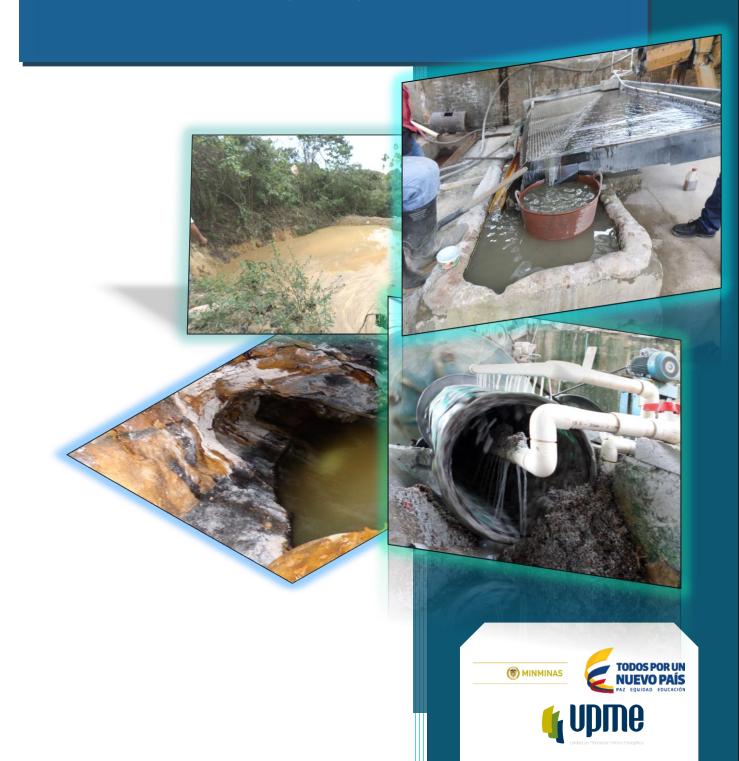
# GUÍA DE ORIENTACIÓN PARA EL MINERO SOBRE EL CORRECTO MANEJO DE VERTIMIENTOS PARA LA MINERÍA DE METALES PRECIOSOS Y DE CARBÓN







# CONTRATO INTERADMINISTRATIVO GGC 223, (UPME) CI-002-2015

# MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA - UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICO

Y

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



**NOVIEMBRE DE 2015** 



# MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

Punto de atención presencial: Calle 43 N° 57 - 31 CAN - Bogotá D.C,. Colombia,

PBX: (57) +1 220 0300

Línea gratuita nacional: 01 8000 910 180

Código Postal 111321

**TOMAS GONZÁLEZ ESTRADA** Ministro:

**Secretaria General Ministerio:** HERMÁN EDUARDO QUINTERO ROJAS

Viceministra:

**Supervisor del Contrato:** 

MARÍA ISABEL ULLOA CRUZ

Director de Formalización Minera: **MÓNICA MARÍA GRAND MARÍN** 

**GILSON LEON GONZALEZ** 

**Equipo Jurídico: JUAN JOSÉ PARADA HOLGUÍN** 



## UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICO - UPME

Sede: Avda. Calle 26 # 69 D-91, Piso 9°. Bogotá, Colombia

PBX: 57-1 222 06

FAX: 57 - 1 221 95 37

Línea Gratuita Nacional: 0 8000 91 17 29

**Director General:** JORGE ALBERTO VALENCIA MARIN

Subdirectora de Minería: SARA C. CÁRDENAS CASTILLO **Equipo Jurídico:** 

**GUILLERMO GÓMEZ LÓPEZ** 

**Supervisor del Contrato:** CAMILO ALEJANDRO GÓMEZ USUGA







# Equipo de Trabajo

Ph.D. Ing. José Luís Marrugo Negrete
Ph.D. Ing. José María Iraizoz
Fernández

Ph. D. Pablo Higueras Higueras MSc. Jairo Herrera Arango Ph.D. Sergi Diez Salvador

Dr. Santiago Español Cano Ph.D. Ana Carolina Ruíz Hernández MSc. Roberth Paternina Uribe Ing. Karol Velásquez Barrios

> **MSc.** Luis Díaz Vargas **MSc. Freddys Young Castro** MSc. Iván Urango Cárdenas Esp. Juan Carlos Zuñiga MSc. José Pinedo Hernández MSc. Saudith Burgos Núñez **Norbey Marin Arredondo** Geog. Juan Camilo Ospino Geog. Alvaro Ramos Tirado Ing. Ivonne Negrete Sierra Ing. Manuel Coy Pertuz Ing. Paola Burgos Arroyo Ing. Zunilda Roca Montalvo Tec. Alexis De León Navarro Mayra Luna Arcila Sully Morelo Figueroa **Ana Nieves Padilla** Ing. Jenyfer Márquez Solera Ing. Alex Lemus Madrid

Director del Estudio Profesional temático en Ingeniería de Minería

Profesional temático en Minería y recursos mineros
Profesional temático en Minería y recursos mineros
Profesional temático en Minería, Experto
internacional Minería y Ambiente
Profesional en Salud Ocupacional Minera
Experto Internacional Geoquímica Isotópica
Coordinador Operativo
Ingeniera Sanitaria y Ambiental Profesional de
Apoyo
Profesional temático en Economía

Profesional temático en Economía
Profesional en Ambiental
Experto en análisis químico
Geólogo Experto en Yacimientos
Experto en Análisis Químico Ambiental
Experta en Análisis Químico Ambiental
Profesional en estadística

Geógrafo

Geógrafo
Ingeniera Ambiental de apoyo
Ingeniero Ambiental de apoyo
Ingeniera Ambiental de apoyo
Ingeniera Ambiental de apoyo
Tecnólogo en Producción
Ingeniera Ambiental Practicante
Ingeniera Ambiental Practicante
Ingeniera Ambiental Practicante
Ingeniera de Minas y Metalurgia

Ingeniero de Minas y Metalurgia







# Tablas de contenido

# **TABLA DE CONTENIDO**

CAPITULO I. GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES	2
1.3 OBJETIVOS	2
1.4 MARCO LEGAL	2
CAPITULO II. INSTRUCCIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA GUÍA	5
2.1 TEMAS BÁSICOS DE LA GUÍA	5
2.2 USO DE LA GUÍA	5
2.3 RECOMENDACIONES	6
CAPITULO III. ACCIONES FORMALES Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS	7
3.1 LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES	7
3.2 IACAL	9
3.3 PERMISO DE VERTIMIENTO	10
CAPITULO IV. IDENTIFICACIÓN Y DIAGNOSTICO DE LOS PROCESOS QUE GENER	RAN
VERTIMIENTO	11
4.1 MINERÍA DE ORO	11
4.1.1 MINERÍA SUBTERRÁNEA	11
4.1.2 MINERÍA A CIELO ABIERTO	19
4.2 MINERÍA DE CARBÓN	23
<ul><li>4.2.1 Minería a Cielo Abierto</li><li>4.2.2 Minería Subterránea</li></ul>	23 26
CAPITULO V. TECNOLOGÍAS PARA EL MANEJO Y CONTROL DE VERTIMIENTOS	28
5.1 RECOMENDACIONES EN EL CONTROL DE EFLUENTES EN LA MINERÍA DE C	
	28
5.1.1 REDUCCIÓN DE SOLIDOS SUSPENDIDOS Y NEUTRALIZACIÓN.	29
<ul><li>5.1.2 ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS</li><li>5.1.3 LECHOS SE SECADO DE LODOS</li></ul>	30 30
5.2 RECOMENDACIONES EN EL CONTROL DE EFLUENTES EN LA MINERÍA DE OF	
5.2.1 REDUCCIÓN DE SOLIDOS SUSPENDIDOS Y NEUTRALIZACIÓN.	31
5.2.2 ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS	32
5.2.3 RELAVERAS Y LECHOS SE SECADO DE LODOS	33
5.3 PARÁMETROS DE DISEÑO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMA	AS DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA MINERÍA DE ORO Y CARBÓN	34







# Tablas de contenido

5.3.1	SEDIMENTADORES	34
5.3.2	Neutralización	40
5.3.3	FILTRO CON CARBÓN ACTIVADO	46
5.3.4	PRECIPITACIÓN QUÍMICA (COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN)	49
5.3.5	Humedales construidos	54
5.3.6	LECHOS DE SECADO	64
5.3.7	Relaveras	72
GLOS	SARIO	84
BIBLI	OGRAFÍA	86







# **Tablas de contenido**

# **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Límites Máximos Permisibles para minería de carbón y oro.	8
Tabla 2. Competencia del otorgamiento de permisos y licencia ambiental	
Tabla 3. Dimensiones recomendadas para desarenadores	
Tabla 4. Características de diseño para los diferentes tipos de filtros percoladores	
Tabla 5. Tipo de dosificador y material de revestimiento según el coagulante	51
Tabla 6. Tipo de dosificador y material de diseño de acuerdo al tipo de auxiliar de coagulac	
Tabla 7. Órdenes de magnitud de la conductividad hidráulica (Ks) en función del tipo de ma granular utilizado como substrato en un humedal construido de flujo subsuperficial	
Tabla 8. Área requerida según la fuente del lodo y el cubrimiento del lecho	69
Tabla 9. Tiempo requerido para la digestión de lodos	71
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	4.5
Illustración 1. Ciclo de explotación de oro de veta.	
Illustración 2. Esquema de beneficio de oro	
Ilustración 3. Molienda	
Ilustración 4. Concentración mineral	
Ilustración 5. Cianuración	
Ilustración 6. Amalgamación en cocos moledores	
Ilustración 7. Ciclo de explotación de oro aluvial en los sedimentos del rio.	
Ilustración 8. Ciclo de explotación de oro aluvial en terrazas.	
Ilustración 9. Ciclo de extracción del carbón- Minería a Cielo abierto	
Ilustración 10. Ciclo de beneficio del carbón	
Ilustración 11. Ciclo de extracción de carbón subterráneo.	
Ilustración 12. Desarenador	
Illustración 13. Sedimentador	
Ilustración 14. Corte longitudinal de un drenaje anóxico de calizas (DARC).	
Ilustración 15. Resalto hidráulico	53
Illustración 16. Vertedero	54
Ilustración 17. Humedal construido de flujo superficial	
Ilustración 18. Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal FSH	
Ilustración 19. Vista tridimensional con corte frontal de un lecho de secado	
Ilustración 20. Método Aguas Abajo	80







## CAPITULO I. GENERALIDADES

# 1.1 INTRODUCCIÓN

La Guía Ambiental de orientación sobre el adecuado manejo de los vertimientos mineros se constituye como una base a la orientación para el correcto manejo de vertimientos, la aplicación de acciones en los procesos mineros la facilitación en el cumplimiento de la normatividad relacionada con los límites permisibles de vertimientos para la minería de metales preciosos y de carbón.

Para el cumplimiento de las normativas vigentes, referentes al vertido de aguas de mina a cuerpos de agua superficial, las unidades de producción minera –UPM como generadores activos de vertimientos deben implementar metodologías de tratamiento que controlen los posibles contaminantes de sus aguas de mina previamente al vertidos sobre el cuerpo de agua u otro cuerpo receptor. Los procedimientos actuales conocidos y propuestos para este fin, suponen una seria carga financiera para la empresa, con unos costes que, onerosos en algunos casos, deben asumirse para evitar futuras sanciones de tipo ambiental.

En este sentido es muy importante considerar el tamaño de compañía minera, su potencial y su capacidad financiera para asumir los métodos o sistemas a implementar y, en consecuencia, realizables para la remoción de contaminantes en los vertidos de aguas de mina.

Es fundamental la propuesta y la implantación de sistemas de control y tratamiento de bajo costo para que aquellas explotaciones pequeñas puedan asumir este nuevo escenario de trabajo. Al fluir las aguas de mina a través de ambientes diferentes a los que las generaron se diluyen en aguas menos contaminadas (ríos, quebradas, arroyos, escorrentías naturales, lagos, etc.) o al reaccionar con los nuevos materiales que les rodean, se producen descensos en las concentraciones de la gran mayoría de contaminantes con la desventaja de que se producen precipitados sólidos (óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos) que recubren los lechos a través de los cuales fluyen, generando posible contaminación.

La Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales por parte del sector minero y así disminuir la contaminación de las aguas de mina por parte de las UPM, en concordancia con lo anterior en la presente *Guía Ambiental de Tecnologías para Vertimientos Mineros*, se







proponen opciones tecnológicas para el control y manejo de los vertimientos generados en las diversas etapas que componen el ciclo de explotación y beneficio minero de metales preciosos y de carbón.

### 1.2 ANTECEDENTES

Con el objetivo de lograr el cumplimiento de lo establecido por la Resolución 631 de 2015 sobre parámetros y valores límites permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, se realiza esta guía de orientación a los mineros; además se busca que estos conozcan a cerca del correcto manejo de vertimientos, para que así se implementen acciones en los procesos mineros que los ayude a suplir estos requerimientos de la legislación.

### 1.3 OBJETIVOS

- Presentar al sector minero una herramienta de gestión y correcto manejo de vertimientos y la aplicación de acciones en los procesos mineros. Esta guía debe estar orientada a facilitar el cumplimiento de la normatividad relacionada con los límites permisibles de vertimientos para la minería de metales preciosos y de carbón establecidos en la Resolución 0631 de 2015, brindando opciones tecnológicas de manejo ambiental.
- Ofrecer un instrumento de orientación que contiene las acciones de carácter conceptual y procedimental, a desarrollar para el correcto manejo de los vertimientos generados por los diferentes procesos de los subsectores mineros de metales preciosos y de carbón.

#### 1.4 MARCO LEGAL

Se realizará un análisis conceptual de las normas aplicables a las UPM que realizan vertimientos, con el fin de obtener un análisis del marco legal aplicable a la guía de orientación para el minero sobre el correcto manejo de vertimientos.

En primer término, debe tenerse en cuenta el contenido del Decreto 2811 de 1974 "Código Nacional de Recursos Naturales Renovables (RNR) y de Protección al Medio Ambiente", como el primer marco normativo en América Latina que recogió los principios establecidos en la conferencia de Estocolmo sobre Medio Humano de 1972. En este se considera al ambiente como un patrimonio común, el Estado y los







particulares deben participar en su preservación y manejo, adicionalmente regula el manejo de los RNR, la defensa del ambiente y sus elementos.

En el Artículo 138° -Prevención y control de contaminación, "se fijaran zonas en que quede prohibido descargar, sin tratamiento previo y en cantidades y concentraciones que sobrepasen los niveles admisibles, aguas negras o residuales de fuentes industriales o domésticas, urbanas o rurales, en las aguas, superficiales o subterráneas, interiores o marinas" y en el Artículo 150° aguas subterráneas, "se organizara la protección y aprovechamiento de aguas subterráneas".

El Decreto 1449 de 1977 sobre disposiciones sobre conservación y protección de aguas, bosques, fauna terrestre y acuática, en su Artículo 2 estipula que "en relación con la conservación, protección y aprovechamiento de las aguas, los propietarios de predios están obligados a no incorporar en las aguas cuerpos o sustancias sólidas, líquidas o gaseosas, tales como basuras, desechos, desperdicios o cualquier sustancia tóxica, o lavar en ellas utensilios, empaques o envases que los contengan o hayan contenido".

En el Decreto 1541 de 1978, los artículos del 211 a 219 están enfocados al control de vertimientos y en el Artículo 231, dispone la reglamentación de vertimientos a una corriente o depósito de agua, el cual fue derogado por el Decreto 3930 de 2010.

En el Decreto 1594 de 1984 referente a normas de vertimientos de residuos líquidos, en los Artículos del 37° a 50° -Criterios de calidad de agua, Artículos del 60° a 71°, Vertimiento de residuos líquidos y los Artículos del 72° a 97° Normas de vertimientos. Derogado por el Decreto 3930 de 2010, estos decretos fueron recogidos por el decreto 1079 de mayo de 2015.

La Constitución Política de 1991, en su Artículo 8°, establece la obligación del Estado y de las personas para la conservación de las riquezas naturales y culturales de la nación, al mismo tiempo en el artículo 80°, establece la planificación del manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.

La reforma constitucional pone sobre la mesa la situación de la institucionalidad ambiental existente, dando como resultado la Ley 99 de 1993, con la que se crea el Ministerio del Medio Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y reforma el sector público encargado de la gestión ambiental.

En 1997 se promulga la Ley 373, mediante la cual se constituye el programa para el uso eficiente y ahorro del agua, en su Artículo 5°, reúso obligatorio del agua." Las aguas utilizadas, sean éstas de origen superficial, subterráneo o lluvias, en cualquier actividad







que genere afluentes líquidos, deberán ser reutilizadas en actividades primarias y secundarias cuando el proceso técnico y económico así lo ameriten y aconsejen según el análisis socio-económico y las normas de calidad ambiental".

Bajo este contexto, y con el fin de recopilar las regulaciones establecidas para el vertimiento generado a cuerpos de agua superficiales o subterráneos, en 2010 se reglamenta el Decreto 3930 con las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.

En diciembre de este mismo año, se modifica parcialmente el decreto anterior, por el Decreto 4728, fijando los parámetros y los límites máximos permisibles de los vertimientos a las aguas superficiales marinas, a los sistemas de alcantarillado público y al suelo en su Artículo 1°.

Además El Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial se compromete a que dentro de los diez (10) meses, contados a partir del 23 de diciembre de 2010, fecha de la publicación del Decreto 4728, a expedir las normas de vertimientos puntuales a aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, Igualmente, deberá establecer las normas de vertimientos al suelo y aguas marinas, dentro de los treinta y seis (36) meses, contados a partir de la fecha de publicación.

El 17 de marzo de 2015 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece los parámetros y los valores límites permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, fijando los valores máximos permisibles de los parámetros fisicoquímicos en los diferentes sectores productivos en Colombia, en concordancia con el decreto 4728 de 2010.







# CAPITULO II. INSTRUCCIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA GUÍA

# 2.1 TEMAS BÁSICOS DE LA GUÍA

Esta Guía Ambiental de Tecnologías para Vertimientos Mineros contiene los aspectos generales para el tratamiento de los efluentes mineros y la forma en que se puede reducir la concentración de contaminantes. Se proponen sistemas de tratamiento para las aguas de mina originadas en la minería de metales preciosos y carbón.

La Guía Ambiental de Tecnologías para Vertimientos Mineros se encuentra dividida en cinco capítulos, en donde se detallan los procesos mineros en los cuales se generan los vertimientos proponiendo medidas de diseño, construcción, implementación y puesta en marcha de sistemas de tratamiento para la remoción de contaminantes presentes en las aguas de mina.

Adicionalmente, se establecen las obligaciones por parte de las UPM para el cumplimiento de la normatividad ambiental relacionada con la documentación necesaria para tramitar el permiso de vertimientos líquidos ante la autoridad ambiental competente y se exponen los límites máximos permisibles para las descargas de aguas de mina sobre cuerpos de agua superficial, en concordancia con lo establecido en la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

# 2.2 USO DE LA GUÍA

Los capítulos que comprenden esta guía guardan estrecha relación; sin embargo, en cada uno de ellos, el lector podrá analizar cada temática en particular.

En el Capítulo 1 se realiza una introducción de la guía, los antecedentes y objetivos de la misma y el marco legal basado para la construcción de esta.

En el Capítulo 2 se especifican los temas básicos, tales como el uso de esta y algunas recomendaciones prácticas.

En el Capítulo 3 se describen los requisitos para el cumplimiento de la normatividad ambiental relacionada con los límites permisibles de vertimientos para la minería de metales preciosos y de carbón establecidos en la Resolución 0631 de 2015 y las estrategias para mejorar la calidad del vertimiento.







En el Capítulo 4 se identifican y describen los procesos que generan vertimiento en minería de oro y minería de carbón detallando las diferentes tecnologías que se utilizan en cada uno de ellos así como las características generales de los vertimientos.

En el Capítulo 5 se presenta un análisis exhaustivo de las opciones tecnológicas disponibles para el control y manejo de los vertimientos generados en las diversas etapas que componen el ciclo de explotación y beneficio minero, tanto para minería de oro como para minería de carbón.

Finalmente se presenta la bibliografía utilizada y un glosario de términos.

### 2.3 RECOMENDACIONES

Se recomienda al usuario analizar e identificar las características específicas de los procesos que esté realizando en la actividad minera que desarrolla y determinar la validez de aplicación de las tecnologías propuestas para el manejo y tratamiento de los vertimientos.

Si la tecnología se ajusta al vertimiento generado por la actividad, adóptela. Si por el contrario, no se ajusta, tome la medida correctiva que más se acomode a sus condiciones; esta deberá estar enfocada a facilitar el cumplimiento de la normatividad relacionada con los límites permisibles de vertimientos para la minería de metales preciosos y de carbón establecidos en la Resolución 631 de 2015 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. La Guía es un documento flexible y de orientación que busca agilizar la gestión ambiental y que debe ser ajustada a las características propias de la actividad.







