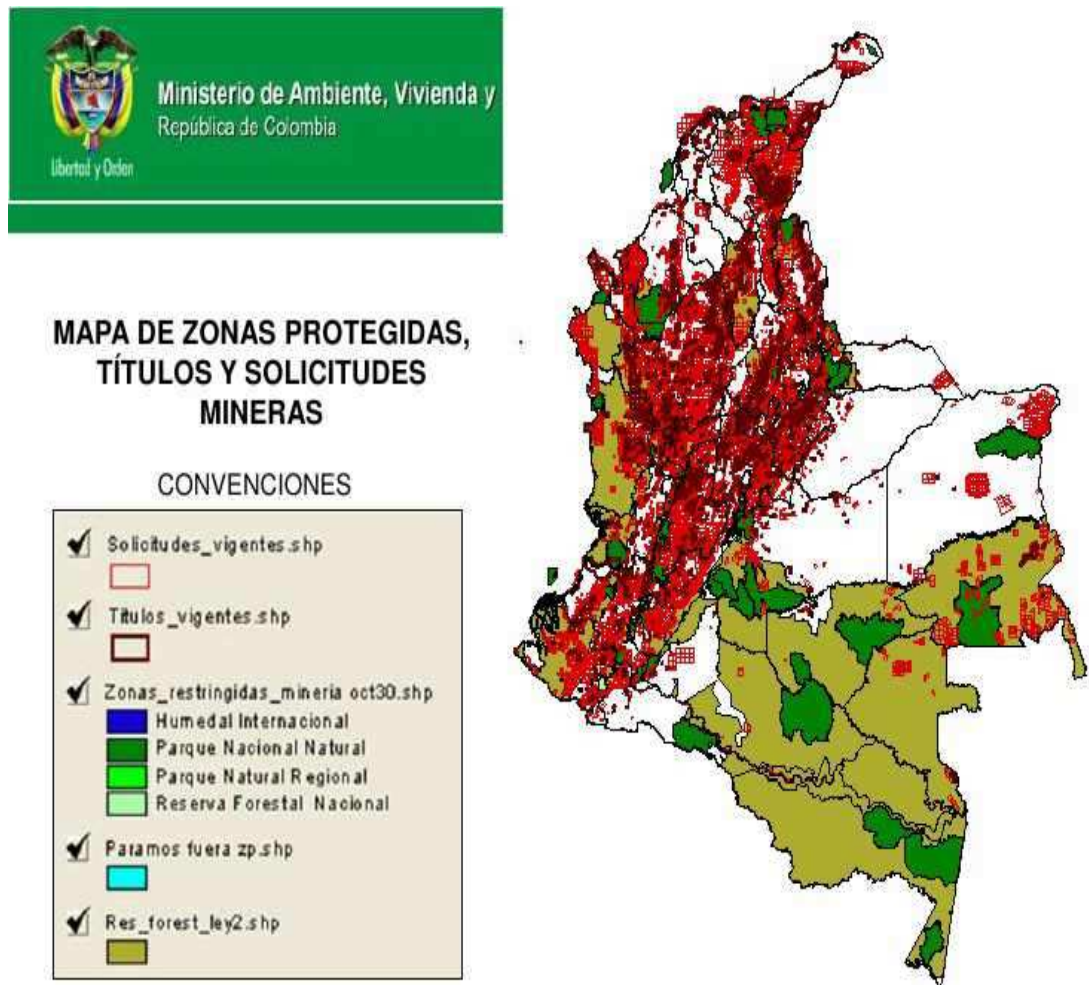
**Fuente:** MARCO LEGAL MINERO. <http://www.upme.gov.co>

## 13.2. TITULARIZACIÓN MINERA

En el Código de Minas se define el **Título minero** como el documento en el cual se otorga el derecho a explorar y explotar el suelo y el subsuelo. Los títulos mineros se clasifican en:

- Licencias de exploración y explotación
- Aportes mineros
- Contratos mineros

**Figura 13.** Mapa de Zonas Protegidas, Títulos y Solicitudes Mineras.



**Fuente:** Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

### 13.3. LICENCIA DE EXPLORACIÓN

La licencia de exploración es el título que confiere a una persona, el derecho exclusivo a realizar trabajos para establecer existencia de yacimientos de minerales y reservas, dentro de una zona determinada.

