

**PROPUESTA PARA EL CIERRE DE UN DRENAJE ÁCIDO DE UNA MINA
ABANDONADA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE CALIFORNIA,
DEPARTAMENTO SANTANDER, COLOMBIA**

ALIX ESTELA YUSARA CONTRERAS GÓMEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2016

**PROPUESTA PARA EL CIERRE DE UN DRENAJE ÁCIDO DE UNA MINA
ABANDONADA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE CALIFORNIA,
DEPARTAMENTO SANTANDER, COLOMBIA**

ALIX ESTELA YUSARA CONTRERAS GÓMEZ

**Trabajo de grado para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Ambiental**

Director:

**Dionisio Laverde Cataño
Doctorado en Ingeniería Industrial**

Codirector:

**Diana Carolina Sierra Cárdenas
Maestría en Medio Ambiente**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, a mi hijo Salvador y a mis padres Wilson y Blanca.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. MARCO DE ANTECEDENTES	19
1.1. IMPACTOS AMBIENTALES PRESENTES EN MINAS ABANDONADAS	19
1.2. PASIVOS AMBIENTALES	20
1.2.1. Contexto internacional	20
1.2.2. Contexto nacional.	23
2. MARCO CONCEPTUAL	27
2.1. MINERÍA AURÍFERA SUBTERRÁNEA	27
2.2. DRENAJE DE MINA:	28
2.2.1. Definición DM.....	28
2.2.2. Clasificación DM	29
2.3. CIERRE MINERO Y PLAN DE CIERRE	31
2.3.1. Cierre de DAM.	33
2.3.1.1. Tecnologías de tratamiento de DAM.....	34
2.4. IMPACTO AMBIENTAL	36
2.4.1. Impacto ambiental asociado a los DAM	36
2.5. PASIVO AMBIENTAL	39
3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	41
4. OBJETIVOS.....	43
4.1. OBJETIVO GENERAL	43
4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	43
5. ALCANCE Y LIMITACIONES	44
6. METODOLOGÍA	45
6.1. ETAPA 1: SELECCIÓN DE LA BOCAMINA CON DAM PARA LA APLICACIÓN DEL ESTUDIO DE CASO	45

6.2. ETAPA 2: CARACTERIZACIÓN DEL DAM SELECCIONADO COMO ESTUDIO DE CASO Y SUS COMPONENTES HÍDRICO SUPERFICIAL Y EDÁFICO ASOCIADOS.....	45
6.2.1. Caracterización del Drenaje de mina.....	45
6.2.2. Caracterización del componente edáfico.....	46
6.2.3. Caracterización componente hídrico.....	48
6.2.3.1. Cálculo del ICA:.....	51
6.2.3.2. Cálculo de carga control y carga de vertimiento.....	54
6.3. ETAPA 3: DETERMINACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS SOBRE LOS COMPONENTES EDÁFICO E HÍDRICO SUPERFICIAL, POR EL DAM SELECCIONADO COMO ESTUDIO DE CASO	55
6.3.1. Determinación de impactos ambientales sobre el componente edáfico por acción del DAM.....	55
6.3.2. Determinación de impactos ambientales sobre el componente hídrico por acción del DAM.....	55
6.4. ETAPA 5: ELABORACIÓN DE UNA PROPUESTA DE CIERRE PARA EL DAM SELECCIONADO COMO ESTUDIO DE CASO	56
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
7.1. BOCAMINA SELECCIONADA PARA LA APLICACIÓN DEL ESTUDIO DE CASO.....	60
7.2. CARACTERIZACIÓN DEL DAM SELECCIONADO COMO ESTUDIO DE CASO.....	64
7.2.1. Caracterización del Drenaje Ácido de Mina	64
7.2.2.1 Caracterización físico química del DAM.....	64
7.2.2.2. Cantidad de DAM generado en la Bocamina	66
7.2.2.3. Cargas control y de vertimiento de sustancias de interés sanitario	66
7.2.2.4. Tipificación del DAM	67
7.3. CARACTERIZACIÓN DEL COMPONENTE HÍDRICO SUPERFICIAL.....	68
7.4. CARACTERIZACIÓN DEL COMPONENTE EDÁFICO	70