# CAPITULO III. ACCIONES FORMALES Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS

# 3.1 LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES

Los vertimientos generados por la actividad minera están regulados por la norma presentada el 17 de marzo del 2015, Resolución 0631 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible donde se establecen los parámetros y los valores Límites Máximos Permisibles (LMP) en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas residuales, sin considerar el volumen de la descarga ni la capacidad de asimilación del cuerpo receptor y se constituyen cuáles son los parámetros fisicoquímicos a monitorear.

Esta norma de vertimientos reglamenta el artículo 28° del Decreto 3930 de 2010, que deroga el Decreto 1594 de 1984, con el objetivo de ejercer control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua, generadas de los sectores económicos del país, en esta guía se hará énfasis en la minería de oro y carbón.

El control de los parámetros se realizará a partir de la medición de la cantidad de sustancias descargadas, la cual tiene un efecto directo en la calidad del agua. La medición se realizará en mg/l para obtener un valor a partir de la concentración.

En esta norma se revisara los vertimientos puntuales que se realizan en la minería de metales preciosos (oro) y carbón, considerando 56 parámetros, entre características físicas y químicas, para cada uno se estableció un límite máximo permitido cumplible con los recursos técnicos, tecnológicos y económicos.

En la Tabla 1 se muestra los límites máximos permisibles para el caso específico de la minería de carbón y oro.







Tabla 1. Límites Máximos Permisibles para minería de carbón y oro.

Parámetro	Unidades	Extracción de carbón de piedra y lignito	Extracción de oro y otros metales preciosos
рН	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6 a 9
Demanda Química de Oxigeno (DQO)	mg/l O <sub>2</sub>	150,00	150,00
Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO₅)	mg/l O <sub>2</sub>	50,00	50,00
Solidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	50,00	50,00
Solidos Sedimentables (SSED)	mg/l	2,00	2,00
Grasas y Aceites	mg/l	10,00	10,00
Fenoles	mg/l	0,20	0,20
Sustancia Activa Azul De Metileno (SAAM)	mg/l	Análisis y Reporte	
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/l	10,00	10,00
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)		Análisis y Reporte	
BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno)		Análisis y Reporte	
Compuestos Orgánicos, Halogenados, Adsorbibles (AOX)		Análisis y Reporte	
Compuestos De Fosforo			
Organofosfatos (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/l	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Fosforo Total (P)	mg/l	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos Nitrogenados			
Nitratos(N-NO <sub>3</sub> -)	mg/l	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitritos(N-NO <sub>2</sub> -)	mg/l	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno amoniacal (N-NH <sub>3)</sub>	mg/l	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/l	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
IONES			
Cianuro Total (CN <sup>-</sup> )	mg/l	1,00	1,00
Cloruros(Cl <sup>-</sup> )	mg/l	500,00	500,00
Sulfatos (N-NO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/l	1.200,00	1.200,00
Sulfuros (S <sup>2-</sup> )	mg/l	1,00	1,00
Metales y Metaloides			
Arsénico (As)	mg/l	0,10	0,10
Cadmio (Cd)	mg/l	0,05	0,05
Cinc (Zn)	mg/l	3,00	3,00
Cobre (Cu)	mg/l	1,00	1,00
Cromo (Cr)	mg/l	0,50	0,50
Hierro (Fe)	mg/l	2,00	2,00
Mercurio (Hg)	mg/l	0,002	0,002
Níquel (Ni)	mg/l	0,50	0,50
Plata (Ag)	mg/l	0.00	0,20
Plomo (Pb)	mg/l	0,20	0,20
Otros parámetros para Análisis y Reporte		Andlinia v Danasta	An Aliain v. Demanta
Acidez Total	mg/l CaCO₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/l CaCO₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálcica	mg/l CaCO₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/l CaCO₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (Medida de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm).	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Fuente: Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible







Las autoridades ambientales son las responsables de hacer un seguimiento y control al cumplimiento de la norma sobre quienes desarrollen actividades mineras y en su proceso de beneficio generen aguas residuales no domésticas vertidas sobre cuerpos de agua superficiales.

A lo largo de la guía se propondrán estrategias, acciones, tratamientos y tecnologías, para mejorar el vertimiento de la UPM. En especial aquellos parámetros como el pH, DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, grasas y aceites, cloruros, sulfatos y metales pesados, que se ven alterados normalmente en las operaciones unitarias desarrolladas en las minería aurífera y de carbón evidenciada en el país.

### 3.2 IACAL

Las fuentes hídricas superficiales reciben y transportan cargas de agua utilizadas en los diferentes procesos socioeconómicos y vertidas, por lo general, sin tratamiento previo; además, son los receptoras de altos volúmenes de sedimentos originados por procesos de erosión, bien sea de origen natural o por acción del hombre<sup>1</sup>. Dicho esto de hace necesario que cada unidad generadora de carga contaminante puntual (vertimiento) realice un monitoreo y control constante que permita tomar las acciones necesarias para abordar esta problemática con el fin de disminuir su impacto en los procesos naturales y sociales, especialmente en la salud humana.

El Índice sobre la alteración potencial de la calidad del agua (IACAL), permite evidenciar la variación significativa de la calidad del agua a partir de la presión de la carga contaminante que ejercen diferentes actividades sectoriales sobre las condiciones de calidad hídrica<sup>2</sup>, realizando la estimación de valores como: carga contaminante, demanda biológica de oxigeno DBO, demanda química de oxigeno DQO, sólidos suspendidos totales SST, nitrógeno total NT y fósforo total PT, entre otros. Igualmente permite estimar la presión sobre cuerpos de agua por vertimientos de mercurio, uso químicos cultivos ilícitos y uso de agroquímicos<sup>3</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> IDEAM, Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá, D. C., 2015. 496 páginas.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL DE COLOMBIA. Calidad del agua. Recuperado el 18 de 11 de 2015 de https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=860&conID=1373.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> IDEAM, Estudio Nacional del Agua 2014. Op. Cit.







## 3.3 PERMISO DE VERTIMIENTO<sup>4</sup>

Es la aprobación que otorga la autoridad ambiental a una persona natural o jurídica y a las entidades gubernamentales (sin excepción) para realizar una disposición final de los residuos líquidos generados en desarrollo de una actividad con previo tratamiento.

Dependiendo de la explotación proyectada, la licencia y permisos ambientales se deben solicitar ante la ANLA o ante la CAR de la jurisdicción que corresponda a la ubicación del proyecto de acuerdo al siguiente cuadro:

Tabla 2. Competencia del otorgamiento de permisos y licencia ambiental

Tema	ANLA	CAR
Carbón	Explotación proyectada mayor o igual a 800.000 ton/año	Explotación proyectada menor a 800.000 ton/año
Materiales de construcción y arcillas o minerales industriales no metálicos	Producción proyectada mayor o igual a 600.000 ton/año para las arcillas o igual a 250.000 m³/año para otros materiales de construcción o para minerales no metálicos	
Minerales metálicos y piedras preciosas y semipreciosas	Remoción total de material útil y estéril proyectada sea mayor o igual a 2.000.000 de ton/año	Remoción total de material útil y estéril proyectada sea menor a 2.000.000 de ton/ año
Otros minerales y materiales	Cuando la explotación de mineral proyectada sea mayor o igual a 1.000.000 ton/año	Cuando la explotación de mineral proyectada sea menor o igual a 1.000.000 ton/año

En cumplimiento con lo establecido por la Agencia Nacional de Minería (ANM) en los documentos de trámites ambientales, se señala toda la información necesaria para solicitar un permiso de vertimientos, documento que se puede encontrar en la página web de la ANM. <sup>5</sup>

10

 <sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Agencia Nacional Minera. (2015). Obtenido de http://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/permisos\_ambientales.pdf
 <sup>5</sup> Ibíd.







# CAPITULO IV. IDENTIFICACIÓN Y DIAGNOSTICO DE LOS PROCESOS QUE GENERAN VERTIMIENTO

En este capítulo se encontrara todo lo concerniente a las operaciones unitarias de la minería de metales preciosos y carbón, se describirán todas las operaciones unitarias, pero se hará énfasis especial en aquellas que generan algún tipo de vertimiento puntual a cuerpos de agua que es el objetivo de la guía, para mayor facilidad esta se dividirá inicialmente en dos secciones, una dedicada a la minería de oro y la otra de carbón; dentro de cada división se encontraran por separados, los tipos de minería (a cielo abierto o subterránea) y por último se encuentran divididas las etapas de extracción y beneficio de cada una, resaltando que la mayoría de los vertimientos se encuentran en esta última etapa.

En las visitas de campo a las UPM estudiadas se evidencio que la mayoría de los vertimientos de la minería aurífera se generan en la etapa de beneficio del mineral, específicamente en la etapa de concentración mineral.

Por su parte las UPM visitadas de la minería carbonífera solo genera vertimientos en la etapa de extracción mineral, específicamente en la operación desagüe.

# 4.1 MINERÍA DE ORO

#### 4.1.1 Minería Subterránea

La minería aurífera en el país se lleva acabo ejecutando varios procesos, a continuación se identificaran las operaciones unitarias realizadas.

### 4.1.1.1 Etapa de Explotación

Durante el ciclo de extracción del mineral, se llevan a cabo una serie de operaciones unitarias que componen el proceso de explotación. Se diferencian entre las que están directamente relacionadas con la extracción de mineral y aquellas consideradas auxiliares. Para efectos de este documento se mencionan las operaciones unitarias más relevantes, ya que dentro de las unidades de producción minera cobijadas en el estudio, ninguna de ellas representa una demanda de agua o genera algún tipo de vertimientos, con excepción del desagüe de las aguas de mina.

No obstante, debe tomarse en cuenta que cuando se ejecuta la operación de arranque mediante perforación y voladura, en algunos casos, se utiliza agua para la lubricación de la barrena y el control de detritos aunque esta es en muy pocas cantidades







comparada con las actividades de beneficio mineral y dentro de las visitas de campo la UPM no lo implementaban.

A continuación se muestra en un esquema el ciclo de extracción mineral y se realizaría una breve descripción de ellas.

**Ilustración 1.** Ciclo de explotación de oro de veta.



- Arranque: La perforación y la voladura son las actividades fundamentales para adelantar las labores de desarrollo, preparación y explotación. Los equipos son seleccionados de acuerdo con las características y requerimientos de cada método. El avance tecnológico en los equipos de perforación ha revolucionado la minería subterránea con métodos de grandes barrenos largos. Igualmente los accesorios de perforación y voladura son típicos de cada método, siendo estos seleccionados en función de la aplicación específica que se requiera y de las condiciones del medio en que se utilizarán. El arranque en las minas de oro se realiza por medio de perforación y voladuras, para lo que se utilizan equipos como: martillos neumáticos, martillos eléctricos, compresores de aire y explosivos.
- <u>Cargue y Transporte:</u> En particular la operación de cargue en los frentes de trabajo se realiza principalmente de manera manual con palas. Las minas menos tecnificadas transportan el material internamente usando caretillas, baldes o inclusive sacos, con una gran demanda de fuerza bruta (esfuerzo humano), para este cargue y transporte se utilizan los siguientes equipos: palas mecánicas, cajón de extracción (*skip*), malacate, vagonetas, coches colgantes y cargadores.







- <u>Sostenimiento</u>: Esta operación unitaria garantiza la estabilidad de las obras subterráneas, esta puede ser temporal o definitiva, dependiendo del sitio en que se utilice. Normalmente se utilizan pernos, cables, arcos de acero, concreto lanzado o concreto en vías de larga duración, mientras que en vías temporales o de corta vida se utiliza madera. Se han desarrollado diversos sistemas de fortificación que son aplicados en casos especiales. La madera es de uso universal en la fortificación. Existen diversos tipos de refuerzos con madera, los cuales se utilizan dependiendo del tipo de problema que se esté atacando."
- <u>Ventilación</u>: La ventilación es la operación minera responsable de garantizar el ambiente subterráneo apto para el trabajo de los mineros, mediante la evacuación y/o dilución de gases y polvos. Se divide en dos tipos: principal y secundaria. El circuito de ventilación depende del método minero particular utilizado<sup>6</sup>. Para lograr establecer circuitos de ventilación se usan ventiladores principales y auxiliares, ductos de ventilación, entre otros.
- Desagüe: Esta operación unitaria consiste en evacuar las aguas resultantes durante la actividad minera. Estas pueden ser percolantes, infiltradas de fuentes superficiales o introducidas por el hombre para las actividades mineras. "El desagüe puede conseguirse por gravedad o por bombeo, cabe resaltar que esta calidad del agua es un parámetro importante para la selección de los equipos de bombeo." Dentro de los equipos más utilizados para realizar esta operación se encuentran las bombas de Achique. El desagüe es el proceso de mayor atención dentro del ciclo explotación minera en cuanto al objetivo principal de esta guía, debido a que es la única que genera un vertimiento, estas aguas de mina provenientes de los socavones auríferos contienen una cantidad de contaminantes entre ellos se destacan los elementos que contengan la roca de caja del depósito mineral como (hierro, plomo, sílice, arsénico, entre otros), además de traer una cantidad de solidos suspendidos.
- Retrollenado: Esta actividad solo se llevaba a cabo en las UPM estudiadas en el distrito minero de Istmina, esta implica demanda de recurso hídrico. Consiste en utilizar las colas de la planta de beneficio para conformar un pasto ducto (usando agua para que la corriente fluya) y rellenar antiguos frentes de trabajo abandonados dentro de las excavaciones hechas para la mina.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Monsalve Oliveros, J. E. (2013). Minería Subterranea. Notas de clase. Medellín: Universidad Nacional.

Monsalve Oliveros, J. E. (2013). Minería Subterranea. Notas de clase. Medellín: Universidad Nacional.







# 4.1.1.2 Etapa de Beneficio

Esta etapa del proceso minero aurífero es una de las más claves debido a que la mayoría de los vertimientos se generan en estas operaciones unitarias. Es importante aclarar que dependiendo del tipo de proceso que se tenga en la planta de beneficio se generaran varios tipos de vertimientos con diferentes contaminantes, por ejemplo, si el proceso se realiza en un circuito cerrado, el vertimiento generado en la última etapa de concentración es diferente al generado en la etapa de cianuración, este último viene con un contamínate peligroso adicional como lo es el cianuro, por lo que requiere de una mayor atención y un sistema de tratamiento diferente, por su parte el vertimiento de las etapas de concentración trae consigo los elementos que contiene la roca de caja del mineral, una cantidad considerable de solidos suspendidos y metales pesados.

Cuando los procesos no son continuos, como en la mayoría de las UPM de pequeña escala, se recomienda que se dirijan todos los vertimientos de las operaciones unitarias a un punto en común para formar uno solo y así facilitar la instalación de los sistemas de tratamiento.

El conjunto de operaciones realizadas en las plantas de beneficio que se describirán a continuación están orientadas a conseguir la separación del oro como metal de interés y su recuperación final.

Ilustración 2. Esquema de beneficio de oro









- <u>Trituración:</u> Generalmente es la primera etapa en el procesamiento mineral, aunque en algunas ocasiones primero se realiza una separación del material en cribas o mallas. Con esta operación lo que se busca es reducir el tamaño inicial de la roca hasta que este pueda tener un tamaño óptimo para pasar a la etapa de molienda. Se acostumbra usar el término para los procesos de conminución donde se opera con tamaños de partícula gruesa superiores a 2".8 Los equipos usados para la conminución del material trabajan por vía seca en su mayoría, algunas de ellas son: trituradora de quijadas, de impacto y de rodillos, entre otros.
- Molienda: Es una operación para reducción de tamaño de partículas, generalmente alrededor del rango de 1/2" 3/8", esta operación se hace con el objetivo de aumentar el grado de liberación de los minerales de interés e incrementar el área superficial disponible para reacción química. Esta se realiza después de la etapa de trituración y puede seguir primaria y secundaria. Los equipos usados para la molienda del material trabajan en vía húmeda en la mayoría de los casos y son las siguientes: molino de bolas, molino californiano, molino chileno, molino de martillos, barriles o "cocos" moledores, entre otros.

### Ilustración 3. Molienda



15

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Bustamante, M. O. (2009). Mineralurgia. Notas de Clase. Medellín: Universidad Nacional. Facultad de Minas.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Bustamante, M. O. (2009). Mineralurgia. Notas de Clase. Medellín: Universidad Nacional. Facultad de Minas.

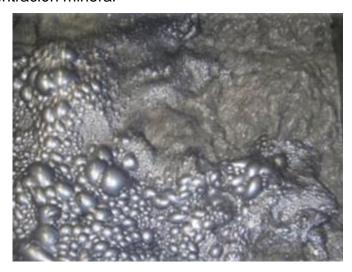






- <u>Clasificación:</u> Es una operación unitaria en la que se da la separación de un material con una distribución de tamaño de partículas determinada en dos corrientes, en una predominan los tamaños gruesos y en la otra los finos. Se lleva a cabo con el fin de garantizar ciertas condiciones en un material para operaciones posteriores. <sup>10</sup> Los equipos usados para la clasificación del material trabajan en vía húmeda y algunos de ellos son: trommel, tornillo helicoidal e hidrociclón, entre otros.
- Concentración: "Es la operación en la cual se eleva el tenor o concentración (en porcentaje) de una mena o mineral determinado, mediante el uso de equipos de separación. Produciéndose así la segregación de dos o más especies mineralógicas y generar una corriente enriquecida en un mineral de interés." Vale la pena resaltar que esta es la etapa del proceso de beneficio aurífero que demanda un mayor consumo de agua y genera también un mayor vertimiento, sin embargo a diferencia del generado en la etapa de cianuración contiene menos sustancias peligrosas y por ende se hace más fácil su tratamiento. Los equipos usados para la concentración del material trabajan en vía húmeda y algunos de ellos son: Canalón, Jig, Mesa Wilfley, Celdas de flotación, entre otras.

### Ilustración 4. Concentración mineral



16

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Bustamante, M. O. (2009). Mineralurgia. Notas de Clase. Medellín: Universidad Nacional. Facultad de Minas.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Bustamante, M. O., Gaviria, A. C., & Restrepo, O. J. (2008). Concentración de Minerales. Notas de curso. Medellín: Universidad Nacional. Facultad de Minas.







Cianuración: Es el proceso que utiliza la propiedad del oro de disolverse en una solución de cianuro de sodio, en presencia de oxígeno. Los minerales presentes en la ganga son insolubles en el cianuro, lo cual garantiza un mayor grado de recuperación de oro. Este proceso se lleva a cabo por medio de operación dinámica, ya que se somete a agitación en una serie de tanques en los que el oro se disuelve formando un complejo con el cianuro, luego esta solución rica pasa al proceso Merril Crowe donde se recupera el oro. El vertimiento generado en esta etapa es de mucho cuidado debido a que el principal contaminante es el cianuro.

#### Ilustración 5. Cianuración



- <u>Recuperación de oro:</u> En la amplia mayoría de las unidades de producción del país se encuentra que actividades como fundición y la quema de amalgama se hacen en sitios a parte de la planta de beneficio. En los lugares donde ejecutan lixiviación del oro mediante cianuración aplican el proceso de Merril-Crowe para la recuperación del mismo, que se describirá a continuación.
- <u>Amalgamación:</u> Amalgama es la denominación dada una aleación de mercurio con otro metal. En minería aurífera "[...] la amalgamación es un proceso de







concentración basado en la adherencia preferencial del oro por el mercurio, en presencia de agua y aire". 12

## Ilustración 6. Amalgamación en cocos moledores



- Proceso MERRIL CROWE: este es la última operación unitaria para la recuperación del oro y se subdivide a su vez en las siguientes etapas:
  - Clarificación: En esta etapa se busca eliminar las partículas sólidas en solución por lo cual se realiza una filtración de la solución.
  - Desoxigenación: El oxígeno que fue útil en el proceso de Cianuración debe ser anulado, ya que el zinc requiere una condición reductora, por lo que se utilizan bombas de vacío para eliminar el oxígeno.
  - Precipitación de oro: La solución de cianuro-oro libre de finos, se bombea a tanques herméticamente cerrados en dónde se adiciona cinc en polvo y acetato de plomo para la precipitación y sedimentación del mineral. La descarga de las unidades Merril Crowe entregan dos productos, un precipitado de oro con impurezas (zinc y plomo) y una solución estéril de cianuro de zinc, que se trata y

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>Valderrama, L., Chamorro, J., Olguín, D., Rivera, J., & Oyarce, J. (2012). AMALGAMACIÓN DE CONCENTRADO DE ORO OBTENIDO EN CONCENTRADOR KNELSON. Revista de la Facultad de Ingenieria. Universidad de Atacama, 33-38.







se recicla al proceso. Se adiciona al proceso zinc en exceso, debido a que el OH en la solución tiende a disolverlo.