#### **13.4. LICENCIA DE EXPLOTACIÓN**

La licencia de explotación es el título que le otorga a una persona la facultad exclusiva de explotar los depósitos o yacimientos de minerales en un área determinada.

#### **13.5. APORTES MINEROS**

El aporte minero otorga a las entidades adscritas o vinculadas al MME, la facultad exclusiva y temporal de explorar y explotar los yacimientos de uno o varios minerales que existan en un área determinada.

#### **13.6. CONTRATOS MINEROS**

Los contratos mineros son los instrumentos mediante los cuales se crean derechos y obligaciones en la exploración, montaje de minas, explotación y beneficio de minerales.

Hay dos clases de contratos mineros:

- Contratos de concesión
- Contratos con las entidades descentralizadas.

##### **13.6.1. Los Contratos de Concesión**

Son contratos celebrados por el Ministerio de Minas y Energía y confieren al concesionario el derecho exclusivo a extraer los minerales y a realizar obras y labores de montaje y desarrollo de la explotación y transporte del mineral.

##### **13.6.2. Los Contratos con las Entidades Descentralizadas**

Son contratos que celebran los establecimientos públicos y las empresas industriales vinculadas y adscritas al MME para explorar y explotar áreas que sean recibidas en aporte.

### **13.7. ACTIVIDADES MINERAS CARBONÍFERAS**

Las actividades mineras de exploración y explotación de carbón de propiedad de la nación, solamente se puede realizar mediante el sistema de aporte otorgado a empresas industriales y comerciales del Estado que estén vinculadas al Ministerio de Minas y Energía. Los aportes de carbón se otorgan a la Empresa Nacional Minera Ltda. MINERCOL.

MINERCOL desarrollará los programas de contratación minera que considere necesarios para el aprovechamiento de los yacimientos carboníferos. Con este fin se expidió la Resolución 024 del 1994 "por medio de la cual se establecen criterios generales y normas básicas de contratación para pequeña, mediana y gran minería del Carbón en áreas de los aportes y áreas delegadas".

Los títulos mineros sólo pueden ser otorgados en áreas de Aportes de MINERCOL. Los títulos mineros otorgados con anterioridad por el MME como permisos, licencias y concesiones, son administrados por MINERCOL, por delegación del mismo y las nuevas solicitudes debe tramitarse ante MINERCOL.

Las modalidades de contratación en las áreas de aporte de MINERCOL son las siguientes:

- Exploración - Explotación
- Explotación
- Exploración - Explotación , con Explotación anticipada
- Explotación. con explotación adicional

El tipo y duración de contrato a celebrar en cada modalidad, depende de:

- El conocimiento geológico del área.
- El estado de actividad minera.
- El potencial de reservas recuperables.
- El volumen anual de producción según las proyecciones de mercado.

### 13.8. TITULOS MINEROS

Tabla 11. Marco Legal Titulo Minero

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN		
<b>Licencia de Exploración</b>	Para otorgar la licencia de exploración y su duración, se debe conocer el área a explorar		
	<b>Pequeña Minería</b>	<b>Mediana Minería</b>	<b>Gran Minería</b>
Área a explorar (Ha)	100	100 >A > 1000	1000 > A > 5000
Duración de la Licencia	Un año	Dos años	Cinco años
Tiempo de Prorroga	Un año	Un año	Un año
Requisitos para la Solicitud de la Licencia de Explotación	Informe final de exploración y Programa de Trabajos e inversiones. (PTI)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Informes de Progreso sobre el programa de exploración.</li> <li>● Programa de trabajos e Inversiones</li> <li>● Estudio de impacto ambiental.</li> </ul>	
<b>Licencia de Explotación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● La licencia tiene una duración de 10 años a partir de su inscripción en el Registro Minero.</li> <li>● Se deben rendir informes anuales, donde se presenta un resumen del programa de explotación ejecutado, las inversiones realizadas y los resultados obtenidos.</li> </ul>		
<b>Aporte Minero</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● El aporte es otorgado por solicitud de la entidad interesada previa justificación técnica.</li> <li>● La entidad titular del aporte puede explorar y explotar el área o parte de ella directamente, o indirectamente por medio de</li> </ul>		