7.5. DETERMINACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES SOBRE LOS COMPONENTES EDÁFICO E HÍDRICO PARA EL DAM SELECCIONADO COMO ESTUDIO DE CASO	72
7.5.1. Determinación de impactos ambientales sobre el componente edáfico por acción del DAM.....	75
7.5.1.1. Acidificación del suelo.....	75
7.5.1.2. Pérdida de la calidad del recurso suelo	75
7.5.1.3. Acumulación de elementos tóxicos	76
7.5.2. Determinación de impactos ambientales sobre el componente hídrico superficial por acción del DAM.....	79
7.5.2.1. Acidificación del recurso hídrico superficial.....	79
7.5.2.2. Pérdida de la calidad del recurso hídrico superficial	81
7.5.2.3. Acumulación de elementos tóxicos en el agua.	82
7.6. PROPUESTA DE CIERRE PARA EL DAM SELECCIONADO COMO ESTUDIO DE CASO	87
7.7.1. Objetivos del cierre del DAM seleccionado como estudio de caso	87
7.7.2. Selección de sistema de tratamiento para el cierre del DAM del estudio de caso	88
7.7.2.1. Selección de sistema de tratamiento activo para el DAM en estud.....	88
7.7.2.2. Selección de sistema de tratamiento pasivo para el DAM en estudio.....	91
8. CONCLUSIONES	95
9. RECOMENDACIONES	97
10. BIBLIOGRAFÍA	99
ANEXOS	111

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales países con mayor número estimado de minas abandonadas en el mundo	22
Tabla 2. Número de minas abandonadas en Australia	23
Tabla 3. Localización y codificación de muestras de suelo.....	47
Tabla 4. Localización y codificación de muestras de suelo.....	49
Tabla 5. Ponderación ICA con 6 variables del IDEAM	52
Tabla 6. Cálculo para cada variable del ICA	52
Tabla 7. Descripción de la valoración ICA	54
Tabla 8. Resultados caracterización DAM seleccionado como caso de estudio....	64
Tabla 9. Caudal del DMA seleccionado (medido <i>in situ</i>).....	66
Tabla 10. Cargas control y de vertimiento de sustancias de interés sanitario.....	67
Tabla 11. Clasificación del DAM seleccionado como caso de estudio.....	68
Tabla 12. Resultados caracterización Quebrada La Baja aguas arriba y aguas abajo del DAM seleccionado como caso de estudio.....	68
Tabla 13. Resultados caracterización suelo afectado por el DAM seleccionado como caso de estudio	70
Tabla 14. Matriz de identificación de impactos ambientales sobre el componente edáfico por acción del DAM	73
Tabla 15. Matriz de identificación de impactos ambientales sobre el componente hídrico por acción del DAM	74
Tabla 16. Concentraciones de metales en suelos afectados por DAM y normas internacionales de calidad de suelo	77
Tabla 17. Resultados número de personas que se podrían abastecer del DAM en estudio.	82
Tabla 18. Resultados de parámetros para el DAM y los puntos (muestras) agua arriba y aguas abajo, y su comparación por tipo de uso con normativa nacional e internacional.....	83

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Clasificación DM según pH.....	29
Figura 2. Clasificación DM según pH, características y requerimientos de control	29
Figura 3. Clasificación DM según Acidez o Alcalinidad.....	30
Figura 4. Clasificación tratamientos activos y pasivos para DAM	35
Figura 5. Síntesis de impactos ambientales causados por los Drenajes ácidos de mina sobre el recurso hídrico superficial y edáfico	39
Figura 6. Ubicación puntos de muestreo de suelo afectado por DAM	47
Figura 7. Entrega de muestras de suelos al Laboratorio	48
Figura 8. Ubicación espacial de los puntos de muestreo del componente hídrico superficial.....	49
Figura 9. Entrega de muestras de suelos al Laboratorio	50
Figura 10. Árbol de decisión para la selección de tratamientos activos	58
Figura 11. Árbol de decisión para la selección de tratamientos pasivos	59
Figura 12. Bocamina visitada No. 1: No seleccionada	60
Figura 13. Bocamina visitada No. 2: No seleccionada	61
Figura 14. Bocamina visitada No. 3: No seleccionada	61
Figura 15. Bocamina visitada No. 4: Seleccionada	62
Figura 16. Bocamina seleccionada para la aplicación del estudio de caso.....	63
Figura 17. Quebrada La Baja: Llegada del DAM y condiciones aguas arriba y aguas abajo.	64
Figura 18. Distribución contenido de MP en el DAM y su cuerpo hídrico receptor.	70
Figura 19. Distribución del contenido de MP en suelos colindantes al DAM	72
Figura 20. Clasificación del suelo colindante al DAM	75
Figura 21. Valores de pH en el DAM y en la Quebrada La Baja	80
Figura 22. Valores de Acidez en el DAM y en la Quebrada La Baja	80
Figura 23. Índice de Calidad del Agua Q. La Baja - condiciones antes y después del DAM, municipio de California (Santander), mayo de 2016.....	81
Figura 24. Concentraciones de hierro en el DAM y Quebrada La Baja, mayo de 2016.....	84
Figura 25. Concentraciones de manganeso en el DAM y Quebrada La Baja, mayo de 2016.....	85
Figura 26. Concentraciones de cromo hexavalente en el DAM y Quebrada La Baja, mayo de 2016	87
Figura 27. Selección de tratamiento activo para el DAM en estudio.....	89
Figura 28. Posible ubicación para el tratamiento del DAM en estudio	91
Figura 29. Selección de tratamiento pasivo para el DAM en estudio.....	92
Figura 30. Tipo de Humedales Anaerobios aplicado a los DAM	94