- Filtrado: Aquí se realiza la recuperación del concentrado rico en oro y el polvo de zinc en exceso.
- Recirculación: La solución estéril que aún contiene cianuro es recirculada al proceso y se le ajusta a la concentración de entrada al proceso.
- Fundición: En este proceso el precipitado de oro y otros minerales, se funde para obtener el lingote.

La mayoría de los equipos usados en la recuperación de oro no tienen un consumo de agua, solo el clarificador y siempre está agua es la proveniente del proceso de cianuración, por su parte en los esperadores buscan es retirar agua para espesar la pulpa, las tecnologías son las siguientes: clarificador, filtro prensa y espesador.

#### 4.1.2 Minería a Cielo Abierto

La minería aurífera a cielo abierto se presenta por lo general en depósitos de oro aluvial, ya que la mayoría de vetas auríferas se explotan mediante minería subterránea (existiendo algunas excepciones no predominantes en el país), esta se puede dividir en dos tipos, una que recupera el oro de los sedimentos que van en el rio y la otra el que fue depositado en terrazas aluviales de antiguos abanicos.

A continuación se definirán las operaciones unitarias de las etapas de explotación y beneficio.

## 4.1.2.1 Etapa de Explotación

El ciclo de explotación de una UPM aluvial (sedimentos en el río) consta de varias etapas, las que se caracterizan a continuación, resaltando que la tecnología principal con la que se realiza el dragado (draga de succión) tiene un uso y vertimiento de agua elevado.

A continuación se muestra el esquema de explotación aluvial en el rio.







**Ilustración 7**. Ciclo de explotación de oro aluvial en los sedimentos del rio.



- <u>Descapote:</u> Consiste en la remoción inicial de la capa vegetal y suelo orgánico orientado a crear un acceso al depósito mineral.<sup>13</sup> Los equipos que se utilizan en la minería aluvial por dragas para la remoción de la capa vegetal son las excavadoraretroexcavadoras.
- Extracción del material: Esta operación consiste en remover los sedimentos del río junto con agua por medio de tuberías ubicadas dependiendo de la profundidad a la cual se encuentren las capas de sedimentos con contenidos de oro recuperables. Los equipos utilizados para la extracción de estos son: draga de succión o dragas de cuchara. Para una mayor claridad en el tema, ambos equipos se definen a continuación:

**Draga de succión:** "Este tipo de dragas son básicamente embarcaciones que navegan por autopropulsión sin cables de anclaje y utilizan un compensador de oleaje. [...] La cabeza de arrastre encargada de extraer el material y conducirlo hasta la boca de succión se construye en diferentes modelos [...] la descarga del material dragado se efectúa normalmente a tierra mediante tubería. [...] Comúnmente su capacidad de transporte varía normalmente entre 500m³ y 3500m³." <sup>14</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Montaño, J. F. (2012). Maquinaria y Transporte Minero. Apuntes de curso. Medellín: Universidad Nacional. Facultad de Minas.

<sup>14</sup> Herrera Herbert, J. (2006). Métodos de Minería a Cielo Abierto. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.







**Draga de cuchara:** "[...] El principio de trabajo es igual al de una excavadora, donde la cuchara describe en un plano vertical un arco que, con la ayuda de los dientes en cuyo extremo se concentra la fuerza de excavación con altas cargas puntuales, permite arrancar una rebanada de material hasta llenarlo. [...] Varían considerablemente en tamaño fuerza y capacidad." <sup>15</sup>

- <u>Recuperación de oro:</u> En esta etapa se realiza la recuperación del oro mediante procesos como concentración mineral utilizando equipos como canalones.
- <u>Perfilaje de la Zona:</u> Consiste en reacomodar las gravas, arenas y arcillas para formar cargueros de material estéril, que posteriormente se deben recuperar ambientalmente.

A continuación se muestra el esquema de explotación aurífera en terrazas aluviales.

**Ilustración 8.** Ciclo de explotación de oro aluvial en terrazas.



<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Herrera Herbert, J. (2006). *Métodos de Minería a Cielo Abierto*. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.







- <u>Descapote:</u> Consiste en la remoción inicial de la capa vegetal y suelo orgánico orientado a crear un acceso al depósito mineral.<sup>16</sup> Los equipos que se utilizan en la minería aluvial por dragas para la remoción de la capa vegetal son las excavadorasretroexcavadoras.
- Arranque del material: Este proceso consiste en desprender el material ya sea suelto o compacto del frente de explotación y descargarlo en las clasificadoras donde se realizara el proceso de beneficio del metal. Los equipos utilizados en este proceso son las mismas excavadoras retroexcavadoras.
- <u>Reconformación y Revegetalización:</u> Consiste en reacomodar las gravas, arenas y arcillas que son material estéril, para posteriormente realizar el retro llenado del frente de explotación. Los equipos utilizados para realizar el perfilaje de la zona son los buldócer o las retroexcavadoras.
- Retro Ilenado: "[...] Consiste en depositar los estériles provenientes de la explotación, en el sitio más profundo del hueco." Esto con el fin de preparar el frente abandonado para su posterior cierre<sup>17</sup>.Los equipos utilizados en este proceso son las excavadoras retroexcavadoras y bomba-dragas.
- <u>Bombeo:</u> Toda el agua que se utiliza en el proceso de beneficio del mineral en la clasificadora o canalón debe ser evacuada hacia unas piscinas de sedimentación, los equipos usados para esto son: Bombas de Achique, Bomba-draga, entre otros.

## 4.1.2.2 Etapa de Beneficio

Las operaciones unitarias de beneficio para oro aluvial son clasificación y concentración (principalmente gravimétrica), pues a diferencia de los depósitos de vetas el oro se encuentra libre y no asociado a sulfuros. Se limita solo a mención de estas operaciones unitarias, pues fueron descritas con anterioridad en el documento.

Cabe mencionar que en algunas UPM se implementa el uso de amalgamación para la recuperación del mineral aurífero.

\_

<sup>16</sup> Montaño, J. F. (2012). Maquinaria y Transporte Minero. Apuntes de curso. Medellín: Universidad Nacional. Facultad de Minas.

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> SENA. (2011). Fundamentos de minería a cielo abierto. Boyaca: Centro Nacional Minero.







En la mayoría de las UPM auríferas que se visitaron en el marco del proyecto, se pudieron evidenciar muchas cosas, la primera de ellas es que las etapas de concentración mineral son las que generan mayores vertimientos, pero estos vienen con menos sustancias contaminantes que los provenientes de la etapa de cianuración.

# 4.2 MINERÍA DE CARBÓN

La operaciones unitarias dentro de la minería de carbón del país además de tener una demanda de agua mucho más baja, sus vertimientos son pocos, solo se generan durante la etapa de desagüe de las minas subterráneas, y en las operaciones a cielo abierto se genera vertimiento de las aguas de escorrentía de los botaderos y pits, por su parte en las etapas de beneficio solo el lavado del carbón genera un vertimiento alguno.

#### 4.2.1 Minería a Cielo Abierto

## 4.2.1.1 Etapa de Explotación

Durante el ciclo de explotación de carbón mediante minería de superficie se llevan a cabo las siguientes operaciones unitarias, haciendo la aclaración que estas operaciones se realizan sin generar ningún tipo de vertimiento pero con el fin de conocer cuál es en general el ciclo de extracción del carbón se mencionaran y se les realizará una corta descripción, en la minería de carbón a cielo abierto los vertimientos son generados por las aguas de escorrentía en infiltración de los botaderos de estéril y del pit.

Ilustración 9. Ciclo de extracción del carbón- Minería a Cielo abierto









- Remoción de capa vegetal: consiste en la extracción del suelo y la capa vegetal que cubre el depósito y permitirá el acceso al mismo, es la primera operación dentro del desarrollo minero y la preparación de los bancos de explotación.<sup>18</sup>
- Extracción de estéril: se trata de la extracción de las capas de material estéril se ubica entre los mantos de carbón dentro de un depósito específico. Dado que este material no es de interés económico debe retirarse de forma separada al carbón y llevarse a botaderos diseñados para acopiar dicha roca estéril. Usualmente los equipos para el trasporte de este son de mayor dimensión que para la extracción de carbón pues la cantidad de carga a mover es mayor.<sup>19</sup>
- Extracción del carbón: una vez se realiza la preparación de los bancos y se realizan las vías de acceso a la mina tanto internas como externas, se procede a extraer el carbón, estas, al igual que para la remoción del estéril, están determinadas por el método de explotación seleccionado como se mencionó anteriormente. Antes, es necesario realizar la limpieza del manto de carbón, la cual se puede ejecutar con tractor de orugas, tractor sobre llantas, motoniveladoras o, si así se prefiere, manualmente. La extracción propiamente dicha se puede realizar mediante una combinación buldócer/cargador, excavadoras hidráulicas, palas eléctricas cuando el espesor y el buzamiento lo permiten o mineros continuos de superficie.<sup>20</sup>
- Cargue y Transporte: se utilizan generalmente dos métodos de cargue: cíclico y continuo. En el primero de ellos, los ciclos se cumplen a través de la siguiente secuencia: parqueo de volquetes, llenado de cucharón, cargue y despacho de vehículo. Los equipos utilizados en este método son las palas de empuje, retroexcavadoras, cargadores frontales sobre llantas, dragalinas y grúas de almejas. Por su parte, en el método continuo se efectúan las mismas operaciones que en el anterior, pero en forma sucesiva e ininterrumpida. Los equipos que se utilizan en él, son las ruedas de cangilones que alimentan bandas transportadoras y los mineros continuos.<sup>21</sup>
- Acopio: El acopio o almacenamiento de carbón se hace con el fin de compensar las diferencias que existen entre producción, transporte y despachos de carbón

<sup>20</sup> ibíd.

<sup>21</sup> ibíd.

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Unidad de planeación minero energética. "guía ambiental minería de carbón a cielo abierto". 2005

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> ibíd.







(consumo). Los sistemas de almacenamiento de carbón más utilizados son las pilas y los silos.<sup>22</sup>

• Disposición de estériles: debido a que se producen grandes cantidades de material estéril, las cuales deben ser objeto de manejo para su almacenamiento en condiciones adecuadas de estabilidad, seguridad e integración al entorno. Tales depósitos se conocen comúnmente como escombreras ó botaderos de estéril. Los materiales estériles son de litologías distintas y granulometría variables, razón por la cual presentan problemas físicos e incluso químicos, para la implantación posterior de la vegetación. Por lo general, predominan los estériles en forma de fragmentos gruesos con una distribución espacial distinta a la que existía dentro de los depósitos, como consecuencia de la segregación que sufren las partículas al ser depositadas dentro de las escombreras. Para la implementación de una escombrera, deberán adelantarse estudios previos que consideren, al menos, los siguientes aspectos: ubicación y límites de las áreas de botadero; morfología y materiales y estudio geotécnico.<sup>23</sup>

# 4.2.1.2 Etapa de beneficio

A continuación se describirán las etapas de beneficio del carbón, haciendo énfasis que solo la etapa de lavado genera un vertimiento.

**Ilustración 10.** Ciclo de beneficio del carbón



<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> ibíd.

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> ibíd.







- Trituración: en esta etapa lo que se busca es la reducción de las dimensiones de los fragmentos de carbón extraído como parte de una clasificación por tamaño que además es útil para su transporte o para cumplir con requisitos exigidos en el mercado. En este proceso se utilizan sistemas mecánicos hechos por trituradoras de mandíbula y martillo tales como: comprensión, rodadura, impacto, fricción, desgaste o rozamiento".<sup>24</sup>
- <u>Tamizado o clasificación por tamaño:</u> esta operación busca la clasificación o separación del material mediante mallas que controlan el paso del material según el tamaño requerido por el cliente.<sup>25</sup>
- <u>Lavado</u>: el lavado de carbones se realiza con el fin de disminuir el porcentaje de cenizas e impurezas para minimizar los impactos ambientales negativos asociados con la combustión del carbón. El proceso puede ser en húmedo, según tamaño y forma, o en seco, según las diferencias en densidad y fricción".<sup>26</sup>
- <u>Secado:</u> consiste en la disminución de humedad mediante calentamiento mecánico del carbón.<sup>27</sup>
- <u>Mezcla de carbones:</u> Es la combinación y homogeneización de carbones con diferentes propiedades para que la mezcla cumpla los requisitos del mercado.<sup>28</sup>

#### 4.2.2 Minería Subterránea

### 4.2.2.1 Etapa de explotación

Durante el ciclo de extracción de carbón, se llevan a cabo casi las mismas operaciones unitarias que en la minería de oro, que se mencionaran a continuación pero no se describirán debido a que ya fueron descritas en el punto anterior correspondiente a la minería aurífera. A continuación se muestra el ciclo de extracción del carbón subterráneo.

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Ministerio de minas y Energía-Unidad de planeación minero energética. "La cadena del carbón". 2005

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Ibíd.

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> ibíd.

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> ibíd.

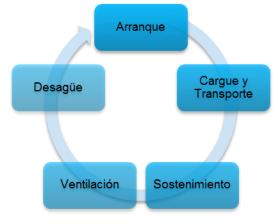
<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> ibíd.







Ilustración 11. Ciclo de extracción de carbón subterráneo.



## 4.2.2.2 Etapa de beneficio

Las etapas de beneficio del carbón subterráneo son las mismas que para el carbón explotado mediante minería a cielo abierto, por lo que como fueron descritas anteriormente no se describirán en este punto.







# CAPITULO V. TECNOLOGÍAS PARA EL MANEJO Y CONTROL DE VERTIMIENTOS

Los vertimientos generados en la explotación aurífera y carbonífera de las UPM estudiadas, en general poseen características fisicoquímicas similares; presentan altos contenidos de sólidos suspendidos, metales pesados, entre otros. Estas características fisicoquímicas en los vertimientos de aguas residuales de la minería pueden provocar un impacto negativo a corto, mediano y largo plazo sobre la fuente receptora.

Por lo anterior, se proponen sistemas de tratamientos orientados a facilitar el cumplimiento de la normatividad relacionada con los límites permisibles de vertimientos para la minería de metales preciosos y de carbón establecidos en la Resolución 631 de 2015 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, estos sistemas de tratamiento se caracterizan por ser tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales, descritas en conjunto para minería de metales preciosos y carbón, las cuales se distinguen por tener bajo costo y en cumplir con criterios como recuperación, reúso, fácil operación y mantenimiento.

Para el tratamiento de aguas residuales de la minería de oro y carbón, se propone la utilización de procesos mecánicos (físicos), biológicos y químicos para eliminar los contaminantes presentes en el agua residual. Se recomienda para la minería de oro y carbón el establecimiento de sistemas de tratamiento que van desde la reducción de solidos suspendidos en el agua y neutralización hasta la eliminación de metales pesados en los efluentes. A continuación, se describen los sistemas de tratamiento recomendados para tratar las aguas residuales en la minería de carbón y la minería de oro.

# 5.1 RECOMENDACIONES EN EL CONTROL DE EFLUENTES EN LA MINERÍA DE CARBÓN

En la minería de carbón las aguas residuales generadas corresponden a aquellas extraídas desde el fondo de los socavones, estas aguas cuando no son aprovechadas en su totalidad deben ser tratadas antes de ser vertidas a cuerpos receptores.

Las aguas residuales de la minería de carbón se caracterizan por tener altos contenidos de material en suspensión alterando la turbiedad del agua. De acuerdo a las características del manto rocoso, las aguas pueden presentar altos contenidos de metales pesados y/o alteraciones en el pH, lo que genera la necesidad de eliminar las altas concentraciones de metales pesados, controlar el pH y sedimentar los sólidos







suspendidos y disueltos en el agua residual. Para tratar las aguas residuales de la minería de carbón se recomienda la implementación de los siguientes sistemas de tratamiento:

### 5.1.1 Reducción de Solidos Suspendidos y Neutralización.

Se propone, como primera medida, reducir las concentraciones de sólidos suspendidos en el agua residual, por lo cual se recomienda la construcción e implementación de los siguientes procesos de tratamiento.

- Se recomienda la construcción de estructuras hidráulicas como desarenadores y sedimentadores como primera unidad de tratamiento, en donde mediante procesos unitarios se remueven las arenas y sólidos que están en suspensión en el agua. Este tipo de sistemas son recomendables para minera subterránea y a cielo abierto de subsistencia, pequeña, mediana y gran escala, donde la producción de solidos suspendidos sea significativa y requiera, según los análisis fisicoquímicos, un tratamiento previo a su descarga. Los parámetros de diseño, así como la operación y mantenimiento se proponen en el ítem 5.3.
- Una vez reducida la cantidad de solidos suspendidos, se propone implementar la Neutralización como mecanismo para controlar el pH del agua residual cerca a la neutralidad. Para aguas con características de acidez se propone la construcción del drenaje anóxico con roca caliza –DARC o ALD por sus siglas en inglés, o la neutralización mediante la adición de cal. Para la neutralización de aguas alcalinas se recomienda la adición de ácido sulfúrico, ácido clorhídrico o CO2 en las unidades de sedimentación, para lo cual se deberá construir como mínimo dos unidades de sedimentación.
- La construcción y puesta en marcha de los sistemas antes descritos, sedimenta en gran medida los metales pesados presentes en el agua residual, con un pH con valor de 7,5 a 8.
  - Adicionalmente, para las minas con una presencia de solidos muy alta, ya sean subterráneas o a cielo abierto, de subsistencia, pequeña o mediana escala, se recomienda la construcción y puesta en marcha de los siguientes sistemas de tratamiento:
- Posterior al tratamiento mediante sedimentadores, se propone como unidad alterna de remoción de altas concentraciones de solidos suspendidos la filtración con arena, grava y carbón activado, mediante el uso de un filtro percolador.







 Para aumentar la capacidad de remoción de solidos suspendidos, se propone previa a las unidades de sedimentación, la construcción de mezcladores hidráulicos que generen condiciones turbulentas del flujo, en donde se dosifica un coagulante que permite la sedimentación de partículas discretas. Este proceso es conocido como precipitación química y ayuda de igual forma a reducir la concentración de metales pesados mediante su precipitación.

# 5.1.2 Eliminación de metales pesados

Mediante la implementación de procesos biológicos y fisicoquímicos se reduce la concentración de metales presentes en el agua residual en la minería subterránea o a cielo abierto de carbón. Se recomienda la utilización de dos sistemas de tratamiento para la remoción de metales pesados (precipitación química y humedales construidos) en la minería de subsistencia, de pequeña o mediana escala, cuando las concentraciones de metales pesados son altas y las unidades de sedimentación no precipitan en su totalidad los metales pesados. A continuación se detalla el uso de estos sistemas:

- La precipitación química recomendada como medida adicional para reducir las concentraciones de solidos suspendidos, se caracteriza porque debe ser implementada en conjunto con unidades de sedimentación y mezcla rápida. Se recomienda para el uso de este sistema de tratamiento mínimo dos unidades de sedimentación, en donde se deberá adicionar previamente el coagulante en la zona de mezcla rápida, la cual será construida antes de las unidades de sedimentación. También aplica para minería a gran escala; y se construye de acuerdo a los parámetros de diseño establecidos en el ítem 5.3.
- El uso de humedales construidos, se propone como otra alternativa para reducir las concentraciones de metales pesados en el agua residual de la minería de carbón. Posterior a las unidades de sedimentación y neutralización (en caso de construir un DARC) se construye un humedal artificial, el cual mediante el uso de plantas macrófitas y/o microorganismos se reduce la concentración de metales en el agua.

#### 5.1.3 Lechos se secado de lodos

Se propone como sistema para reducir la humedad (deshidratar) de los lodos depositados en el fondo de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales en la minería de carbón. La construcción de los lechos de secado ayudará en el proceso de







manejo (transporte), reducción de la contaminación, evitara la generación de aguas filtradas de los lodos y la posibilidad de aprovecharlos lo cual dependerá de las características fisicoquímicas de los mismos. Estos sistemas pueden ser implementados en la minería subterránea o a cielo abierto de subsistencia, pequeña, mediana y gran escala.

# 5.2 RECOMENDACIONES EN EL CONTROL DE EFLUENTES EN LA MINERÍA DE ORO

En la minería de oro las aguas residuales generadas corresponden principalmente a aquellas producto de la etapa de beneficio, en donde se deben canalizar las aguas residuales generadas en las siguientes operaciones: trituración húmeda, molienda, concentración, clasificación, cianuración, retorta (recuperación de oro y mercurio) y Merril Crowe cuando no se reutilice el agua.