	<p>terceros..</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● La cancelación de los aportes puede darse por :</li> <li>● Terminación o disolución de la sociedad.</li> <li>● No realizar los actividades mineras según lo descrito en la resolución de otorgamiento.</li> <li>● El incumplimiento de las normas de explotación racional de los recursos mineros.</li> <li>● Violación de las normas que regulen la venta y comercialización del mineral.</li> <li>● La no presentación de los informes mensuales .</li> </ul>
<b>Contratos mineros de concesión</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● La duración de los contratos mineros de concesión es de 30 años, a partir de su inscripción en el Registro Minero.</li> <li>● Durante la explotación el contratista debe devolver las zonas que no estén incluidas en los planes y diseños mineros. .</li> <li>● Al vencer los contratos de concesión de gran minería, el contratista debe dejar en funcionamiento equipos, instalaciones y obras mineras y entregar a título de reversión gratuita todas las propiedades exclusivas de explotación.</li> </ul>
<b>Contratos mineros de las entidades descentralizadas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Los contratos que se celebren para pequeña y mediana minería sobre las áreas comprendidas en los aportes solo necesitan su inscripción en el Registro Minero.</li> <li>● Los contratos que se celebren para proyectos de gran minería requerirán la aprobación previa del MME y posteriormente la inscripción en el Registro Minero</li> </ul>

**Fuente:** MARCO LEGAL MINERO.

### 13.9. REGISTRO MINERO

El Registro Minero es un sistema de inscripción, autenticidad y publicidad de los títulos mineros con el derecho a explorar y explotar el suelo y subsuelo de acuerdo al Código de Minas.

La inscripción del título en el Registro Minero está compuesta por tres partes:

- El Registro,
- La identificación física de las áreas de los títulos, y
- El archivo

Además el proceso de Registro consiste en tres fases:

- La primera Radicación,
- La segunda, calificación, y
- la última, la inscripción.

Los títulos a inscribir en el Registro Minero son:

Licencias de Exploración

Licencias de Explotación

Títulos Mineros Vigentes

- Contratos de Concesión
- Aportes
- Embargos de los derechos a explorar y explotar
- Subcontratos de explotación
- Servidumbres mineras
- La constitución, reforma y disolución de las sociedades ordinarias de minas
- Programas de trabajo e inversiones aprobados.

En el Decreto 501 del 24 de marzo de 1996, se establece que la ejecución de trabajos autorizados por las licencias de explotación de **contratos de concesión** requieren de **Licencia Ambiental** como requisito para la inscripción en el Registro Minero.

En el Decreto 1481 del 15 de Julio de 1996, los **aportes** se inscribirán en el registro minero nacional.

Cuando se vayan a realizar las actividades de exploración y de explotación, se debe obtener, para la ejecución de cada actividad, la respectiva **Licencia Ambiental**.

### **13.10. ZONAS MINERAS PARA LAS MINORÍAS ÉTNICAS**

El Ministerio de Minas y Energía señalará y delimitará las zonas mineras dentro de los territorios de las comunidades indígenas y negras en las cuales la exploración y explotación de los recursos naturales no renovables deberá hacerse bajo condiciones especiales sobre la protección y participación de estas comunidades, con el fin de preservar sus características culturales y económicas.

Los grupos indígenas y las comunidades negras para la solicitud de la licencia de exploración y explotación sobre los yacimientos y reservas de carbón que se encuentran dentro de su territorio, se regirán por el Artículo 125 del Código de Minas y Artículo 27 de la Ley 70 de Agosto 27 de 1993).

## 14. CONCLUSIONES

- En las actividades mineras y en particular en las explotaciones de carbón es necesario monitorear parámetros como pH, acidez y sulfatos de las aguas de drenaje con el fin de establecer procesos de mitigación como los planteados en este documento, en algunos casos es necesario establecer el potencial de generación de drenaje ácido y que nivel de auto mitigación posee el terreno donde se practica la extracción minera.
- Existe tratamientos Fisicoquímicos convencionales que aunque efectivos generan impactos tanto ambientales como sobrecostos en la disposición de lodos concentrados en oxi hidróxidos que deben ser removidos y tratados adecuadamente.
- Los nuevos desarrollos permiten acceder a tratamientos biológicos económicos, sostenibles y prácticos para el tratamiento del drenaje ácido de mina, además que los porcentajes de remoción para este tipo de tratamiento han llegado hasta a un 90 % usando microorganismos de los géneros *Thiobacillus* y *Leptospirillum*.
- El estado Colombiano, aunque ha avanzado en la legislación aun esta distante de poder administrar los recursos naturales no renovables como lo es el carbón.
- La industria minera nacional es en una gran mayoría es tipo rudimentaria de carácter artesanal tradicional lo que genera la carencia de tecnología, seguridad social, industrial y ambiental.