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Resultado de laboratorio: monitoreo de aguas y suelos.....	111

LISTA DE SIGLAS, SIMBOLOS, ACRÓNIMO Y ABREVIATURAS

Al	Aluminio
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
ANM	Agencia Nacional Minera
As	Arsénico
ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades
Ca(OH)₂	Hidróxido de calcio
CaO	Óxido de calcio
CAR	Corporación Autónoma Regional
Cd	Cadmio
CDC	Concentración de control
CMP	Carga Máxima Permisible
Cr	Cromo
Cr⁺⁶	Cromo Hexavalente
Cu	Cobre
CV	Concentración en el vertimiento
DAM	Drenaje Ácido de Mina
DM	Drenaje de Mina
DN	Drenaje Neutro
DQO	Demanda Química Oxígeno
DS	Drenaje Salino
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
ELAW	Alianza Mundial de Derecho Ambiental
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América
Fe	Hierro
ICA	Índice de Calidad Ambiental
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia

INAP	Red Internacional para la Prevención del Ácido
kg/d	Kilogramo por día
km	Kilometro
L	Litros
L/d	Litros por día
L/s	Litros por segundo
LA	Licencia Ambiental
L-persona/d	Litros por persona por día
m	Metros
m²	Metros cuadrados
mg/Kg	Miligramos por kilogramo
mg/L	Miligramos por litro
MINAMBIENT	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia
E	
MINMINAS	Ministerio de Minas y Energía de Colombia
Mn	Manganeso
MP	Metales Pesados
N	Nitrógeno
Na(OH)₂	Hidróxido de sodio
Na₂CO₃	Carbonato de sodio
NTC	Normas Técnicas Colombianas
OD	Oxígeno Disuelto
OMS	Organización Mundial de la Salud
P	Fósforo
PAM	Pasivo Ambiental Minero
PARF	Plan de Abandono y Restauración Final
Pb	Plomo
PCM	Plan de Cierre Minero
PMA	Plan de Manejo Ambiental

PTO	Plan de Trabajo y Obras
Q	Caudal
S	Azufre
s	Segundo
SST	Sólidos suspendidos totales
UIS	Universidad Industrial de Santander
USDA	Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos
μS/cm	Microsiemens por centímetro

RESUMEN

TITULO: PROPUESTA PARA EL CIERRE DE UN DRENAJE ÁCIDO DE UNA MINA ABANDONADA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE CALIFORNIA, DEPARTAMENTO SANTANDER, COLOMBIA*

AUTOR: ALIX ESTELA YUSARA CONTRERAS GÓMEZ**

PALABRAS CLAVE: Minería aurífera, minería subterránea, drenaje ácido de mina, pasivo ambiental, impacto ambiental, tratamientos activos y pasivos.

Los Drenajes Ácidos de Mina –DAM-, son el *pasivo ambiental** más importante de la industria minera. Esta afirmación tiene base en la existencia de un alto contenido de metales pesados en el drenaje, que una vez generado debe ser tratado indefinidamente. Esta condición de permanencia conlleva a altos costos, asociados a la construcción y operación del tratamiento, seguimiento por parte de personal idóneo y monitoreo para la verificación del cumplimiento de la normatividad.