Las aguas residuales de la minería de oro se caracterizan por tener altos contenidos de material en suspensión alterando la turbiedad del agua. De acuerdo con las características del manto rocoso, las aguas pueden presentar altos contenidos de metales pesados, adicionalmente se presenta altas concentraciones de mercurio y cianuro por el uso de estos elementos como insumos en la etapa de beneficio. Lo que genera la necesidad de eliminar las altas concentraciones de metales pesados, controlar el pH y sedimentar los sólidos suspendidos y disueltos en el agua residual. Para tratar las aguas residuales de la minería de oro se recomienda la implementación de los siguientes sistemas de tratamiento:

# 5.2.1 Reducción de Solidos Suspendidos y Neutralización.

En concordancia con los sistemas de tratamiento propuestos para la minería de carbón, se propone como primera medida reducir las concentraciones de sólidos suspendidos en el agua residual de la minería de oro, por lo cual se recomienda la construcción e implementación de los siguientes procesos de tratamiento.

Se recomienda la construcción de estructuras hidráulicas de sedimentación como la primera unidad de tratamiento, en donde mediante procesos unitarios se remueven las arenas y sólidos que están en suspensión en el agua. Este tipo se sistemas pueden ser implementados en las UPM de subsistencia, pequeña, mediana o gran minería, ya sean a cielo abierto o subterránea, luego del proceso de beneficio. Los parámetros de diseño, así como la operación y mantenimiento se proponen en el ítem 5.3. Se propone la construcción de mínimo dos unidades de sedimentación.







- Una vez reducida la cantidad de solidos suspendidos, se propone implementar la Neutralización como mecanismo para controlar el pH del agua residual cerca a la neutralidad. Para aguas con características de acidez se propone la construcción del drenaje anóxico con roca caliza –DARC o la neutralización mediante la adición de caL. Para la neutralización de aguas alcalinas se recomienda la adición de ácido sulfúrico, ácido clorhídrico o CO2 en las unidades de sedimentación, para lo cual se deberá construir como mínimo dos (2) unidades de sedimentación. Este tipo de tratamientos se recomienda para todos los tipos de minería de oro a cualquier escala.
- La construcción y puesta en marcha de los sistemas antes descritos, sedimenta en gran medida los metales pesados presentes en el agua residual, con un pH con valor de 7,5 a 8.
  - Adicionalmente, si en las UPM a cielo abierto o subterráneo aún existe presencia de sólidos suspendidos, mediana o gran minería, o se desea una mayor eficiencia en su remoción, subsistencia y pequeña escala; se recomienda la construcción y puesta en marcha de los siguientes sistemas de tratamiento:
- Posterior al tratamiento mediante sedimentadores, se propone como unidad alterna de remoción de altas concentraciones de solidos suspendidos la Filtración con arena, grava y carbón activado, mediante el uso de un filtro percolador.
- De igual forma para aumentar la capacidad de remoción de solidos suspendidos, se propone previo a las unidades de sedimentación la construcción de mezcladores hidráulicos que generen condiciones turbulentas del flujo, en donde se dosifica un coagulante que permite la sedimentación de partículas discretas. Este proceso es llamado como precipitación química y ayuda de igual forma a reducir la concentración de metales pesados mediante su precipitación.

## 5.2.2 Eliminación de metales pesados

Las aguas residuales en la minería de oro deben ser tratadas para reducir la concentración de metales pesados mediante la implementación de procesos biológicos y fisicoquímicos que reduzcan la concentración de metales presentes en el agua residual en la minería de oro. Se recomienda posterior a las unidades de sedimentación la utilización de sistemas de tratamiento para la remoción de metales pesados: precipitación química y/o humedales construidos.







- La precipitación química se recomendó como medida adicional para las UPM de mediana y gran escala, donde las concentraciones de solidos suspendidos son muy altas. Se caracteriza porque debe ser implementada en conjunto con unidades de sedimentación y mezcla rápida. Se recomienda para el uso de este sistema de tratamiento mínimo dos unidades de sedimentación, en donde se deberá adicionar previamente el coagulante en la zona de mezcla rápida, la cual será construida antes de las unidades de sedimentación. De acuerdo a los parámetros de diseño establecidos en el ítem 5.3.
- El uso de humedales construidos, se propone como otra alternativa para reducir las concentraciones de metales pesados en el agua residual de la minería de carbón. Posterior a las unidades de sedimentación y neutralización (en caso de construir un DARC) se construye un humedal artificial, el cual mediante el uso de plantas macrófitas y/o microorganismos se reduce la concentración de metales en el agua. Este tipo de sistemas se recomienda para las minas de subsistencia, pequeña o mediana escala a cielo abierto o subterránea, aunque también se puede implementar en UPM de gran escala.

# 5.2.3 Relaveras y lechos se secado de lodos

Se recomienda la construcción de relaveras para almacenar temporalmente y tratar las arenas y demás estériles sólidos procedentes de la etapa de beneficio de la minería de oro. Adicionalmente se propone construir lechos de secado como sistema para reducir la humedad (deshidratar) de los lodos depositados en el fondo de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales en la minería de oro (lodos de los sedimentadores, DARC y humedales). La construcción de los lechos de secado ayudará en el proceso de manejo (transporte), reducción de la contaminación, además evitara la generación de aguas filtradas de los lodos y la posibilidad de aprovecharlos lo cual dependerá de las características fisicoquímicas de los mismos. Estos sistemas deben ser implementados en la minería subterránea o a cielo abierto de subsistencia, pequeña, mediana y gran escala.







# 5.3 PARÁMETROS DE DISEÑO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA MINERÍA DE ORO Y CARBÓN

#### 5.3.1 Sedimentadores

#### 5.3.1.1 Generalidades

Los sedimentadores son equipos de tratamiento de aguas cuyo fin es remover los residuos sólidos sedimentables y material flotante para disminuir la concentración de sólidos suspendidos<sup>29</sup>. Esta operación se emplea como etapa complementaria de otro tratamiento (coagulación-floculación, precipitación, oxidación biológica, etc.) o como tratamiento primario (desarenación y sedimentación primaria)<sup>30</sup>. Los sedimentadores primarios empleados como pretratamiento del agua residual, remueven entre el 50% y el 70% de sólidos suspendidos y entre el 25% y 40% de la DBO5<sup>31</sup>.

Para su aplicación se requieren cierta información y estudios previos, a partir de lo cual se determinarán aspectos como la ubicación de las estructuras de tratamiento, así como su dimensionamiento.

La información necesaria que deberá establecer cada proyecto minero será:

- Cantidad y calidad del agua residual.
- Tipo de suelo y permeabilidad
- Temperatura (media mensual y anual)
- Requerimientos de calidad para descargas superficiales y subsuperficiales (Resolución 0631 de 2015)
- Nivel freático

Los estudios mínimos que deberá realizar cada proyecto minero será:

Topográficos: pendiente del terreno

http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358041/EXE/leccin\_22\_sedimentadores.html

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD). Manejo de aguas residuales en pequeñas comunidades. Recuperado el 12 de noviembre de 2015 de:

http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358041/EXE/leccin\_22\_sedimentadores.html

JIMENEZ, B. (2001). La contaminación ambiental en México: Causas, efectos y tecnología apropiada. México: Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A. C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA. P. 213.
 UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD). Manejo de aguas residuales en pequeñas comunidades. Recuperado el 12 de noviembre de 2015 de:







• Hidrológicos: precipitación (promedio máximo mensual), evapotranspiración y evaporación (promedio mensual)

Se recomienda a cada unidad de producción (UPM) visitada implementar un sistema de tratamiento primario para disminuir los sólidos suspendidos que contienen los vertimientos, comprendido por desarenadores y sedimentadores o según las necesidades que establezca cada una en base a la información necesaria previamente recopilada y estudios mínimos realizados.

#### 5.3.1.2 Parámetros de diseño

A continuación se establecen los parámetros de diseño para las estructuras de tratamiento primario, desarenadores y sedimentadores, con base a lo estipulado en el documento RAS 2000 título E. Tratamiento de aguas residuales municipales.

Dentro de los parámetros de diseño previamente se deberá establecer el caudal de diseño, siendo este el caudal máximo horario. Los caudales industriales deben calcularse para los periodos críticos de producción; adicionalmente, los aportes asociados a periodos de lluvia deben ser tomados en consideración al determinar el caudal de diseño.

#### a. Desarenadores

Se utilizan como pretratamiento, para la retención y remoción de material extraño y arenas gruesas presente en el agua residual que pueda interferir con los procesos de tratamiento.

#### **Dimensionamiento:**

En la Tabla 3 se definen las dimensiones recomendadas dependiendo del tipo de desarenador que se diseñe.







**Tabla 3.** Dimensiones recomendadas para desarenadores

Parámetro	Desarenador flujo horizontal	Desarenador aireado	Desarenador tipo vórtice
Profundidad (m)	2 – 5	2 – 5	2.5 - 5
Longitud (m)		8 – 20	
Ancho (m)		2.5 – 7	
Relación Largo :Ancho	2.5 : 1 – 5 : 1	3:1-5:1	
Relación Ancho : Profundidad	1:1-5:1	1:1-5:1	
Diámetro (m)			
Cámara superior			1 – 7
Cámara interior			1 – 2

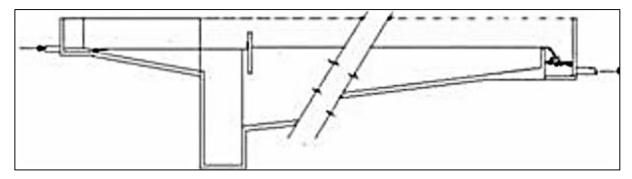
Fuente: RAS 2000. TITULO E.

Los desarenadores deben estar ubicados antes de tanques de sedimentación primaria y su diseño debe permitir el control de la velocidad del agua. En general, se considera que el rango de velocidad debe estar entre 0.2 m/s y 0.4 m/s.

Se recomienda instalar como mínimo dos unidades. Cada unidad debe tener la capacidad para operar con los caudales de diseño cuando la otra unidad está en limpieza. La tasa de desbordamiento superficial es recomendable que esté en un rango entre 700 y 1600 m³/m²/día; en términos de velocidad de sedimentación, entre 30 m/h y 65 m/h.

El tiempo de retención hidráulico debe basarse en el tamaño de las partículas que deben separarse; se recomienda un tiempo entre 20 segundos y 3 minutos. Esto se logra mediante dispositivos que permitan regular la velocidad del flujo como vertederos tipo sutro o proporcional, o con secciones transversales que garanticen los rangos de velocidad especificados para diferentes alturas de la lámina de agua.

Ilustración 12. Desarenador



Fuente: OPS/CEPIS/05.158 UNATSABAR, 2005.







# Operación y mantenimiento:

Las funciones de operación y mantenimiento se llevarán a cabo de acuerdo a lo establecido en el documento RAS 2000 Título E, en el que se recomienda lo siguiente:

Los desarenadores con un caudal inferior a 50 l/s sean limpiados manualmente; para caudales mayores de 150 l/s se recomienda una limpieza mecánica. Para caudales intermedios debe justificarse la selección realizada. En desarenadores de limpieza manual que se usen con aguas negras combinadas debe llevarse a cabo lo siguiente:

- 1. Medición periódica del lecho de arena acumulado.
- 2. Aislamiento del desarenador en el momento en que la arena ocupe 2/3 del volumen.
- 3. Drenaje del agua residual en la cámara. Este se puede realizar, en algunas instalaciones, por medio de canalizaciones que devuelven el líquido drenado al afluente o a una unidad del sistema de tratamiento adoptado.
- 4. Remoción de la arena.
- 5. Estimación de la cantidad de arena removida para los registros en las fichas de operación.
- 6. Transporte del el material removido hacia el sitio de disposición.
- 7. Lavado del desarenador para ser utilizado nuevamente.
- 8. Analizar una muestra de la arena removida en términos de sólidos volátiles. Adopción de medidas de corrección para las muestras que presenten alto contenido de estos.
- 9. Verificación de la cantidad de arena en las unidades subsecuentes.
- 10. Remoción de la arena, si fuera el caso, retenida en las demás unidades de tratamiento. Para los desarenadores de limpieza mecánica, la operación debe ser similar a los de limpieza manual, cumpliendo además con lo siguiente:
  - a) Mantenimiento los equipos de acuerdo con el manual de instrucciones del fabricante.
  - b) Mantenimiento del movimiento del equipo libre de obstrucciones.
  - c) Lavado diario, con chorros de agua, de las paredes y los raspadores.
  - d) Vaciado y revisión, por lo menos una vez por año, de las unidades.

Debe ensayarse el equipo que se encuentre inmerso así como la condición de la estructura. Con el fin de evitar excesos de materia orgánica en el material removido se recomienda lo siguiente:

Aumentar la velocidad.







2. Disminuir el tiempo de retención; para lo que puede reducirse el área de la sección transversal. Para evitar el arrastre de arena en el efluente se recomienda: a) remover con mayor frecuencia la arena acumulada. b) colocar en funcionamiento otro vertedero. c) aumentar el área de la sección transversal de la cámara. Se recomienda además que el desarenador cuente con un sistema de desvío del flujo o paso directo.

# b. Tanques sedimentadores

"Se recomienda utilizar el método de laboratorio por tandas para estimar la tasa de desbordamiento superficial necesaria, el tiempo de retención o profundidad del tanque y el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos. Este método puede encontrarse en la norma colombiana o internacional vigente. Deben utilizarse las gráficas de porcentaje de remoción de DBO y sólidos suspendidos como función de la tasa de desbordamiento superficial y del tipo de clarificador que se tenga (circular o rectangular). En los casos que el ingeniero considere necesario, se pueden adicionar coagulantes para incrementar la eficiencia de remoción de fósforo, sólidos suspendidos y DBO" (RAS 2000.Titulo E. p. E 54).

#### **Dimensionamiento:**

Los sedimentadores deben diseñarse para el caudal máximo horario esperado. Para el caso de tanques rectangulares la relación longitud: ancho debe estar entre 1.5:1 y 15:1. Para el caso de tanques circulares se recomienda un diámetro entre 3 y 60 m, una pendiente de fondo entre 6 % y 17 %. Debe escogerse la mayor de las áreas calculadas, de acuerdo a las siguientes tasas de desbordamiento superficial mínimas recomendadas:

- Para caudal medio utilizar 33 m³/m² día.
- Para caudal pico sostenido por tres horas utilizar 57 m³/m² día, y
- Para caudal pico utilizar 65 m³/m² día.

El tiempo de retención se determina con base en el caudal de aguas residuales y en el volumen del tanque de sedimentación. Se recomienda un período de retención mínimo de una hora tanto para los sedimentadores circulares como para los rectangulares. Para los tanques de sedimentación circulares se recomienda un rango de profundidades de 2.5 m a 4 m. En el caso de tanques rectangulares se recomienda un rango de profundidades entre 2 m y 5 m.







Los sólidos sedimentados se almacenan temporalmente en el fondo de los equipos; estos deben ser removidos periódicamente. Se recomienda manejar una capa de lodos de 30 cm a 45 cm por motivos operacionales.

Las entradas deben diseñarse para dispersar la corriente de alimentación, difundir homogéneamente el flujo por todo el tanque. Las entradas pueden ser similares a vertederos, pero lo habitual es un canal de compuertas espaciadas. Se recomienda una distancia mínima de 3.0 m entre la entrada y la salida y una velocidad de entrada de 0.3 m/s. Además, se recomiendan situar las estructuras de disipación a una distancia entre 0.6 m y 0.9 m de la entrada y sumergidos unos 0.45 cm a 0.60 m según la profundidad del tanque. El diseño de los vertederos en la salida depende del caso específico y del criterio del diseñador.

Para el caso de tanques rectangulares, la localización de los rebosaderos debe tenerse muy en cuenta en el diseño con el fin de evitar que cantidades considerables de partículas suspendidas salgan del sedimentador por estos orificios. Con este propósito se recomienda colocar éstos dispositivos fuera de la región de influencia de las corrientes de densidad o instalar pantallas especiales para evitar el impacto de dichas corrientes. También se recomienda reducir la velocidad horizontal a 2.mm/s a lo largo de los clarificadores.

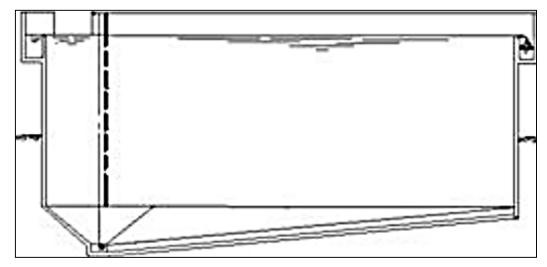
Para el caso de tanques circulares se recomienda: colocar pantallas circulares y horizontales debajo de la estructura de alimentación de los tanques alimentados por el centro. Se recomienda que el radio de las pantallas esté entre 10 % y 20 % por encima del radio de la estructura de alimentación. Para el caso de tanques rectangulares, se recomienda la colocación de pantallas con una extensión entre 150 mm y 300 mm por debajo de los puntos de entrada que se hallan debajo de la superficie del agua.







#### Ilustración 13. Sedimentador



Fuente: OPS/CEPIS/05.158 UNATSABAR, 2005.

# Operación y mantenimiento:

Las funciones de operación y mantenimiento se llevarán a cabo de acuerdo a lo establecido en el documento RAS 2000 Título E, en el que se recomienda lo siguiente:

Cada UPM, en caso de implementar esta tecnología deberá tener un manual de operación y mantenimiento que contemple los siguientes aspectos:

- Plan de limpieza.
- Control de olores.
- Operación en condiciones de caudal mínimo y máximo.
- Manejo de lodos.
- Prevención de cortocircuitos.
- Arrangue.
- Control de lodos flotantes.

### 5.3.2 Neutralización

La neutralización es una reacción química entre un ácido y una base, para esta guía se contemplaron las aguas acidas de mina, teniendo en cuenta que este sistema de tratamiento logra llevar el pH de estas a un valor entre 6 y 9.







# 5.3.2.1 Aguas acidas de mina

Los drenajes ácidos de mina (DAM o AMD por sus siglas en inglés) son un problema de muchos emplazamientos mineros tanto activos como abandonados, estos vertimientos son consecuencia de la oxidación a que se ve sometida la pirita, en contacto con el oxígeno y el agua, se producen aguas ácidas de mina, caracterizadas por su bajo pH y elevada concentración de metales en disolución. Para tratar el agua contaminada es bueno aumentar la alcalinidad del agua (capacidad para neutralizar el ácido). Existen diversas maneras para aumentar la alcalinidad. Se propone a continuación sistemas de tratamiento para las aguas acidas en la minería de metales preciosos y carbón.

# - Drenaje anoxico en roca caliza (DARC o ALD por sus siglas en inglés)

El sistema de tratamiento DARC, se caracteriza por ser un lecho de roca caliza enterrado, a través del cual circula el agua con características de acidez, y en la que se disuelven carbonatos (principalmente carbonato cálcico) en un medio prácticamente carente de oxígeno. De acuerdo con López et al (2002) los sistemas de tratamiento DARC son zanjas rellenas con gravas de caliza u otro material calcáreo sellada a techo por una capa de tierra arcillosa y una geo membrana impermeable. La zanja se instala a cierta profundidad (1 ó 2 m) para mantener unas condiciones anóxicas. El drenaje ácido de mina se hace circular por el interior de la zanja provocando la disolución de la caliza, lo que genera alcalinidad (HCO<sub>3</sub>- + OH-) y eleva el pH del agua<sup>32</sup>,

\_

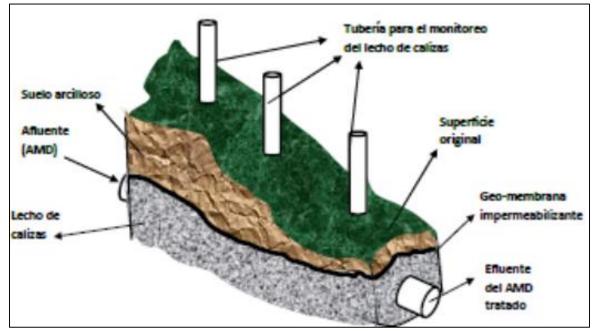
<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> López Pamo, E. et al. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero. Madrid. (p. 13)







# Ilustración 14. Corte longitudinal de un drenaje anóxico de calizas (DARC).



Fuente: Guerra Iván. (2012). Utilización de los humedales construidos en el tratamiento del drenaje ácido de minas. (p. 78)

#### Parámetros de diseño

Se proponen dos estudios independientes para el diseño de los drenajes anóxicos en roca caliza, la metodología de Skousen (1994) para calcular el tiempo de la caliza considerando su disolución y la metodología de Watzlaf (1997) y la Agencia de Protección Ambiental -EPA (2000), para calcular la cantidad de grava caliza requerida para neutralizar la acidez de un afluente.

En el diseño de un sistema DARC hay que considerar la cantidad de caliza a emplear en el lecho anóxico y el tiempo de retención del agua en el mismo<sup>33</sup>. Skousen et al.