- La falta de tecnología imposibilita la explotación de grandes volúmenes de carbón y haciendo que su rentabilidad sea muy baja.
- Para el fortalecimiento de la industria minera carbonífera en la zona CUNDIBOYACENSE, y que coexista con lo establecido en la normatividad del medio ambiente, cumpliendo todos los parámetros de los factores inherentes a esta actividad, el Estado debe apalancar este sector en varios aspectos: créditos, propiciar el mejoramiento del precio del producto, Mejoramiento de infraestructura que rodea la industria (Acueductos, Alcantarillados, colegios, etc.).
- Con estas actividades podremos obtener la coexistencia de la minería con el agua y se podrá proyectar la locomotora oficial de prosperidad que el gobierno actual con intensidad a pregonado pero sin análisis previo

## 15. RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso para el tratamiento de drenajes de mina en nuestro contexto por medio de un tratamiento Biológico ya que son más económicos, rápidos y no requieren disposición final de lodos generados en comparación a los tratamientos convencionales disponibles.
- Se recomienda la creación mecanismos para la administración de los minerales en cabeza del Ministerio de Minas Y Energía quien autónomamente delega a los Departamentos o entidades adscritas para la vigilancia y el ministerio del ambiente para el control respecto a la injerencia con el entorno físico en el frente de trabajo del contrato.
- Existen algunas entidades como CARBOCOL, ECOMINAS, ECOCARBON, INGEOMINAS que han promocionado alternativas de solución por medio de revistas y documentos pero que siempre han quedado cortas por que el problema es más grande de lo que puntualmente se quiere abordar por lo que se recomienda la revisión de dichos aspectos con mayor profundidad a lo que actualmente se está haciendo.
- El panorama que se deduce a mediano plazo es que no habrá variación, así se pregone un drástico cambio de legislación minera y la razón es que no cuenta con la fortaleza económica de los mineros como tampoco se posee la infraestructura administrativa para supervisar las obligaciones que implica un título minero o contrato de concesión.

## BIBLIOGRAFIA

- AKCIL A. Acid Mine Drainage: Causes, treatment and case studies, In Journal of Cleaner Production 14 (2006).
- ANALISIS AMBIENTAL DE LA MINERIA SUBTERRANEA. <http://www.upme.gov.co>
- AUBE B. The Science of Treating Acid Mine Drainage and Smelter Effluents. Quebec, Canada (2004).
- CADORIN L. Tratamiento de Rieles Mineros Ácidos por Precipitación Química y Flotación por Aire Disuelto. Universidade Federal do Rio Grande do Soul. (2007).
- COHEN R. Use of Microbes for cost reduction of metal removal from metals and mining industry waste streams. In Journal of Cleaner Production 14 (2006).
- DAVILA J. Tratamiento de vinazas de destilería por electrocoagulación flotación oxidación. Tesis realizada para optar al título de Magister en Ingeniería énfasis Ingeniería Química. Universidad del Valle. 2008.
- EL CARBON COLOMBIANO , FUENTE DE ENERGIA PARA EL MUNDO Ministerio de Minas y Energía 2004.
- INFORMACION MINERA Y AMBIENTAL., MINA SUBTERRÁNEA, Posted abril 19 de 2009.

- IMPACTOS AMBIENTALES DE LA MINERIA EN COLOMBIA, Danny Daniel López Juvinao Ingeniero en Minas.
- JHONSON B. Acid Mine Drainage Remediation Options: A review. Science of The Total Environmental 3 (2005).
- GUCHUA C. Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology 38 (2004)
- MARCO LEGAL MINERO. <http://www.upme.gov.co>
- MCGINNESS S. Treatment of Acid Mine Drainage. Research Paper. Science and environment section. House of Commons Library (1999).
- SECRETARIA DE MINAS Y ENERGÍA. GOBERNACIÓN DE BOYACA. <http://www.simco.gov.co>