El impacto ambiental de los DAM se enfoca en los componentes: hídrico y edáfico, como medios receptores de la contaminación. De acuerdo con muchos estudios realizados los principales impactos a estos componentes son: acidificación del suelo, pérdida de la calidad del suelo, contaminación a la cadena alimenticia, acumulación de elementos tóxicos, daños a la biota y erosión.

El estudio de caso de un DAM en estado de abandono en el municipio de California (departamento de Santander), evidencia la afectación sobre el recurso hídrico superficial y el recurso suelo, por pérdida de la calidad, acumulación de elementos tóxicos (metales pesados) y acidificación.

La propuesta de cierre planteada para el DAM en estudio implicó principalmente la selección de la tecnología de tratamiento más adecuada, de acuerdo con sus características químicas y consideraciones del área de ubicación del tratamiento. La elección del tratamiento tuvo como base la aplicación de diagramas de decisión desarrollado por expertos y la revisión de distintas experiencias.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dionisio Laverde Cataño, Ingeniero Metalúrgico, Ph.D. Codirector: Diana Carolina Sierra Cárdenas Ecóloga, Msc.

ABSTRACT

TITLE: PROPOSAL FOR THE CLOSING OF AN ACID MINE DRAINAGE FROM AN ABANDONED MINE LOCATED IN THE MUNICIPALITY OF CALIFORNIA, DEPARTMENT OF SANTANDER, COLOMBIA*

AUTHOR: ALIX ESTELA YUSARA CONTRERAS GÓMEZ**

KEY WORDS: Gold mining, Underground mining, Acid mine drainage, Environmental liability, Environmental impact, Active and passive treatments.

Acid mine drainage (AMD), is the most important environmental liability of the mining industry. This affirmation is based on the existence of a high amount of heavy metals in the drainage, that once generated must be treated for life. This condition of continuity entails high costs, associated with the construction and operation of the treatment, follow-ups on behalf of the appropriate person and monitoring for the verification of compliance with existing regulations.

The environmental impact of ADM focuses on water and soil components as polluting media. According to many studies carried out the principal impacts to these components are: soil acidification, soil quality loss, food chain contamination, buildup of toxic elements, damage to the flora and biota and erosion.

The case study of an abandoned ADM in the municipality of California, evidences the damage to superficial water and ground resources, for loss of quality, accumulation of toxic elements, and acidification.

The proposal presented for the closing of an ADM originating from the entrance of a gold mine, requiring mainly the selection of treatment technology that is more suitable according to its characteristics. The decision making in respect to the treatment, was based on a diagram developed by experts and in the results of different experiences in management of ADM.

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dionisio Laverde Cataño, Ingeniero Metalúrgico, Ph.D. Codirector: Diana Carolina Sierra Cárdenas Ecóloga, Msc.

INTRODUCCIÓN

El impacto ambiental más significativo de las minas abandonadas o de un cierre minero inadecuado, es la generación de Drenaje Ácido de Mina –DAM- por su potencial devastador sobre la vida acuática¹.

En Colombia existen muchas minas en estado de abandono, resultado principalmente, de operaciones ilegales e informales, o producto de la falta de exigencia de las autoridades ambientales y mineras².

En Colombia, la “Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales”, desarrollada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), adoptada mediante la Resolución 1503 de 2010, establece en su numeral 2.8 los lineamientos para la proyección del “Plan de Abandono y Restauración Final (PARF)”. Este plan es conocido en otros países como “Plan de Cierre”.

La Contraloría General de la Nación en el año 2013, informó que no existen mecanismos normativos directos que obliguen a los titulares mineros a responder por los daños causados, compensar el impacto y asumir sus responsabilidades a largo plazo. De tal manera, las minas en abandono e ilegales se convierten en una responsabilidad para el estado en materia de restauración ambiental³.

¹ ELAW, Alianza Mundial de Derecho Ambiental. Guía para estudios de impacto ambiental de proyectos mineros. En: Alianza Mundial de Derecho Ambiental. 1 ed. Estados Unidos: 2011. p 6-9.