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> López Pamo, E. et al. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero. Madrid. (p. 14)







(1994) proponen el siguiente planteamiento mediante una serie de ecuaciones, para efectuar el cálculo de la caliza que se requiere en un sistema DARC<sup>34</sup>:

# Q (I/min) x acidez (mg/l) x 0,000526 = A (t/año de acidez a tratar)

A x años de tratamiento = B (t de caliza para neutralizar la acidez)

B / tanto por uno de calcita en la caliza = C (t de caliza considerando su pureza)

C / tanto por uno de caliza que se disuelve = D (t de caliza considerando su disolución)

#### En definitiva:

# $D = [Q \times acidez \times 0,000526 \times anos de tratamiento] / [pureza \times caliza disuelta]$

D: tiempo de caliza considerando su disolución Q: caudal en l/min

Acidez en mg/l

- Donde la pureza y la caliza que se disuelve se expresan en tanto por uno.
- Para calcular el volumen del sistema tienen en cuenta que 1 t de caliza viene a ocupar 0,4 m<sup>3</sup>.
- Se tendrá en cuenta la porosidad que resulta de trabajar con un tamaño recomendado de grava caliza de entre 4 y 10 cm.

De acuerdo con Watzlaf (1997a) y la EPA (2000), en el diseño de un DARC, tienen en cuenta el tiempo de tratamiento necesario (estimado en base a experiencias en 15 h) y la cantidad de caliza requerida para el caudal a tratar. Considera que por un lado es necesario tener en cuenta la cantidad de grava caliza con la que se obtiene un volumen efectivo suficiente (porosidad) para alcanzar el tiempo de retención deseado (tr= $V_{efectivo}/Q$ ), y que por otro lado se habrá de tener en cuenta la cantidad de grava caliza adicional que hay que aportar al irse consumiendo en el transcurso del tratamiento. Así, parte de la grava caliza está dotando al DARC de las características hidráulicas necesarias ( $M_h$ ), y la otra parte es el reactivo previsible que se consuma durante los años de tratamiento ( $M_r$ ). Con este planteamiento la cantidad de grava caliza necesaria en un DARC vendrá dada por la siguiente expresión:

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> Skousen, J., Sexstone, A., Garbutt, K. y Sencindiver, J. (1994). Acid mine drainage treatment with wetlands and anoxic limestone drains. En: Kent, D.M. (ed). Applied wetlands science and technology. Lewis Publishers, Boca Ratón, 263-281.







# $M = Mh + Mr = (Q \times r \times tr) / Vv + (Q \times C \times T) / z$

Dónde:

Q = Caudal (I/hora)

r = Densidad grava caliza (kg/l)

tr = Tiempo de retención (horas)

Vv = Porosidad (aproximadamente 0,4 a 0,5)

C = Alcalinidad esperada (kg/l)

T = Período de vida del DARC (horas)

z = Contenido de calcita en la caliza (en tanto por uno)

M = Cantidad de grava caliza (kg).

#### - Neutralización con cal

La cal es el reactivo más utilizado para la neutralización de aguas residuales ácidas, siendo la principal razón para su uso el bajo coste de la misma, se propone aplicar cal en una zona de mezcla rápida, ya sea por agitación mecánica, resalto hidráulico, vertederos, etc. Así mismo el uso de tanques de homogeneización para regular el pH del efluente antes de la adición de la cal, lo anterior con el objeto de mantener niveles similares de pH en el agua a tratar. La neutralización de aguas ácidas se hace comúnmente agregando cal, óxido de cal, óxido de magnesio; compuestos que tienen como desventaja la gran cantidad de lodo producido.

De acuerdo con Ramalho (1996), se recomienda normalmente la adición por etapas de la cal. Para aguas con alto contenido en ácido se recomiendan al menos dos etapas; la primera (neutralización grosera) para elevar el pH al menos a un valor entre 3,0 y 3,5 y con la segunda (ajuste) se pretende llegar al pH deseado para el efluente. A veces es necesaria una tercera etapa<sup>35</sup>.

Eckenfelder y Ford (1970) describieron que para la utilización de cal como agente neutralizante, se requiere la siguiente información básica<sup>36</sup>:

Curva de neutralización para el agua residual

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> R. S. Ramalho. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Faculty of science and Engineering. Laval University. Quebec – Canadá. (p. 176).

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> Eckenfelder. W. W.. Jr. y Ford, D. L. Water Pollution Control. Pemberton Press. Austin y New York. (1970)







 Datos de consumo de energía, o sea, una curva de grado de agitación con respecto al tiempo de retención para el pH deseado.

Tanto la curva de neutralización como los datos de consumo se obtienen por procedimientos de laboratorio, y determinan la cantidad necesaria de cal a utilizar por volumen de agua a tratar.

# 5.3.2.2 Neutralización de aguas residuales alcalinas

La neutralización de aguas alcalinas se hace agregando comúnmente ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y CO<sub>2</sub> en plantas donde existe disponibilidad de dióxido de carbono.

En concordancia con Guzmán, el CO<sub>2</sub> se puede utilizar como especie ácida para la neutralización de corrientes líquidas alcalinas dado que en presencia de agua forma ácido carbónico. Constituye, pues, un sustituto potencial del ácido sulfúrico<sup>37</sup>.

La neutralización de aguas residuales alcalinas, sigue el mismo procedimiento que la neutralización con cal para determinar la cantidad de ácido necesario para añadir, debe tenerse en cuenta lo siguiente:

Igualar el caudal y el pH del afluente al proceso de neutralización.

Realizar curvas de titulación para el afluente para hacer diseño acorde con el proceso de neutralización.

Caracterizar cualitativa y cuantitativamente el lodo generado en la neutralización.

Determinar el efecto del compuesto químico agregado, durante el proceso de neutralización sobre la calidad del afluente<sup>38</sup>.

45

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> R. M. Guzmán. Uso del CO<sub>2</sub> en la Neutralización de Aguas Residuales. ELCOGAS. VI Congreso Nacional del Medio Ambiente,
<sup>38</sup> C. P. Gómez. (2012) Manejo de Aguas Residuales en Pequeñas Comunidades. Lección 18: Neutralización. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Tomado de: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358041/EXE/leccin\_18\_neutralizacin.html







#### 5.3.3 Filtro con carbón activado

En las UPM dedicadas a la minería de metales preciosos y carbón, es ideal utilizar un Filtro percolador con carbón activado, como tratamiento secundario de los vertimientos generados, posterior a la sedimentación. Esta tecnología consiste en un "Tanque que contiene un lecho de material grueso, compuesto en la gran mayoría de los casos de materiales sintéticos o piedras de diversas formas, de alta relación área/volumen, sobre el cual se aplican las aguas residuales por medio de brazos distribuidores fijos o móviles. Este es un sistema de tratamiento aerobio." Implementado para la remoción de metales pesados de los efluentes.

Los carbones activados son formas no-grafíticas del carbón con un área superficial interna elevada, debido a la porosidad intrínseca del precursor y al desarrollo de ésta durante el proceso de activación. Su red porosa está constituida principalmente por microporos con tamaños de poro por debajo de los 2 nm, por mesoporos con tamaños comprendidos entre 2 nm y 50 nm y por macroporos con dimensiones superiores a los 50 nm. <sup>40</sup>

La adsorción de metales pesados presentes en aguas depende de varios factores que se relacionan: La constitución química del agua, las formas en que se encuentran las especies de metales pesados, la textura y los grupos funcionales presentes en la superficie del carbón activado. Variables como origen, tipo y tamaño de partícula del carbón activado, pH de la solución, temperatura del agua, tiempo de contacto e interacciones competitivas con otros componentes del agua influencian la retención de metales en el carbón activado.<sup>41</sup>

#### 5.3.3.1 Parámetros de Diseño

El lecho del filtro contendrá rocas y medios similares. La escoria de roca o cualquier medio filtrante no debe contener más de un 5 % por peso de materia cuya dimensión mayor sea tres veces su dimensión menor. No contendrá material delgado alargado y achatado, polvo, barro, arena o material fino, además de una capa de carbón activado

\_

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> Ministerio de Desarrollo Económico (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS – 2000), Sección II, Título E, Tratamiento de Aguas Residuales. Bogotá.

<sup>&</sup>lt;sup>40</sup> Bansal R.C.; Donnet J.B.; Stoeckli F. (1988). Active Carbon. Marcel Dekker.

<sup>&</sup>lt;sup>41</sup> Marsh H.; Heintz E.A.; Rodríguez-Reinoso F. (1997). Introduction to Carbon Technologies. Universidad de Alicante.







con una profundidad mínima de 90 cm y máxima de 180 cm sobre los desagües, excepto cuando los estudios justifiquen una construcción especial.<sup>42</sup>

El medio filtrante, en el caso de la piedra debe tener una profundidad mínima de 90 cm y máxima de 180 cm sobre los desagües, excepto cuando los estudios justifiquen una construcción especial. En el caso del medio plástico, la profundidad debe determinarse por medio de estudios pilotos o experiencias previas debidamente sustentadas ante la autoridad competente.

Debe proveerse un espacio libre mínimo de 15 cm entre los brazos distribuidores y el medio filtrante.

Los filtros se clasifican según su carga en (MinDesarrollo, 2000)<sup>43</sup>:

# Filtros de baja carga

Filtros lentos en los cuales el agua hace un solo pasó a través del filtro, con cargas volumétricas bajas, permitiendo además una nitrificación relativamente completa. Este tipo de filtro es seguro y simple de operar. Producen una composición del efluente bastante estable.

# Filtros de alta carga

Emplean la recirculación para crear una carga hidráulica más homogénea, diluyendo por otra parte la DBO5 influente. El porcentaje de recirculación puede llegar a 400%. Este sistema de filtración tiene una eficiencia tan buena como la de los filtros de baja tasa.

Cada tipo de filtro requiere ciertas especificaciones de diseño, Los valores de tasa de carga hidráulica que se deben usar para cada tipo de filtro se encuentran en la Tabla 4. En caso de usar valores diferentes se debe sustentar adecuadamente con base en estudios piloto o experiencias anteriores adecuadamente evaluadas por la parte de la autoridad competente.

47

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> Ministerio de Desarrollo Económico (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS – 2000), Sección II, Título E, Tratamiento de Aguas Residuales. Bogotá.
<sup>43</sup> Ibíd.







**Tabla 4.** Características de diseño para los diferentes tipos de filtros percoladores.

	Tasa baja	Tasa Inmediata	Tasa alta	Súper alta tasa	Rugoso	Dos etapas
Medio filtrante	Roca, escoria	Roca, escoria	Roca	Plástico	Plástico, madera roja	Roca, plástico
Carga hidráulica m³/(m²*d)	0.9 -3.7	3.7 – 9.4	9.4 – 37.4	14.0 – 84.2	46.8 – 187.1 (no incluye recirculación)	9.4 -37.4 (no incluye recirculación)
Carga orgánica, kg DBO₅/(m³*d)	0.1 – 0.4	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	0.5 – 1.6	1.6 – 8.0	1.0 – 1.9
Profundidad, m	1.8 – 2.4	1.8 – 2.4	0.9 – 1.8	3.0 - 12.2	4.6 - 12.2	1.8 – 2.4
Tasa de recirculación	0	0 – 1	1 – 2	1 – 2	1 – 4	0.5 – 2
Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> , %	80 – 90	50 – 70	65 – 55	65 – 80	40 – 65	85 – 95
Efluente	Bien nitrificado	Parcialmente nitrificado	Poca nitrificación	Poca nitrificación	No nitrificado	Bien nitrificado
Desprendimiento	Intermitente	Intermitente	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo

Fuente: RAS 2000. Sección II. Titulo E. Tratamiento de Aguas Residuales.

#### 5.3.3.2 Operación y mantenimiento44

Los requisitos para un buen rendimiento del filtro percolador con carbón activado son la distribución uniforme de los vertimientos sobre la superficie y la buena ventilación. La fuerza de empuje de la regadera giratoria requerida para ello debe mantenerse. También es posible reducir la velocidad de la regadera haciendo girar 180° uno de sus brazos, de modo que el chorro de aguas residuales salga contra la dirección en que gira.

Por esa razón, periódicamente debe controlarse si los tubos de la regadera y sus aberturas están bloqueados y, en caso necesario, deben limpiarse. Esto rige también para todos los otros dispositivos de alimentación (sifones). En el caso de que existan varios filtros percoladores, la entrada de los efluentes debe distribuirse de acuerdo con la capacidad de cada uno de ellos. Las acumulaciones de agua sobre la superficie de los filtros deben eliminarse. Los canales recolectores del fondo de los filtros deben mantenerse sin depósitos y en caso necesario se enjuagarán. Los desarenadores

<sup>44</sup> Ministerio de Desarrollo Económico (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS - 2000), Sección II, Título E, Tratamiento de Aguas Residuales. Bogotá.







existentes deben vaciarse ocasionalmente y las aberturas para ventilación deben mantenerse libres.

# 5.3.4 Precipitación química (coagulación - floculación)

#### 5.3.4.1 Generalidades

Consiste en añadir ciertos productos químicos al agua residual para conseguir que estos alteren el estado físico de los sólidos disueltos o en suspensión y se produzca una eliminación por sedimentación simple<sup>45</sup>. Las partículas en suspensión se desestabilizan y se aglomeran para acelerar su asentamiento<sup>46</sup>.

Los productos químicos más utilizados como agentes precipitantes son: sulfato de aluminio hidratado, sulfato ferroso hidratado y sales férricas (cloruro y sulfato), siendo el sulfato de aluminio (alumbre) el coagulante más común; se utiliza además polímeros orgánicos, cal viva, de acuerdo a la norma NTC 1398 (Rev. 3), cal hidratada, de acuerdo a la norma NTC 1398 (Rev. 3), Cal-agua, solución Ca(OH)2, Cal-lechada suspensión Ca(OH)2, carbonato de sodio, silicato de sodio y la sílice activada y solos o en combinación con el alumbre para mejorar la floculación<sup>47</sup>. El silicato de sodio y la sílice activada deben manejarse bajo condiciones especiales; El uso de cal viva, cal hidratada o silicato de sodio debe cumplir con lo exigido por las Normas Técnicas ANSI/AWWA B202-93 y la ANSI/AWWA B404-92.

Para la coagulación, se debe alimentar en el agua la dosis óptima de coagulante y se le debe mezclar adecuadamente con ella. La dosis óptima varía dependiendo de las características fisicoquímicas del agua. Para determinar periódicamente la dosis óptima de coagulante se debe realizar "La prueba de jarra" dicha prueba se debe realizar con base a la Norma Técnica Colombiana NTC 3903.

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup> SANS, R. & DE PABLO, J. (1989). Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos. Marcobombo, S. A. Barcelona, España.

<sup>&</sup>lt;sup>46</sup> HENRRY, J. GLYNN & HEINKE, GARY W. (1999). Ingeniería Ambiental. ISBN: 970-17-0266-2. México. P. 398-399.

<sup>47</sup> Ihíd

<sup>&</sup>lt;sup>48</sup> CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE (CEPIS). (1988). Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades: tecnología de pequeños sistemas de abastecimiento de agua en países en desarrollo. Lima, Perú. 391 p.







La mezcla adecuada de coagulante es un mezclado rápido alrededor de 30 segundos para dispersar el coagulante; la sustancia química se inyecta en la zona más turbulenta para asegurar su dispersión uniforme y rápida<sup>49</sup>; inmediatamente después, se lleva a cabo una mezcla lenta de la suspensión, llamada floculación, a fin de favorecer el contacto entre partículas; Lo anterior se consigue por mezcla mecánica mediante el uso de paletas que giran dentro del tanque de coagulación-floculación, o por mezclado hidráulico, el cual se produce cuando el flujo se dirige por encima y alrededor de deflectores del tanque, vertederos con caída libre y saltos hidráulicos, el tiempo de retención en el tanque varía entre 20 y 40 minutos en tanque de 3 a 4 m de profundidad<sup>50</sup>.

La suspensión de flóculos se transfiere con cuidado de los tanques de coagulaciónfloculación hacia tanques de sedimentación. En la figura xxx se muestra un corte transversal de un tanque de coagulación/floculación<sup>51</sup>. Por efectos de costes económicos dado que los mezcladores mecánicos requieren gasto de energía eléctrica, se recomienda a las UPM hacer uso de estructuras hidráulicas.

#### 5.3.4.2 Parámetros de diseño

# Tipo de dosificador

Cada tipo de coagulante requiere un sistema de dosificación específico dado la corrosión que este pudiera generar. La ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.5 muestra la clase de dosificador y el material con el que se recomienda diseñar, de acuerdo con el tipo de coagulante. En caso de emplear otro material distinto de los mencionados en la tabla 5, éste debe ser resistente a la corrosión generada por la solución química.

<sup>&</sup>lt;sup>49</sup> CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE (CEPIS). (1988). Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades: tecnología de pequeños sistemas de abastecimiento de agua en países en desarrollo. Lima, Perú. 391 p.
<sup>50</sup> Ibíd.

<sup>&</sup>lt;sup>51</sup> Ibíd.







Tabla 5. Tipo de dosificador y material de revestimiento según el coagulante

Coagulante	Tipo de dosificador	Tuberías	Material Tanques de disolución (protegidos contra la corrosión)
Sulfato de aluminio	Dosificador en seco o en solución con tanques	Caucho, plástico PVC	
Cloruro férrico en solución	Dosificador en solución con tanque	Caucho, plástico	Concreto revestido con pintura bituminosa o epódica
Cloruro férrico en cristales	Dosificador en solución con tanque	Caucho, plástico PVC	Plástico
Cloruro férrico anhídrido	Dosificador en solución con tanque	Plástico PVC	Acero inoxidable, concreto con revestimiento cerámico o plástico
Sulfato férrico	Dosificador en seco o en solución con tanque y agitador	Caucho, plástico PVC	
Sulfato ferroso	Dosificador en seco o en solución con tanque y agitador	Caucho, plástico PVC	Acero inoxidable, concreto revestido
Aluminato de aluminio	Dosificador en seco o en solución con tanque y agitador	Caucho, hierro fundido, plástico	Hierro, concreto, acero inoxidable

Fuente: RAS 2000, Título C.

La aplicación de los auxiliares de coagulación también requiere del uso de dosificadores diseñados de acuerdo con el tipo de auxiliar a aplicar. En la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se muestra la clase de dosificador y el material con el que se recomienda diseñar; en caso de emplear otro material distinto de los mencionados, este debe ser resistente a la corrosión generada por la solución química.

**Tabla 6.** Tipo de dosificador y material de diseño de acuerdo al tipo de auxiliar de coagulación

Producto	Dosificador	Materiales		
Producto	Dosilicador	Tuberías	Tanques	
Cal viva	Apagador, dosificador en seco o en solución	Hierro fundido, acero	Concreto,	
Cal hidratada	Dosificador en seco o en solución	galvanizado,		
Cal-agua solución Ca(OH) <sub>2</sub>	Saturador	Plástico	Acero,	
Carbonato de sodio	Dosificador de solución, agitador		Madera	
Silicato de sodio	Dosificador en seco o en solución	Acero galvanizado, plásticos		
Sílica activada	Dosificador en solución	Caucho, acero, plástico	Concreto revestido, acero,	
Aluminato de aluminio		Gaucito, acero, piastico	caucho, madera.	

Fuente: RAS 2000, Título C.







#### Mezcladores hidráulicos

Se utilizan arreglos tales como canales o cámaras con deflectores que producen condiciones turbulentas de flujo<sup>52</sup>.

Las estructuras hidráulicas se diseñarán bajo los criterios establecidos en el documento RAS 2000, título C:

#### Resalto hidráulico:

- La velocidad mínima en la garganta debe ser mayor de 2 m/s.
- La velocidad mínima del efluente debe ser aproximadamente 0.75 m/s.
- El resalto no debe ser oscilante; es decir que el número de Froude (Fr) no debe estar entre 2.5 y 4.5.
- El número de Froude debe estar entre 1.7 y 2.5 o entre 4.5 y 9.0.
- Ha/w debe estar entre 0.4 y 0.8. Donde Ha es la altura del agua y w es el ancho de la canaleta.
- Debe disponerse de un dispositivo aguas abajo con el fin de controlar la posición del resalto hidráulico.

La solución de coagulante se debe aplicar en el punto de mayor turbulencia. Ver ilustración 11

52

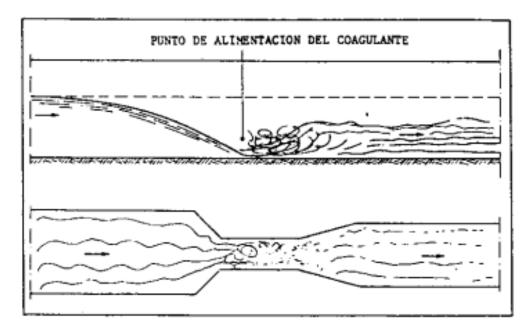
<sup>&</sup>lt;sup>52</sup> CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE (CEPIS). (1988). Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades: tecnología de pequeños sistemas de abastecimiento de agua en países en desarrollo. Lima, Perú. 391 p.