## ANEXOS

### Anexo A - LA CALIDAD DEL CARBON COLOMBIANO SEGÚN ZONA CARBONÍFEREA

ZONA	AREA	SECTOR	BASE	HUMEDAD		Cz	MV	CF	St	PC	PC	PC
					%	%	%	%	%	BTU/Lb	MJ/kg	kcal/kg
Cundinamarca	Jerusalén - Guataquí		BCA	HR	5,19	5,34	39,09	50,38	0,58	13.044	30,39	7.250
	Guaduas - Caparrapí	Caparrapí	BCA	HR	4,12	5,61	22,43	67,83	0,59	12.829	29,89	7.130
	Caparrapí - Guaduas	Guaduas	BCA		1,98	11,23	34,88	51,91	0,91	12.682	29,55	7.050
	Guatavita - Sesquilé-	Suesca-Chocontá	BCA	HR	3,42	12,67	20,8	63,1	1,53	13.041	30,39	7.250
	Chocontá - Guatavita	Guatavita	BCA		4,12	9,76	18,01	68,11	0,93	13.390	31,2	7.440
	Tabio- Río Frío- Carmen de Carupa	Carmen de Carupa	ROM	Eq. + 2	13,66	9,46	26,8	60,07	0,8	13.433	31,3	7.460
	Carmen de Carupa - Tabio-Río Frío	Tabio-Río Frío	ROM	Eq. + 2	4,67	10,6	33,85	50,86	1,06	12.718	29,63	7.070
	Checua - Cogua-Sutatausa-Guachetá	Cogua-Sutatausa-Guachetá	ROM	Eq. + 2	3,9	10,43	33,53	52,12	0,69	12.738	29,68	7.080
	Lenguazaque - Suesca - Albarracín	Lenguazaque - Cucunubá-Nemocón	ROM	Eq. + 2	1,04	14,42	24,33	60,21	1,38	12.993	30,27	7,22
	Suesca - Albarracín		ROM	Eq. + 2								
	Zipaquirá - Zipaquirá - Embalse del Neusa	Zipaquirá - Embalse del Neusa	BCA	HR	4,42	14,21	35,7	45,67	1,04	11,309	26,35	6,28
	Neusa - Embalse del Neusa-Vereda Lagunitas	Embalse del Neusa-Vereda Lagunitas	BCA	HR								
	Páramo de la Bolsa-Machetá											
	BOYACA	Checua - Lenguazaque		ROM	Eq. + 2	3,56	10	25,19	61,25	0,8	13.439	31,31
Suesca - Albarracín			ROM	Eq. + 2	4,69	12,18	33,71	49,42	1,07	12.420	28,94	6.900
Tunja-Paipa-Duitama			ROM	Eq. + 2	9,48	11,4	38,03	41,09	1,53	11.268	26,25	6.260
Sogamoso-Jericó			ROM	Eq. + 2	4,29	9,57	30,19	55,96	1,23	13.099	30,52	7.280
Betania			BCA	HR	1,47	8,36	30,94	59,25	1	13.859	32,29	7.700
Úmbita-Laguna de Tota			ROM	Eq. + 2	5,75	13,1	38,34	42,8	1,21	11.699	27,26	6.500

Anexo B - MATRIZ DE LOS PRINCIPALES IMPACTOS AMBIENTALES EN LA MINERIA SUBTERRANEA EN COLOMBIA

CATEGORÍA	COMPONENTE	IMPACTO	MAGNITUD			
			ALTO	MEDIO	BAJO	DESPRECIABLE
Fisico-Biótica.	Atmósfera	Emisiones de partículas fugitivas			●	
		Emisión de gases				●
		Modificación del clima				●
	Agua	Contaminación físico-química	●			
		Contaminación biológica y con materia orgánica		●		
		Obstrucción de cauces naturales	●			
		Aporte de sedimentos de corrientes		●		
		Variación de niveles freáticos		●		
		Incremento de aguas de escorrentía				●
	Suelo Y Subsuelo	Cambios en propiedades físico químicas				●
		Hundimientos del terreno, subsidencia.	●			
		Activación de procesos erosivos			●	
		Pérdida de capa orgánica e inorgánica				●
		Cambios en el uso del suelo			●	
		Movimientos del macizo rocoso (botadero)		●		