#### Ilustración 15. Resalto hidráulico



Fuente. CEPIS, 1988.

# • Difusores de tubo perforado

- Espacio entre orificios menor que o igual a 0.1 m.
- Diámetro del orificio menor que o igual a 3 mm.
- Velocidad del agua a través del orificio, aproximadamente 3 m/s, en sentido perpendicular al flujo.

#### Vertederos

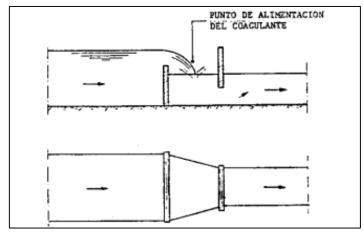
Debe implementarse en el diseño el empleo de sectores dentado o perfiles criquer en la base del vertedero para fijar el resalto en un solo punto (ver Ilustración 12).







#### Ilustración 16. Vertedero

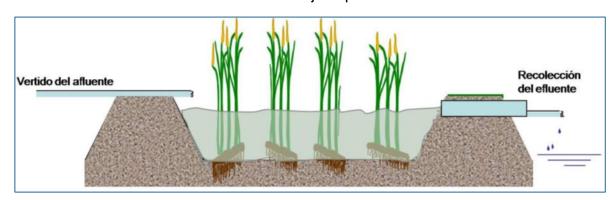


Fuente: CEPIS, 1988.

#### 5.3.5 Humedales construidos

Los humedales construidos también conocidos como humedales artificiales o balsas, son sistemas de tratamiento de aguas residuales, se caracterizan por estar constituidos por lagunas impermeables poco profundas, en donde los contaminantes son removidos por procesos físicos, químicos y biológicos. Los humedales construidos actúan como filtros, mediante la utilización de plantas acuáticas (macrófitas) y/o microorganismos, capaces de reducir las concentraciones de contaminantes presentes en el agua residual. De acuerdo a la forma de circulación del agua los humedales se clasifican en humedales de flujo superficial –FLS- y humedales de flujo subsuperficial –FS-.

Ilustración 17. Humedal construido de flujo superficial









Fuente: García y Corzo. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. (p. 2)

Se propone la utilización de humedales construidos de flujo subsuperficial –FS- para eliminar las concentraciones de metales en los efluentes mineros, de acuerdo con García y Corzo (2009) las principales ventajas de estos sistemas frente a los de flujo superficial es la mayor capacidad de tratamiento (admiten mayor carga orgánica), bajo riesgo de contacto del agua con las personas y de aparición de insectos, y menor utilidad para proyectos de restauración ambiental debido a la falta de lámina de agua accesible<sup>53</sup>, además, este sistema de tratamiento se proyecta como alternativa de tratamiento por su bajo costo de mantenimiento.

Dentro del funcionamiento de los humedales construidos, se llevan a cabo una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que describen la dinámica del sistema y los mecanismos principales de remoción de contaminantes, muchas de las cuales son funciones de los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales (sedimentación, filtración, digestión, oxidación, reducción, adsorción y precipitación).

Los humedales construidos pueden llegar a cumplir básicamente tres funciones que los hacen atractivos para tratar las aguas residuales <sup>[5]</sup>:

- Fijan la materia orgánica y demás contaminante del agua residual en la superficie del suelo.
- Utilizan y transforman los compuestos del agua residual gracias a la presencia de microorganismos y/o macrofitas.
- Logran niveles de tratamiento óptimos con un bajo costo en operación y mantenimiento

De acuerdo Fernández et al, los humedales construidos subsuperficiales, se caracterizan por que no tienen como tal una columna de agua continua, sino que el influente circula a través de un medio inerte, que consiste en un lecho de arena y/o grava de grosor variable, que sostiene la vegetación (hidrófitos o higrófitos). Este lecho se diseña de modo que permita la circulación del agua residual a través del sistema radicular de las macrofitas acuáticas. El agua se puede mover tanto de forma horizontal como verticalmente a través de la zona radicular de las macrofitas<sup>54</sup>, el mecanismo de

<sup>54</sup> GONZÁLEZ, Jesús Fernández. Manual de fitodepuración, Filtros de macrófitas en flotación. Proyecto LIFE. Madrid: Universidad politécnica de Madrid, 2000, p. 81.

<sup>&</sup>lt;sup>53</sup> García, J., Corzo, A., 2008. Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya.

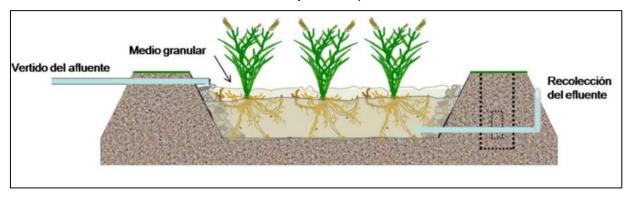






remoción es por sedimentación en el fondo del humedal y por adsorción sobre la superficie de la planta y los detritos.

Ilustración 18. Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal FSH



Fuente: García y Corzo. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. (p. 2)

A continuación se establece la información necesaria, estudios mínimos y parámetros de diseño para la realización de humedales construidos

#### 5.3.5.1 Localización

Los humedales construidos como alternativa para reducir las concentraciones de metales en los vertimientos de las UPM, deberán localizarse aguas abajo de las unidades de sedimentación o decantación. De acuerdo con el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS- (2000), "debe hacerse una evaluación de las características del suelo, localización de cuerpos de agua, topografía, localización geográfica, líneas de propiedad y vegetación existente para localizar adecuadamente el humedal<sup>55</sup>".

<sup>&</sup>lt;sup>55</sup> Titulo E. Tratamiento de Aguas Residuales. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS- (2000). Ministerio de Desarrollo Económico. (p. 35).







# 5.3.5.2 Tipos de humedales de flujo subsuperficial

Los humedales de flujo subsuperficial –FS- se clasifican de acuerdo al sentido de circulación del agua en: Humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal –FSH- y Humedales construidos de flujo subsuperficial vertical –FSV. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental –EPA- (2000) los FS son muy efectivos en la remoción de la DBO, la DQO, los SST, los metales y algunos compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales.<sup>56</sup>

Humedales de flujo subsuperficial horizontal –FSH: Según García y Corzo (2009), en este tipo de sistemas el agua circula horizontalmente a través del medio granular y los rizomas y raíces de las plantas. La profundidad del agua es de entre 0,3 m y 0,9 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados y con cargas de alrededor de 6 g DBO/m².día.

Los humedales horizontales están compuestos por los siguientes elementos:

- Estructuras de entrada del afluente.
- Impermeabilización del fondo y laterales ya sea con láminas sintéticas o arcilla compactada, (3) medio granular.
- Vegetación emergente típica de zonas húmedas.
- Estructuras de salida regulables para controlar el nivel del agua.
- Humedales de flujo subsuperficial vertical –FSV: Según García y Corzo (2009), la circulación del agua es de tipo vertical y tiene lugar a pulsos, de manera que el medio granular no está permanentemente inundado. La profundidad del medio granular es de entre 0,5 m y 0,8 m. Operan con cargas de alrededor de 20 g DBO/m².día<sup>57</sup>.

\_\_\_

<sup>&</sup>lt;sup>56</sup> Agencia de Protección Ambiental –EPA-. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. (p.5)

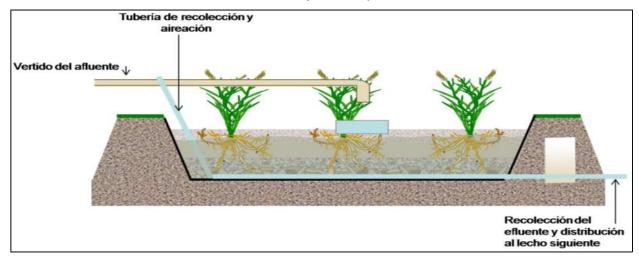
<sup>&</sup>lt;sup>57</sup> Titulo E. Tratamiento de Aguas Residuales. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS- (2000). Ministerio de Desarrollo Económico. (p. 8).







# Ilustración 14. Humedal construido de flujo subsuperficial vertical FSV



Fuente: García y Corzo. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. (p. 9)

# 5.3.5.3 Parámetros de diseño humedales de flujo subsuperficial (FS)

De acuerdo con el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS- (2000), el diseñador debe seleccionar una metodología de diseño que garantice el correcto funcionamiento del sistema teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Conductividad hidráulica.
- -Granulometría.
- -Flujo sumergido para todas las condiciones de caudales.

Además, se recomiendan los siguientes parámetros, para el caso de humedales de flujo subsuperficial:

**Área superficial.** Para la determinación del área superficial del humedal se recomiendan dos alternativas:

- a) Usar los siguientes valores de carga hidráulica: 0.032 m²/l/día (para zonas frías o donde haya restricciones de espacio), y 0.021m²/l/día (para zonas donde haya restricciones de espacio)
- b) Método incluyendo la cinética del proceso

As = Qd. (LnCo - LnCe) / (Kt. D. n)







Dónde:

As = Área superficial m<sup>2</sup>

Qd = Caudal de diseño (m<sup>3</sup>/s)

Co = DBO<sub>5</sub> influente (mg/l)

Ce = DBO<sub>5</sub> efluente (mg/l)

Kt = Constante cinética de primer orden (día-1)

D = Profundidad (m)

n = Porosidad del medio

**Sección transversal.** Para determinar el área de la sección transversal se recomienda el uso de la ley de Darcy

 $A_{st} = \frac{Q}{K_{s} \cdot S}$ 

Dónde:

 $A_{st}$  = Área sección transversal m<sup>2</sup>

Q = Caudal medio diario (m<sup>3</sup>/día)

K<sub>s</sub> = Conductividad hidráulica m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día

S = Pendiente de fondo

 La conductividad utilizada para el diseño nunca puede ser mayor que la del medio de soporte. Se debe reducir dicha conductividad en un orden de magnitud para tener en cuenta los efectos de atascamiento asociados a la retención de sólidos en los humedales.

**Tabla 7.** Órdenes de magnitud de la conductividad hidráulica (Ks) en función del tipo de material granular utilizado como substrato en un humedal construido de flujo subsuperficial<sup>58</sup>.

Tipo de sustrato	Tamaño efectivo D¹º (mm)	Porosidad	Conductividad hidráulica Ks (m³/m²*d)
Arenas graduadas	2	28-32	100-1.000
Arenas gravosas	8	30-35	500-5.000
Gravas finas	16	35-38	1.000-10.000
Gravas medianas	32	36-40	10.000-50.000
Rocas pequeñas	128	38-45	50.000-250.000

Fuente: Reed, S.C., Crites, R.W. y Middlebrooks, E.J. (1995).

<sup>&</sup>lt;sup>58</sup> Reed, S.C., Crites, R.W. y Middlebrooks, E.J. (1995). Natural Systems for Waste Management and Treatment. Second edition. McGraw Hill. (p. 433)







- 2. Pendiente de fondo. se recomienda no usar la pendiente de fondo para ganar cabeza pues se corre el riesgo de dejar la entrada seca cuando hayan condiciones de bajo caudal. = 1 %, aunque de acuerdo con Cooper (1996) los valores de la pendiente (s) que se suelen utilizar varían en el rango de 0,01 m/m a 0,02 m/m<sup>59</sup>.
- 3. Usar piedra entre 50 mm y 100 mm para una longitud de 0.6 m alrededor del influente distribuidor y las tuberías colectoras del efluente para reducir el taponamiento
- 4. Usar solo sustrato lavado para eliminar los granos finos que puedan taponar los poros del sustrato y, posiblemente, causen flujo superficial.
- 5. Construir la berma al menos 150 mm por encima del sustrato y al menos 150 mm por encima de la superficie de la tierra.
- 6. Pendiente exterior 3H:1V
- 7. Pendiente interior 2H:1V
- 8. Ancho mínimo de la berma = 0.60 m
- 9. Carga orgánica máxima = 4 m²/kg de DBO<sub>5</sub>/día
- 10. Tiempo de llenado del lecho con agua = 1 2 días
- 11. Profundidad. Se recomienda que la profundidad media del lecho sea 0.6 m y que la profundidad en la entrada no debe ser menor de 0.3 m. Con profundidades mayores a 0.6 m, las raíces más profundas y los rizomas empiezan a debilitarse. Se recomienda que los lechos se construyan con al menos 0.5 m de cabeza sobre la superficie del lecho. Para lechos pequeños, esta puede reducirse.
- 12. Medio. Cuando se utilice grava como medio que carece de nutrientes, se recomienda que las semillas se planten en un medio fértil con el fin de evitar problemas posteriores.

Otros factores a tener en cuenta son los siguientes:

60

<sup>&</sup>lt;sup>59</sup> Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B. y Shutes, R.B.E. (1996). Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. WRc Swindon, UK. (p. 184)







**Material Vegetal.** Se recomienda que la superficie del humedal se cubra con vegetación. La elección de la vegetación depende del tipo de residuos, de la radiación solar, la temperatura, la estética, la vida silvestre deseada, las especies nativas y la profundidad del humedal, además usar dos celdas en serie. (Karen Setty, 2009)

De acuerdo con von Münch (2010), define para climas fríos, tropicales y subtropicales las especies vegetales más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales en humedales construidos, tal como se describe a continuación:

Los tipos de plantas utilizadas en humedales de flujo subsuperficial en climas más fríos (ejemplos): Phragmites australis: conocida como "caña" o "Carrizo y en inglés como "common reed" (es la planta más utilizada en Europa y en los países de climas fríos.

- Junco (Typha latifolia), en climas fríos la Typha es a menudo más sensible que el Phragmites, pero más fuerte en climas cálidos.
- Glyceria máxima, Phalaris arundinacea, lirio amarillo (Iris pseudacorus) y otras

Los tipos de plantas utilizadas en los humedales de flujo subsuperficial en climas subtropical y tropical de América del Sur, África, India y Asia Oriental son:

- Papyrus: Cyperus papyrus o papiro egipcio son decorativos, pero tienen los problemas que crecen hasta 3m de altura, tiende a formar una capa de materia orgánica en la superficie, y las plantas crecen solo por esquejes de la raíz de la planta madre, Papiro Paraguas albostriatus C. y C. alternifolius, plantas muy resistente, también son excelentes para una mayor concentración de aguas residuales o contenido de sal y Papiro Enano C.haspens; excelente cuando es el único cultivo, no sobrevive a la sombra de plantas más grandes.
- Junco Typha latifolia (en climas tropicales son más resistentes que el Phragmites australis)
- Especies del género Heliconia son decorativas, pero hay que tener en cuenta que algunas de estas especies prefieren media sombra y otras son de condiciones de bastante luz solar.

Una planta que no es típica en humedales y se utiliza con éxito en humedales de flujo subsuperficial de flujo vertical es el Vetiver – Chrysopogon zizanioides (Vetiveria zizanioideso comúnmente llamado: gras Cuscus), puede crecer hasta 1,5 metros de altura y constituye un eficaz sistema de raíces.







La planta tiene una gran capacidad de adaptabilidad ecológica, pero las raíces probablemente no tienen un sistema de transporte de oxígeno como de plantas de los humedales, por lo que su utilización debería limitarse a los humedales de flujo vertical. Las raíces parecen crecer menos en el tratamiento de aguas residuales, tal vez debido al alto contenido de nutrientes, pero el crecimiento es suficiente para mantener las funciones del humedal<sup>60</sup>.

Hidrosistemas Naturales con Pasto Vetiver. Se recomienda el uso de hidrosistemas con pasto de Vetiver en humedales construidos, consiste en la construcción e implementación de balsas flotantes sembradas con pasto Vetiver. A las aguas residuales con altos contaminantes se les depura mediante el uso de las balsas sembradas con pasto vetiver en un sistema hidropónico en donde se les reduce la concentración de contaminantes debido a la adsorción por parte de la planta.

En los humedales construidos se pueden instalar camas (balsas) flotantes en donde se plantarán esquejes de vetiver para que crezca su sistema radicular bajo aqua y pueda absorber los contaminantes, de acuerdo con Troung (2001), el pasto Vetiver se puede utilizar en humedales artificiales (construidos) para mejorar el tratamiento de los efluentes en los humedales, ya sea a pequeña escala o gran escala. El efluente puede ser tratado mediante sistemas hidropónicos a un nivel seguro para el medio ambiente, va que el uso de humedales para la eliminación de contaminantes implica una compleia variedad de procesos biológicos, que implica transformaciones microbiológicas y procesos físicoquimicos tales como adsorción, precipitación o sedimentación<sup>61</sup>.

El pasto Vetiver en concordancia con (Cull et al., 2000), establece que es adecuado en el tratamiento de aguas residuales debido a las siguientes características morfológicas y fisiológicas:

- Capacidad de tolerar las condiciones de suelo inundados, por lo que es ideal para su uso en humedales efímeros o permanentes.
- Sus tallos erectos puede reducir la velocidad del flujo, aumento del tiempo de retención y mejora la deposición de sedimentos como metales pesados y algunos residuos de plaguicidas, etc.

of Natural Resources and Mines. Barbara Hart M.E.C.H. Codyhart Environmental Consulting Pty. Ltd.

<sup>60</sup> Elisabeth von Münch (2010). Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas grises y aguas residuales domésticas en países en desarrollo. Agencia de la Cooperación Técnica Alemana (GTZ) GmbH. 61 Paul Truong. (2001). Vetiver System for Wastewater Treatment. The Vetiver Network and Queensland Department







- Su denso sistema radicular finamente estructurado, puede mejorar la estabilidad d la absorción de nutrientes, y proporcionar un ambiente que estimula procesos microbiológicos en la rizosfera.
- Lo más importante es su esterilidad debe minimizar su potencial de convertirse en una maleza acuática<sup>62</sup>.

**Nivel Freático.** Los humedales construidos para tratar aguas residuales no deben ser construidos en áreas donde haya suelos inundados. Esta precaución una alteración del flujo deseado y la consecuente contaminación del agua superficial y manto acuífero. (Karen Setty, 2009).

Eficiencia mínima de remoción del sistema de tratamiento. Cuando se habla de eficiencia mínima del sistema de tratamiento, se busca ante todo cumplir con los porcentajes de remoción exigidos en la normatividad ambiental vigente (Resolución 0631 de 2015). Por otro lado, al lograr una reducción considerable de metales pesados en los efluentes mineros mediante un sistema de tratamiento de humedales artificiales, antes de ser vertido a un cuerpo receptor, se pretende conservar el recurso hídrico, manteniendo también las características naturales del mismo. Se tomará como eficiencia mínima de remoción del sistema de tratamiento, un 80%.

# 5.3.5.4 Operación y mantenimiento

Se deben usar dos celdas en serie. Las celdas deben ser impermeabilizadas para evitar la infiltración. Es esencial que las raíces tengan siempre acceso a agua en el nivel de los rizomas en todas las condiciones de operación. Para medios muy permeables con alta conductividad hidráulica (tales como la grava), se recomienda que el nivel de agua se mantenga alrededor de 2 a 5 cm por debajo de la superficie del lecho63.

En cuanto a la operación de los humedales de flujo Vertical, según Cooper (2005) el funcionamiento de los humedales verticales se realiza de la siguiente manera: durante 2 días se va alimentando y luego se permite una fase de reacción de 4 días tras la cual se vacía el sistema. En un desarrollo reciente conocido como sistemas verticales

V (

<sup>&</sup>lt;sup>62</sup> Cull, R.H., Hunter, H., Hunter, M. and Truong, P.N. (2000). Application of Vetiver Grass Technology in off-site pollution control. II. Tolerance of vetiver grass towards high levels of herbicides under wetland conditions. Proc. Second Intern. Vetiver Conf. Thailand, January

<sup>&</sup>lt;sup>63</sup> Titulo E. Tratamiento de Aguas Residuales. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS- (2000). Ministerio de Desarrollo Económico. (p. 5).







compactos no se opera con fase de reacción, si no que el agua va entrando y saliendo de forma continuada<sup>64</sup>.

Adicionalmente, según EPA (2000) la operación y el mantenimiento (O/M) rutinarios de los humedales FS son similares a los de las lagunas facultativas, e incluyen el control hidráulico y de la profundidad del agua, la limpieza de las estructuras de entrada y descarga, el corte de la hierba en bermas, la inspección de la integridad de las mismas, el manejo de la vegetación del humedal y el monitoreo rutinario<sup>65</sup>.

El mantenimiento de un humedal construido debe implicar sólo un día a la semana o menos (US EPA1999):

Puede requerir el recorte de vegetación y control de erosión. La eliminación periódica de semillas extranjeras de árboles de la cama de humedal puede ser necesaria.

El humedal debe ser revisado con regularidad para uniformidad de flujo, para los olores indeseables. La invasión de plantas, de insectos, y de animales deben ser observados y quitados.

Si deseado, se puede monitorear el agua químicamente para asegurar el funcionamiento del humedal o investigar la eficiencia del humedal construido. Esto aumentará el costo y el tiempo requerido para el mantenimiento, pero es un indicador útil del tratamiento exitoso de aguas residuales. Los parámetros importantes para controlar incluyen pH, oxígeno disuelto (DO), los sólidos suspendidos (SS), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD), Coliforme y metales (Purdue 1999; Hammer 1989).

#### 5.3.6 Lechos de secado

5.3.6.1 Generalidades

El lecho de secado es básicamente una estructura filtrante que permite que los lodos que se generan en los tanques anaerobios y aerobios sean evacuados, secados y filtrados con el fin de devolver el lixiviado al tratamiento. Este proceso de deshidratación

64

<sup>&</sup>lt;sup>64</sup> Cooper P. (2005). The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates. Wat. Sci. Tech. 51 (9), 91-97.

<sup>&</sup>lt;sup>65</sup> Agencia de Protección Ambiental –EPA-. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. (p.8)







es uno de los más antiguos y más sencillos debido a su eficiencia y economía. Generalmente son rectangulares, poco profundos y con fondos porosos que utilizan una red de drenaje hasta un tanque acumulador de lixiviado (líquido filtrado altamente contaminado)<sup>66</sup>.

Consiste en acondicionar la recepción, filtrado, secado y acondicionamiento de los lodos con el fin de evitar que éstos contaminen de nuevo el agua depurada o la fuente hídrica en forma directa o indirecta. A través de este tratamiento se hace posible el aprovechamiento de los lodos para la agricultura<sup>67</sup>.

Los lechos de secado se pueden agrupar en cuatro tipos<sup>68</sup>:

- 1. Lechos rectangulares convencionales, con una capa de arena sobre grava, y con tuberías de drenaje subterráneas para recoger el agua. Se construyen con o sin instalaciones para la remoción mecánica del lodo seco, y con o sin cubierta.
- 2. Lechos de secado pavimentados, con una faja central de arena para drenado y con o sin cubierta.
- Lechos con malla de alambre, los cuales tienen un fondo de malla de alambre e instalaciones para inundarlos con una capa poco profunda de agua, seguida de la introducción de loso líquidos sobre la capa de agua.
- 4. Lechos rectangulares de vacío, con instalaciones para la aplicación de vacío a fin de acelerar el drenado por gravedad.

68 lbíd.

65

<sup>&</sup>lt;sup>66</sup> Rosas Edw. (2011). Capítulo 3: Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales de Betulia (Santander). Copyright: Attribution Non-commercial

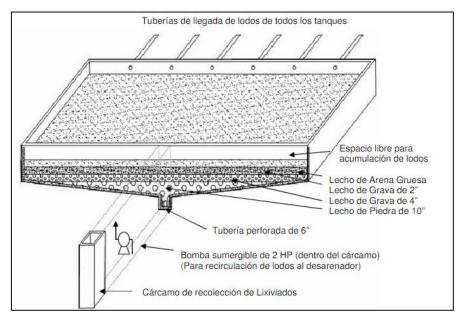
<sup>67</sup> Ibíd.







#### Ilustración 19. Vista tridimensional con corte frontal de un lecho de secado



Fuente: Rosas Edw. (2011).

La deshidratación del lodo tiene lugar debido al drenaje de las capas inferiores y a la evaporación de la superficie bajo la acción del sol y el viento. El lodo pastoso se agrieta a medida que se seca, lo que permite mayor evaporación y el escape del agua de lluvia de la superficie. Estos dispositivos sirven para eliminar una cantidad de agua suficiente de lodos para que puedan ser manejados como material sólido, con un contenido de humedad inferior al 70%<sup>69</sup>.

#### 5.3.6.2 Parámetros de diseño

#### Área del lecho de secado

El terreno que se requiere para el lecho de secado del lodo producido por el agua residual se puede calcular a partir de la producción de lodos generados diariamente<sup>70</sup>:

A=Y [kg/día] \* D[Lts/kg] \* P \* F[m3/lts]\*N[días] \* C[m2 /m3)]

<sup>&</sup>lt;sup>69</sup> Rosas Edw. (2011). Capítulo 3: Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales de Betulia (Santander). Copyright: Attribution Non-commercial
<sup>70</sup> Ibíd.







#### Donde,

Y = Peso del lodo producido en el día en kg/día

D = Densidad del lodo en l/kg

P = Porcentaje de humedad en el lodo

F = Factor de conversión para pasar a metros cúbicos en m3 /l = 1/1000

N = Número de días secado de lodos

C = Número de capas por metro cúbico en m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

El ancho de los lechos de secado es generalmente de 3 a 6 m., pero para instalaciones grandes puede sobrepasar los 10 m <sup>71</sup>.

# Carga de sólidos que ingresa al lecho<sup>72</sup>

Este parámetro se representa en kg de SS/día, y se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$C = Q * SS * 0.0864$$

Dónde:

SS: Sólidos en suspensión en el agua residual cruda, en mg/l.

Q: Caudal promedio de aguas residuales.

Considerando el número de aplicaciones al año, verificar que la carga superficial de sólidos aplicado al lecho de secado se encuentre entre 120 a 200 kg de sólidos/(m²\*año).

# Masa de sólidos que conforman los lodos<sup>73</sup>

Este parámetro se puede calcular en kg SS/día

$$Msd = (0.5* 0.7* 0.5*C) + (0.5* 0.3*C)$$

73 Ibíd.

<sup>&</sup>lt;sup>71</sup> OPS/CEPIS, UNATSABAR. (2005). Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques imhoff y lagunas de estabilización. Lima. 163.

<sup>72</sup> Ibíd







# Volumen diario de lodos digeridos<sup>74</sup>

Se calcula en litros/día

$$Vld = \frac{Msd}{\rho lodo*(\%de s\'olidos/100)}$$

Dónde:

plodo: Densidad de los lodos.

% de sólidos: % de sólidos contenidos en el lodo, varía entre 8 a 12%.

# Volumen de lodos a extraerse del sistema de tratamiento<sup>75</sup>

En m<sup>3</sup>, se calcula el volumen de lodo extraído del sistema de tratamiento por medio de la siguiente ecuación:

 $Vel = \frac{Vld*Td}{1000}$ 

Dónde:

Td: Tiempo de digestión, en días.

#### Construcción

El lecho puede estar dividido en tres capas de 30 cm cada una (arena, grava y piedra) y terminación en forma cónica que favorece la recolección mediante una tubería perforada de 6" que conduce los lixiviados hasta otro sistema donde se acumulan los líquidos<sup>76</sup>.

#### Manejo del lixiviado de los lodos filtrados

El lixiviado (líquido percolado de los lodos) puede ser captado en un pequeño cárcamo, para ser bombeados de nuevo al sistema de tratamiento de aguas residuales y ser pasados de nuevo por el proceso de tratamiento.

<sup>&</sup>lt;sup>74</sup> OPS/CEPIS, UNATSABAR. (2005). Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques imhoff y lagunas de estabilización. Lima. 163.

<sup>75</sup> lbíd.

<sup>&</sup>lt;sup>76</sup> Rosas Edw. (2011). Capítulo 3: Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales de Betulia (Santander). Copyright: Attribution Non-commercial







#### Geometría<sup>77</sup>

Un lecho de secado típico puede ser diseñado para retener en una o más secciones, el volumen total de lodo removido del sistema de tratamiento de agua. Los elementos estructurales del lecho incluyen los muros laterales, tuberías de drenaje, capas de arena y grava, divisiones o tabiques, decantadores, canales de distribución de lodo y muros.

Los muros laterales pueden tener un borde libre entre 0.5 y 0.9 m por encima de la arena. Debe asegurarse que no existan filtraciones laterales a través de los muros separadores. En la Tabla 8 aparecen los valores de área requerida en m² según el tipo de lodo que se deben usar.

Tabla 8. Área requerida según la fuente del lodo y el cubrimiento del lecho

Fuente de lodo inicial	Área (m²) (lecho sin cobertura)	Área (m²) (lecho con cobertura)
Primario	0.07 – 0.14	0.05 – 0.09
Primario más químicos	0.14 - 0.23	0.09 – 0.173
Primario más filtros percoladores de baja tasa	0.12 – 0.17	0.086 - 0.145

Fuente: RAS. 2000

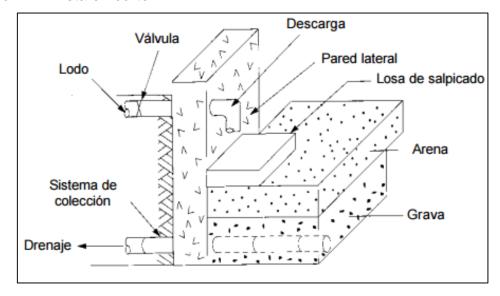
<sup>77</sup> Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico- RAS. (2000). Titulo E: Tratamiento de aguas residuales.







#### Ilustración 17. Vista en corte



Fuente: Ramírez Fernández, Guillermo A. (2003).

# Medio de Drenaje<sup>78</sup>

El medio de drenaje puede tener los siguientes componentes:

- El medio de soporte recomendado está constituido por una capa de 30 cm. formada por ladrillos colocados sobre el medio filtrante, con una separación de 2 a 3 cm. llena de arena.
- La arena es el medio filtrante y debe tener un tamaño efectivo de 0,3 a 1,3 mm, y un coeficiente de uniformidad entre 2 y 5.
- Debajo de la arena se deberá colocar un estrato de grava graduada entre 1,6 y 51 mm (1/6" y 2") de 0,30 m de espesor.

#### Tiempo para digestión de lodos

El tiempo requerido para la digestión de lodos varia con la temperatura, para esto se empleará la Tabla 9.

<sup>&</sup>lt;sup>78</sup> Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico- RAS. (2000). Titulo E: Tratamiento de aguas residuales.







**Tabla 9.** Tiempo requerido para la digestión de lodos

Temperatura (°C)	Tiempo de digestión en días
5	110
10	76
15	55
20	40
>25	30

Fuente: OPS/CEPIS, UNATSABAR. (2005)

# 5.3.6.3 Operación y mantenimiento

La operación de un lecho de secado es una función de<sup>79</sup>:

- La concentración de sólidos del lodo aplicado
- Profundidad del lodo aplicado
- Pérdidas de agua a través del sistema de drenaje
- Grado y tipo de digestión suministrada
- Tasa de evaporación (la cual es afectada por muchos factores ambientales)
- Tipo de método de remoción usado, y
- Método de disposición última utilizado

Para el mantenimiento se pueden tener en cuenta los siguientes aspectos<sup>80</sup>:

- Evacuación y extensión de lodos en el lecho de secado.
- Remoción del lodo seco del lecho de secado.
- Acondicionamiento en lecho de secado de los lodos reponiendo las arenas contaminadas.
- Control de olores.
- Control del lodo influente.
- Control de las dosificaciones.
- Operación bajo condiciones de carga mínima y máxima.

<sup>&</sup>lt;sup>79</sup> Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico- RAS. (2000). Titulo E: Tratamiento de aguas residuales.

<sup>&</sup>lt;sup>80</sup> Rosas Edw. (2011). Capítulo 3: Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales de Betulia (Santander). Copyright: Attribution Non-commercial.







- Operación bajo condiciones de caudal mínimo y caudal máximo.
- Programa de inspección periódico.
- Control de insectos y crecimiento de plantas.
- Manejo de la torta de lodos seca.
- Programa de muestreos y control de muestras en el laboratorio.

Se recomienda agregar un kilogramo de alumbre por cada 800 a 2500 L. de lodo para aumentar el desprendimiento de gases. Debe tenerse en cuenta la humedad de los lodos que se apliquen, la superficie del lecho disponible, así como la necesidad de espacio para almacenamiento en los digestores. Una capa delgada se seca más rápidamente, y permite la más rápida remoción del lodo. La superficie del lecho debe mantenerse limpia y libre de todos los lodos que se hayan descargado anteriormente. Nunca deben descargarse los lodos sobre otros ya secos o parcialmente secos. Una vez descargados los lodos de un digestor, las tuberías de lodos deben escurrirse bien y hacer circular agua por ellas. Esto no solo evita el taponamiento de las tuberías, sino también el desarrollo de grandes presiones originadas por los gases emanados de los lodos que queden dentro. Por este motivo, debe evitarse encender fósforos, cigarrillos o cualquier fuego, cuando se abran las válvulas de lodos<sup>81</sup>.

Se recomienda retirar los lodos dependiendo del tratamiento subsecuente de molida o picado, la necesidad de descargar los sistemas de tratamiento de agua, y, el contenido de humedad de los lodos que estén en los lechos. La torta que tenga un contenido de humedad de 60 a 70 %, puede retirarse con palas o rastrillos. Después de retirar los lodos, el lecho debe prepararse para la siguiente carga. Debe reponerse la arena que se haya perdido en limpiezas anteriores<sup>82</sup>.

#### 5.3.7 Relaveras

En la minería aurífera subterránea o a cielo abierto es recomendable la implementación de relaveras al final de la planta de beneficio, como método para minimizar los impactos relacionados al recurso hídrico y geotecnia, considerando los requerimientos de seguridad y protección ambiental exigidos actualmente, en especial el control y manejo de los vertimientos a cuerpos de agua superficiales, el reciclaje y reutilización de las aguas provenientes de los efluentes en la etapa de beneficio.

\_

<sup>81</sup> Rosas Edw. (2011).

<sup>82</sup> Ibit.







Este tipo de tecnología se puede utilizar en la UPM de mediana y gran escala; y es una "Obra de infraestructura construidas para almacenar o represar los relaves colas y desechos acuosos producto de grandes operaciones mineras. Generalmente al explotar una mina se retira la cobertura vegetal y esto ocasiona que el agua fluya por varias partes. Por lo anterior es necesario construir represas para almacenar esta agua o disminuir su velocidad."83

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

Las relaveras son construidas por etapas, proporcional al desarrollo de las operaciones en la UPM, según se vayan necesitando modificaciones en el diseño y la disposición de colas, o cambios surgidos en el proceso de beneficio, siendo necesario estudios mínimos e información de la zona donde se establecerá la estructura, resaltando factores como: (Instituto Tecnológico Geominero de España, 1989)<sup>84</sup>.

- Topografía: depende del relieve del terreno, llano o escarpado, se precisara un dique perimetral o vaguada en forma de U o V, donde se necesitan diques de cierres transversales, respectivamente. La pendiente influye en la altura máxima que alcanzará la relavera y su crecimiento. La topografía también fijara las dimensiones del área de drenaje superficial que será afectada por el depósito de residuos.
- Tamaño: viene ligado a la topografía del terreno y el tamaño mínimo está limitado por las necesidades de evaporación. En llano se requieren diques, analizando factores de impermeabilización y restauración final económicamente viables, mientras que en valle, la superficie del área ocupada y la altura de esas construcciones dependerá de la capacidad total de almacenamiento y evaporación necesaria.
- Geología y sismicidad: se debe considerar la sismicidad del área y la proximidad a fallas potencialmente activas, la disponibilidad de materiales de construcción, la

<sup>83</sup> Ministerio de Minas y Energía (2003). Glosario Técnico Minero. Bogotá D.C.

<sup>&</sup>lt;sup>84</sup> Ministerio de Industria y Energía (1989). Instituto Tecnológico Geominero de España. Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería. España.







capacidad portante y de drenaje de la base de apoyo y cualquier riesgo geológico cercano a la ubicación de la relavera.

- Permeabilidad: o conductividad hidráulica de la cimentación del dique y substrato de apoyo del depósito, es importante al momento de escoger el área si el drenaje de los efluentes es inadecuado desde un punto de vista ambiental, teniendo en cuenta formaciones poco permeables sobre aquellas donde las filtraciones pueden ser altas.
- Régimen de precipitaciones anuales y la evaporación, factores que influyen sobre la cantidad de agua almacenada en la relavera.
- Característica de las colas: la cantidad del efluente y sus vertidos, son decisivos para el diseño y operación de una relavera, al mismo tiempo que para establecer si se pueden recircular el agua hacia los procesos de tratamiento. Por lo anterior, las características químicas del efluente puede afectar la ubicación y el diseño. Cuando los efluentes contengan metales tóxicos, compuestos radiológicos o elementos potencialmente peligrosos las superficies de apoyo deberán revestirse para minimizar las filtraciones. Es necesario considerar los cambios que pueden producirse a largo plazo en la química de los efluentes, por la lixiviación u oxidación de los lodos almacenados en las relaveras abandonadas o clausuradas.

#### 5.3.7.1 Parámetros de Diseño

Los parámetros de diseño que se deben tener en cuenta antes de la construcción de la relavera, como tecnología para el tratamiento de colas en la minería aurífera son (López. J, 2014)<sup>85</sup>:

Características de la pulpa

La pulpa está definida por características físicas, que dependen de la cantidad de partículas sólidas que contenga, la densidad de ellas y la densidad del líquido transportante.

<sup>&</sup>lt;sup>85</sup> López Bonilla. J. (2014). Pontificia Universidad Católica del Perú "Diseño Hidráulico de un Sistema Gravimétrico para Relaves Mineros con un Caudal de 202 m³/h y 220 m de Desnivel". Lima.





a) Concentración en Peso - Cw: Es la relación que existe entre el peso de la fase sólida con respecto a toda la mezcla.

$$Cw = \frac{Cv * \rho_s}{\rho_m} = \frac{Cv * \rho_s}{Cv * \rho_s + (100 - Cv)}$$

b) Concentración en volumen - Cv: En concordancia al concepto anterior, es la relación entre el volumen de sólidos con respecto al volumen total de la mezcla.

$$Cv = \frac{Cw * \rho_m}{\rho_s} = \frac{Cw/\rho_s}{Cw/\rho_s + (1 - Cw)/\rho_s}$$

c) Densidad de la pulpa -  $\rho_m$ : El concepto de densidad en una pulpa se entiende como la masa de pulpa sobre volumen de pulpa existente. La medida de este parámetro se debe realizar cuando la pulpa se encuentra perfectamente mezclada, sin embargo muchas veces se prefiere relacionarlo con otros parámetros como la concentración en peso, concentración en volumen y la densidad de las fases.

$$\rho_m = \frac{Cv * \rho_s}{Cw} = \frac{1}{Cw/\rho_s + (1 - Cw)/\rho_L}$$

Es usual expresar este parámetro como densidad específica que se obtiene de dividir la densidad del lodo con la densidad del agua. Así, se podría plantear una nueva ecuación:

$$Sm = \frac{\rho_m}{\rho_w} = \frac{Cv * S_s}{Cw}$$

Donde:

 $\rho_s$  = Densidad de los sólidos (kg/m3).

 $\rho_L$  = Densidad del líquido (kg/m3).

 $\rho_m$ = Densidad de la pulpa (kg/m3).

 $\rho_w$  = Densidad del agua (kg/m3).

 $S_s$  = Densidad específica de los sólidos.

 $S_m$  = Densidad específica de la pulpa.

Cw = Concentración de sólidos en peso.

Cv = Concentración de sólidos en volumen.







d) Viscosidad Aparente y Efectiva: La viscosidad aparente es la que se genera de la interacción entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad y se define:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\gamma}$$

Dónde:

 $\tau$  = Esfuerzo cortante aplicado a una determinada altura (Pa).

 $\gamma$  = Gradiente de velocidad o Ratio de corte (1/s).

La viscosidad efectiva o local, tiene el mismo sustento que la aparente, pero discretizado en un diferencial de esfuerzo aplicado. Entonces, se define como:

$$\mu_1 = \frac{d_\tau}{d_\nu}$$

Dónde:

 $\tau$  = Esfuerzo cortante aplicado a una determinada altura (Pa).

 $\gamma$  = Gradiente de velocidad o Ratio de corte (1/s).

## Tipo de flujo

Este fenómeno se puede describir a través de la siguiente relación, a grandes tamaños de partículas y alta densidad de los sólidos el flujo es heterogéneo, mientras que a pequeños diámetros de partícula y baja densidad de los sólidos el flujo se hace homogéneo.

- a) Flujo Homogéneo: Para este tipo de flujo, las partículas sólidas se encuentran uniformemente distribuidas en el medio líquido de transporte, de tal manera que la relación de la concentración en el fondo de la tubería y en un plano superior sea lo más próximo a uno. Estos flujos se caracterizan por su alta concentración en peso, entre 50 y 60 %, la cual produce que la viscosidad se incremente. Con respecto al tamaño de partícula de sólido, Abulnaga, 2002; Wasp, 1979 y otros autores definen como tamaño típico, los menores a 70 μm.
- b) Flujo Heterogéneo: En un flujo heterogéneo, las partículas sólidas no están distribuidas uniformemente, en tanto, existe un gradiente de concentraciones. En el caso de pulpas en tuberías, la mayor concentración se encuentra en el fondo y las más ligeras se mantienen en suspensión. Según Baha Abulnaga, 2002 la concentración en peso de partículas para estos flujos es baja, menor a 25 %. Una característica básica de este flujo es que cada fase mantiene sus propiedades independientes de la otra.