CATEGORÍA	COMPONENTE	IMPACTO	MAGNITUD			
			ALTO	MEDIO	BAJO	DESPRECIABLE
	Vegetación	Tala arbórea			●	
		Reducción de la cobertura vegetal				●
	Fauna Acuática y Terrestre	Alteración de hábitats				●
		Afectación de comunidades				●
		Migración de especies				●
	Paisaje	Artificialización del entorno	●			
		Contrastes visuales		●		
		Disposición inadecuada de materiales		●		
	ocial y económica	Población	Crear expectativas de demandas de servicios			●
Cambios de costumbres y sistemas productivos					●	
Cambios de actividad económica						●
Procesos de migración						●
Infraestructura y Bienestar Social		Aumento de riesgos contra la salud	●			
		Deterioro de las condiciones ergonómicas	●			
		Incremento del nivel de empleo		●		
		Aumento de los ingresos		●		

CATEGORÍA	COMPONENTE	IMPACTO	MAGNITUD			
			ALTO	MEDIO	BAJO	DESPRECIABLE
		Demanda de vivienda			●	
		Demanda de centros de salud		●		
		Demanda de escuelas		●		
		Aumento de riesgos de accidentalidad	●			
		Demanda de equipos de seguridad y salvamento minero	●			
		Deterioro de la infraestructura.	●			
		Demanda de servicios públicos		●		

**Anexo C - MATRIZ DE LOS PRINCIPALES IMPACTOS DE LA MINERIA SUBTERRANEA DEL CARBON**

	DESARROLLO		PRODUCCIÓN						
	Ingeniería y Diseño	Construcción y montaje	Arranque de la mina	Cargue	Sostenimiento	Desague	Transporte interno	Descargue-acopio	Botaderos de estériles
<b>RECURSO HÍDRICO</b>									
Contaminación fisicoquímica						●			●
Aporte de sedimentos						●			●
Variación de niveles freáticos						●			
Contaminación orgánica		●	●			●			●
<b>SUELO</b>									
Hundimiento terreno/subsidencia									
Obstrucción cauces									●
Movimiento macizo rocoso									●
<b>VEGETACIÓN</b>									

	DESARROLLO		PRODUCCIÓN						
	Ingeniería y Diseño	Construcción y montaje	Arranque de la mina	Cargue	Sostenimiento	Desague	Transporte interno	Descargue-acopio	Botaderos de estériles
Tala arborea					●				
Reducción cobertura		●			●				
<b>SOCIO-CULTURAL</b>									
Alteración del paisaje		●							
Aumento capacitación técnica	●								
Demanda de escuelas		●							
Aumento riesgos salud		●							
Deterioro condiciones ergonómicas		●							
Demanda de vivienda		●							
Demanda servicios de salud		●							
Aumento accidentalidad		●							
Demanda equipo salvamento									
Deterioro infraestructura		●							

	DESARROLLO		PRODUCCIÓN						
	Ingeniería y Diseño	Construcción y montaje	Arranque de la mina	Cargue	Sostenimiento	Desague	Transporte interno	Descargue-acopio	Botaderos de estériles
Demanda servicios públicos									
<b>ECONÓMICO</b>									
Incremento nivel de empleo		●							
Cambio nivel de ingresos	●	●							

	Cierre	Desmantelamiento obras	Desmantelamiento infraestructura	Recuperación botaderos	Limpieza del área
<b>RECURSO HÍDRICO</b>					
Contaminación fisicoquímica	●				
Aporte de sedimentos	●				
Variación de niveles freáticos	●				
Contaminación orgánica	●				
<b>SUELO</b>					
Hundimiento terreno/subsidencia	●				
Obstrucción cauces					
Movimiento macizo rocoso					
<b>VEGETACIÓN</b>					
Tala arborea					
Reducción cobertura				●	●
<b>SOCIO-CULTURAL</b>					
Alteración del paisaje					
Aumento capacitación técnica					
Demanda de escuelas					

	Cierre	Desmantelamiento obras	Desmantelamiento infraestructura	Recuperación botaderos	Limpieza del área
Aumento riesgos salud					
Deterioro condiciones ergonómicas					
Demanda de vivienda					
Demanda servicios de salud					
Aumento accidentalidad					
Demanda equipo salvamento					
Deterioro infraestructura					
Demanda servicios públicos					
<b>ECONÓMICO</b>					
Incremento nivel de empleo		