- c) Flujo con Lecho Móvil: Cuando la velocidad de flujo es baja y existe un gran número de partículas gruesas, el lecho o cama se mueve como dunas de arena. En la parte superior, las partículas se arrastran con el movimiento del flujo, produciendo que las capas superiores se muevan más rápido que las capas del fondo en una tubería horizontal.
- d) Flujo con Lecho fijo: Este régimen surge cuando la velocidad del flujo disminuye, de tal manera, que la cama o lecho se espesa. Sin embargo, el flujo que se encuentra sobre el lecho se mueve y tratará de arrastrar las partículas de la superficie del lecho, provocando que estas rueden y salten. Al mismo tiempo, las partículas con la menor velocidad de sedimentación se moverán inmersas en una suspensión asimétrica, donde las partículas más gruesas incrementarán el lecho. Como la velocidad cae, la presión se incrementará para mantener el flujo y eventualmente la tubería terminará por bloquearse.

#### Transporte de la Pulpa hasta la relavera

En las plantas de beneficio, la mayoría de las veces se necesita transportar flujos de pulpa a niveles superiores o descargarlos a presiones considerables. Para esto se hace uso de bombas que aportan el caudal necesario para presurizar el flujo dentro de las tuberías. La presión al inicio del sistema va variando a medida que el flujo recorre la trayectoria de la tubería. Este fenómeno ocurre por la pérdida de presión por fricción entre las paredes internas de la tubería y el flujo, generando así una gradiente de presiones hasta la salida. Otro factor, es la velocidad, pues si esta es muy baja las partículas sedimentarán y si es muy alta el desgaste por abrasión será mucho más acelerado.

#### Material de la tubería

El material de la tubería es un componente determinante, puesto que este sufrirá un efecto térmico, por la variación de temperatura que sufre cada material. Esto puede producir dos efectos que dependen directamente de la condición en los extremos de la tubería.

Si la tubería tiene extremos flexibles, el efecto será un cambio dimensional (dilatación o contracción) y se determinará según la ecuación.

$$\Delta L = L_0 * \alpha_t * \Delta T$$

Dónde:

 $\Delta L$  = Deformación térmica.







 $L_0$  = Longitud inicial.

 $\alpha_t$  = Coeficiente de expansión térmico.

 $\Delta T$  = Variación de temperatura.

Mientras, si la tubería cuenta con extremos rígidos, el efecto será un esfuerzo térmico de tracción o contracción y se determina según la ecuación.

$$\sigma = E * \alpha_t * \Delta T$$

Dónde:

 $\sigma$  = Esfuerzo térmico longitudinal.

E = Módulo de elasticidad.

 $\alpha_t$  = Coeficiente de expansión térmico

 $\Delta T$  = Variación de temperatura.

Las alternativas de construcción de las relaveras o presas de relaves, pueden ser de dos formas (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2007)<sup>86</sup>:

## Método Aguas Arriba

Consiste en un muro inicial (starter dam) construido con material de empréstito compactado sobre el cual se inicia la deposición de los relaves, utilizando clasificadores; la fracción más gruesa o arena, se descarga y se deposita junto al muro inicial, mientras la fracción más fina o lamas, se deposita hacia el centro del tranque en un punto más alejado del muro, de modo tal que se va formando una especie de playa al sedimentar las partículas más pesadas de lamas y gran parte del agua escurre, formando el pozo de sedimentación o laguna de sedimentación, la que una vez libre de partículas en suspensión es evacuada mediante un sistema de estructura de descarga, que pueden ser las denominadas torres de evacuación, o bien, se utilizan bombas montadas sobre una balsa flotante. Una vez que el depósito se encuentra próximo a llenarse, se procede al levante del muro, desplazando la descarga a una mayor elevación en la dirección hacia aguas arriba y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas, y peralte del muro; se continúa sucesivamente la construcción en la forma indicada.

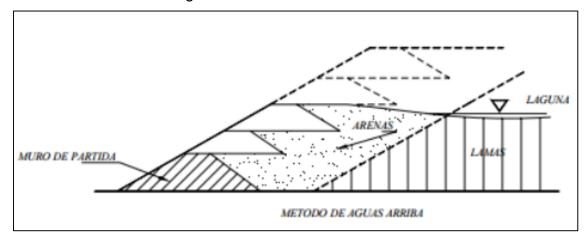
<sup>86</sup> Servicio Nacional de Geología y Minería (2007). Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves. Chile.







### Ilustración 18. Método de Aguas Arriba



Fuente: Guía Técnica de Operación y control de depósitos de Relaves. 2007.

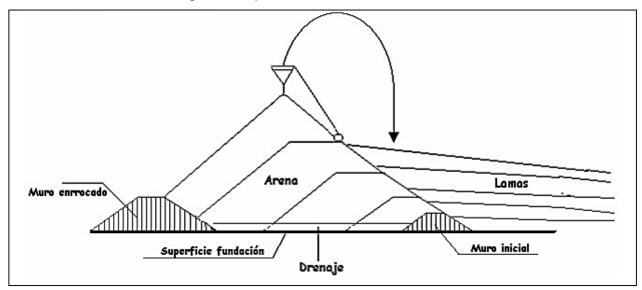
Método Aguas Abajo: La construcción se inicia también con un muro de partida de material de empréstito compactado desde el cual se vacía la arena hacia el lado del talud aguas abajo de este muro y las lamas se depositan hacia el talud aguas arriba. Cuando el muro se ha peraltado lo suficiente, usualmente 2 m a 4 m., se efectúa el levante del muro, desplazando la descarga a una mayor elevación en la dirección hacia aguas abajo y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas y peralte del muro. A veces se dispone también de un segundo muro pre-existente aguas abajo. Las arenas se pueden disponer en capas inclinadas, según el manteo del talud del muro de partida, o bien, disponerlas en capas horizontales hacia aguas abajo del muro de partida. Este método de aguas abajo requiere disponer de un gran volumen de arenas y permite lograr muros resistentes más estables del punto de vista de la resistencia sísmica.







## Ilustración 20. Método Aguas Abajo



Fuente: Guía Técnica de Operación y control de depósitos de Relaves. 2007.

# 5.3.7.2 Operación y Mantenimiento

En las UPM que cuentan con relavera o presa de relaves deben adoptar medidas que deben considerarse en el control operacional y mantención de los depósitos de relaves. (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2007)<sup>87</sup>.

- Se deben realizar periódicamente controles de la densidad in-situ en el muro de arenas y determinar de la densidad relativa el grado de compactación con que cuenta el muro de arenas en la operación.
- Controlar el nivel freático con piezómetros en el muro de arenas. El nivel freático debe ser más bajo que la cota del nivel de coronamiento del muro de partida.
- Cuando el nivel freático es alto, se debe proceder rápidamente a bajarlo, evacuando el agua clara de la relavera. Es importante además medir el nivel freático en algunos puntos aguas abajo y mantener una estadística gráfica con los datos obtenidos.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>87</sup> Servicio Nacional de Geología y Minería (2007). Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves. Chile.







- Establecer un control periódico de la granulometría de las arenas de relave. Un aumento repentino y significativo del porcentaje de finos compromete las condiciones de seguridad de la obra (formación de bolsones saturados y superficies localizadas menos resistentes al corte).
- Las partículas de las arenas de los relaves son muy angulares y heterogéneas, lo cual es favorable del punto de vista de la estabilidad ya que ayuda a lograr una buena compactación.
- Se debe medir el porcentaje de sólidos en peso de la pulpa de relaves, el cual debe mantenerse en un rango no tan alto para que se permita un buen escurrimiento de esta pulpa por la tubería de transporte, evitando su embancamiento, y tampoco muy bajo para no saturar rápidamente de aguas la cubeta. (un rango bien aceptado en la práctica es entre 35% a 45%).
- Se deben verificar periódicamente el ángulo de talud operacional comprometido en el proyecto y el ancho del coronamiento del muro de arenas.
- Controlar periódicamente el nivel y posición de las aguas claras, la cual debe mantenerse siempre lo más alejada posible del muro de arenas, con el fin de evitar humectar demasiado el muro y que se sature de agua, trayendo el consecuente aumento de la presión de poros entre las partículas y el eventual colapso.
- Verificar en forma periódica el estado de las tuberías de conducción de los relaves y también las válvulas y bombas de impulsión de la pulpa de relaves. Además, se debe programar con antelación el traslado de las tuberías a las posiciones de descarga siguientes.
- Una medida a tener presente en la construcción en los muros, es la de evitar conformar esquinas en ángulo recto ya que constituyen uno de los puntos estructuralmente más débiles frente a las solicitaciones sísmicas, debido a bajo confinamiento. Es por ello aconsejable establecer uniones redondeadas.
- Mantener la práctica de compactar el talud exterior a lo largo del muro de arenas, usando equipos adecuados como por ejemplo rodillos lisos vibratorios, tractores o buldócer pesados. Esto se hace con el fin de mantener una compactación adecuada del muro, ayudando así a una mejor estabilidad sísmica de la obra.
- Cuando la compactación es deficiente, se tiene mayor probabilidad de colapsar frente a una alteración sísmica significativa. Es por ello que la operación de







compactación en el muro resistente debe hacerse en forma regular junto con todas aquellas otras medidas que tienen incidencia con la estabilidad del tranque.

- Cuando durante la operación de una relavera no hay suficiente arenas de una calidad adecuada, es conveniente considerar agregar una o más capas intermedias de material de empréstitos bien compactado, para continuar la construcción del muro resistente y así se tendrá una mejor estabilidad física.
- Es importante mantener despejados los muros de arenas de cualquier objeto extraño puesto que los relaves sedimentan a la altura de los obstáculos que encuentran en el trayecto.

# 5.3.7.3 Restauración y abandono de Relavera

La actividad minera requiere la restauración de los terrenos intervenidos o afectados en la etapa extractiva y de beneficio. Para el caso de las relaveras se debe tener en cuenta (Instituto Tecnológico Geo Minero de España, 1989)<sup>88</sup>:

- La estabilidad de las estructuras a largo plazo, va a depender del nivel freático, puesto que al cesar el vertido de las colas, no existe un aporte de agua exterior, cayendo drásticamente los niveles freáticos, lo que se convierte en una mejora de la estabilidad de los taludes. Si se presenta alguna condición inadecuada, inicialmente se debe descargar parcialmente el material de coronación con vistas a reducir las tensiones en la base, otra técnica, es el aprovechamiento de ese material como refuerzo al pie de la presa sobre una capa filtro, al mismo tiempo que se reduce la pendiente del talud. También se puede reforzar adosando escombros sobre una capa dren creando bermas intermedias y la colocación de filtros invertidos para facilitar el drenaje en la base y la cimentación del dique.
- Los depósitos son susceptibles de erosionarse formando surcos y cárcavas bajo la circulación de lluvia por las superficies, incidiendo sobre los taludes, contra esto se deben diseñar los taludes con ángulos bajos comprendidos entre 3:1 y 5:1, adoptando métodos de protección y estabilización, como la escollera, estabilización química o revegetación, luego de la desecación y consolidación de los lodos.

<sup>&</sup>lt;sup>88</sup> Ministerio de Industria y Energía (1989). Instituto Tecnológico Geominero de España. Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería. España.







Al disminuir o cesar el caudal de los efluentes, se deben tomar medidas frente a la contaminación, en especial cuando los residuos contiene pirita al bajar el nivel freático se produce la oxidación, descendiendo el pH e incrementando la liberación de minerales contaminantes que son nocivos, frente a las sustancias presentes durante el período activo de la UPM. Como existe un riesgo de lixiviación de esos productos y, consecuentemente, de contaminación de las aguas subterráneas, a menudo se requiere la cubrición de las presas con una capa de arcilla antes del abandono, en combinación con la nivelación y afinado de las superficies para prevenir la formación de charcos. En el caso particular de lodos muy ricos en pirita, se puede contemplar la posibilidad de mantener saturada la relavera con el fin de evitar la oxidación a largo plazo. Otro tipo de contaminación que se puede dar, es el transporte biológico, cuando las plantas de la cubierta vegetal de esas estructuras son capaces de desarrollar suficientemente sus raíces para alcanzar el nivel de los lodos. En estos casos se produce una transferencia a la superficie de residuos tales como: selenio, molibdeno, radionucleidos y otros elementos que pueden pasar a la cadena alimenticia (Cline, 1979; Redente et al, 1985). Este mecanismo de contaminación depende de las especies vegetales que se utilicen en la restauración.







# **GLOSARIO**

**Aguas ácidas:** Se forman por meteorización de minerales sulfurosos, simultáneamente a la acción catalizadora de bacterias.

**Carbón activado:** Carbón tratado especialmente para obtener una gran capacidad de absorción de gases o vapores. En sustancias líquidas se usa como agente decolorante y para retirar impurezas.

Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días (DBO<sub>5</sub>): Cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para descomponer las sustancias orgánicas en cinco días a veinte grados centígrados de temperatura. Es una medida de la capacidad contaminante de un agua residual que indica la cantidad de oxígeno consumido en 5 días por los microorganismos en la degradación aeróbica de la materia orgánica que contiene.

**Dique**: Cuerpo tabular de roca ígnea intrusiva, relativamente larga y delgada, que rellena una fisura o una fractura profunda en rocas más antiguas, y las corta discordantemente (que corta a la estratificación de las capas). A veces pueden aparecer varios diques dispuestos paralelamente entre sí. Cuando son afectados por erosión pueden dar lugar a relieves descalzados, al ser los materiales del dique más resistentes que los circundantes, o formar una depresión en forma de fosa en el caso contrario.

**Filtración**: Separación de las partículas sólidas de un fluido, haciendo pasar la mezcla por un medio filtrante en el que se retienen los sólidos.

**Floculación:** Aglomeración de partículas finas suspendidas en un líquido, por métodos químicos o físicos.

**Hidrometalurgia**: Rama de la metalurgia extractiva que estudia la obtención de metales o compuestos a partir de minerales o fuentes secundarias mediante procesos que tienen lugar a bajas temperaturas en medio acuoso u orgánico.

**Lixiviación (beneficio):** Proceso hidrometalúrgico mediante el cual se realiza la disolución selectiva de los diferentes metales que contiene una mena, por medio de una solución acuosa que contiene un reactivo químico apropiado.

Macrófita: Formas macroscópicas de vegetación acuática. Comprenden las macroalgas, las pteriodofitas (musgos, helechos) adaptadas a la vida acuática y las







angiospermas. Teniendo en cuenta la morfología y fisiología, se clasifican en Macrófitas fijas al sustrato y Macrófitas flotantes.

**Material de Empréstito:** Es todo material que cumple ciertos parámetros de granulometría, humedad, etc. Generalmente el empréstito es usado como relleno estructural en obra.

**Metales pesados:** Elementos químicos del grupo de los metales, con densidad superior a 4.5 g/cm³ y masa atómica alta, como cadmio, cobre, cromo, mercurio, plomo, etc. Como contaminantes, son un grupo de sustancias que se metabolizan mal y que presentan toxicidad para los seres vivos, incluido el hombre.

Pulpa: Mezcla de mineral molido o pulverizado con agua o una solución acuosa.

Vertedero tipo Sutro: es un dispositivo que ayuda a controlar la velocidad de los liquidos.

**Vertimiento:** Descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido.

Vertimiento puntual: Es el que se realiza a partir de un medio de conducción, del cual se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo.







# **BIBLIOGRAFÍA**

- Álvarez Q., A. (2006). Tecnología de la concentración centrífuga Notas de Curso. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés Facultad de Ingeniería
- Bustamante, M. O. (2009). Mineralurgia. Notas de Clase. Medellín: Universidad Nacional. Facultad de Minas.
- Bustamante, M. O. (2013). Flotación de Minerales Apuntes de Curso. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas.
- Bustamante, M. O., Gaviria, A. C., & Restrepo, O. J. (2008). Concentración de Minerales. Notas de curso. Medellín: Universidad Nacional. Facultad de Minas.
- Cardona Arbeláez, G. (2012). Ademes de Madera. Fortificación de Minas. Notas de Curso. Medellín: Universidad Nacional. Facultad de Minas.
- CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE (CEPIS). (1988). Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades: tecnología de pequeños sistemas de abastecimiento de agua en países en desarrollo. Lima, Perú. 391 p.
- GONZÁLEZ, Jesús Fernández. Manual de fitodepuración, Filtros de macrófitas en flotación. Proyecto LIFE. Madrid: Universidad politécnica de Madrid, 2000, p. 81.
- HENRRY, J. GLYNN & HEINKE, GARY W. (1999). Ingeniería Ambiental. ISBN: 970-17-0266-2. México. P. 398-399.
- Herrera Herbert, J. (2006). Métodos de Minería a Cielo Abierto. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.
- Herrera Herbert, J. (2006). Métodos de Minería a Cielo Abierto. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.
- Hoover, H. C. (2008). Método por almacenamiento provisional. Filling with Broken Ore subsequently Withdrawn. Recuperado el 20 de 08 de 2015, de Principles of mining valuation, organization and administration: http://www.mirrorservice.org/sites/gutenberg.org/2/6/6/9/26697/26697-h/26697-h.htm







- Ingeniería Real. (2015). Tipos de tractores su uso y funcionamiento. Recuperado el 01 de 10 de 2015, de http://ingenieriareal.com/tipos-de-tractores-su-uso-y-funcionamiento/
- JIMENEZ, B. (2001). La contaminación ambiental en México: Causas, efectos y tecnología apropiada. México: Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A. C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA. P. 213.
- Lara Monge (2005). Procesos de Cianuración. Subproyecto "Asistencia técnica y capacitación para el desarrollo técnico de Amalar".
- León Wong, J. (1999). Situación actual de la mediana minería en el Ecuador. Cambio de sistema de producción en la mina Bonanza. Tesis de Grado. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Martínez Carillo (2012). Trituración y Molienda. Curso Procesamiento de Minerales Maestría en Ciencia y Tecnología de la Metalurgia
- Ministerio De Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS. "Sinopsis nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala. 2012.
- Ministerio de minas y energía (2006). "técnicas de para la extracción aurífera, proceso de cianuración y amalgamación.
- MinMinas. (1988). Métodos de Explotación Minera. Vetas y Aluvión.
- MinMinas. (2003). Glosario Minero.
- Monsalve Oliveros, J. E. (2013). Minería Subterránea. Notas de clase. Medellín: Universidad Nacional.
- Montaño, J. F. (2012). Maquinaria y Transporte Minero. Apuntes de curso. Medellín: Universidad Nacional. Facultad de Minas.
- OPS/CEPIS/05.158 UNATSABAR, (2005). Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores. Lima, Perú.
- Pavez Miqueles, O. (2004). Apuntes Concentración de Minerales II. Universidad de Atacama Facultad de Ingeniería.
- REPÚBLICA DE COLOMBIA, MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO, DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. (2000).







- Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS 2000). Sección II, Título C, Sistemas de Potabilización. Bogotá D.C.
- REPÚBLICA DE COLOMBIA, MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO, DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS 2000). Sección II, Título E, Tratamiento de Aguas Residuales. Bogotá D.C.
- Restrepo Baena, O. J. (2009). Curso Metalurgia Extractiva Apuntes. Universidad Nacional Facultad de Minas
- Romero, A., & Flores, S. (2010). La influencia de la velocidad de agitación en la lixiviación dinámica de minerales alterados. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG, Vol. 12, N.º 24, 133-140.
- SANS, R. & DE PABLO, J. (1989). Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos. Marcobombo, S. A. Barcelona, España.
- Universidad de La Laguna. (s.f.). Procedimientos de Construcción. Movimientos de tierra. Recuperado el 01 de 10 de 2015.
- UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD). Manejo de aguas residuales en pequeñas comunidades. Recuperado el 12 de noviembre de 2015 de:
  http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358041/EXE/leccin\_22\_sedimentadores.h
- Valderrama, L., Chamorro, J., Olguín, D., Rivera, J., & Oyarce, J. (2012). AMALGAMACIÓN DE CONCENTRADO DE ORO OBTENIDO EN CONCENTRADOR KNELSON. Revista de la Facultad de Ingenieria. Universidad de Atacama, 33-38.
- Valderrama, L., Chamorro, J., Olguín, D., Rivera, J., & Oyarce, J. (2012). AMALGAMACIÓN DE CONCENTRADO DE ORO OBTENIDO EN CONCENTRADOR KNELSON. Revista de la Facultad de Ingeniería. Universidad de Atacama, 33-38.

tml.