² ARANGO, Marcela. Requerimientos para el diseño de una metodología que permita estimar el valor de pasivos ambientales mineros. Tesis de grado para optar el título de Maestría en Medio ambiente y Desarrollo. Colombia, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2011. p. 6-8.

³ COLOMBIA. CONTRALORÍA GENERAL DE LA NACIÓN. Minería en Colombia: Fundamentos para superar el modelo extractivista. 2013, 209p. {En línea}. {Consultado septiembre 2015}. Disponible en: <http://www.colombiapuntomedio.com/Portals/0/Archivos2013/Miner%C3%ADa.pdf>

El PARF debe contemplar como un aparte importante el cierre de los DAM. Para esto existen dos tipos de estrategias de gestión; una preventiva y otra reactiva. La estrategia preventiva se aplica en la planeación, mediante la elección del método de exploración que menos drenaje genere; mientras la estrategia reactiva o correctiva, corresponde a las técnicas para el control y tratamiento cuando hay existencia de drenaje⁴.

Para el caso del DAM seleccionado, la propuesta de cierre corresponde al control del drenaje para su aseguramiento químico. Este consiste en tratar el drenaje para reducir las cargas contaminantes; especialmente su contenido de metales, mejorar la calidad del vertimiento y en consecuencia las condiciones de la Quebrada La Baja en el punto aguas abajo de la descarga del DAM.

La selección del sistema de tratamiento para el control del DAM en estudio, se realizó usando los diagramas de decisión propuestos por Trumm⁵, que en principio son similares a los establecidos por la Red Internacional para la Prevención del Ácido (INAP por sus siglas en inglés). De esta aplicación se obtuvieron varias opciones de tratamiento (activas y pasivas).

⁴ SERNAGEOMIN, Servicio Nacional de Geología y Minería. Ministerio de Minería de Chile. Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras, 2015, p. 248.

⁵ TRUMM, D. Selection of active and passive treatment systems for AMD—flow charts for New Zealand conditions, New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 53:2-3, 2010, p. 195-210, ISSN: 0028-8306.

1. MARCO DE ANTECEDENTES

1.1. IMPACTOS AMBIENTALES PRESENTES EN MINAS ABANDONADAS

Corresponde a los efectos positivos o negativos, sobre los componentes biofísico y social, que se presentan en las minas abandonadas; se manifiestan de diversas formas, con una perduración prolongada en el tiempo.

De tal forma, entre los impactos más comunes se encuentran: alteración física de los paisajes; aparición de pilas de desechos; contaminación de aguas y acuíferos; pérdida de biodiversidad; daños en la fauna; alteraciones del paisaje; contaminación de aguas superficiales, subterráneas y suelo por la presencia de metales pesados, filtraciones de ácido, aumento de sedimentos y presencia de hidrocarburos, así como pérdida de terrenos productivos para cosecha, entre otros⁶.

Durante el período de la actividad minera, la vegetación y el suelo sufren destrucción y degradación por eliminación física de la capa superior del segundo, en lugares donde se desarrollan procedimientos de desmonte o apertura de frentes, vertido de escombros, construcción de balsas o presas y otras infraestructuras. Igualmente, al presentarse pérdida de vegetación, genera en consecuencia afectación a la fauna existente, que puede perdurar incluso cuando las prácticas mineras se paralizan o son abandonadas sin ningún tipo de compensación⁷.

Las superficies mineras (relacionado con el impacto sobre el recurso suelo) abandonadas quedan expuestas a los agentes atmosféricos, sufriendo cambios gravitacionales o de erosión hídrica y eólica; esto contribuye a la generación de

⁶ ARANGO, Marcela. Requerimientos para el diseño de una metodología que permita estimar el valor de pasivos ambientales mineros. Tesis de grado para optar el título de Maestría en Medio ambiente y Desarrollo. Colombia, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2011. p. 6-8.

⁷ ASGMI, Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericana. Pasivos Ambientales Mineros. En: Manual para el Inventario de Minas Abandonadas o Paralizadas. 2010. p 12.

material particulado cuando el agente generador es el viento, y a vertimientos con aportes de sedimentos cuando el agente es el agua de escorrentía. Debido a esto se disminuye la calidad del aire para el primer caso y la calidad del agua para el segundo caso. Adicionalmente, pueden surgir impactos más graves cuando las partículas erosionadas proceden de superficies que contienen elementos potencialmente tóxicos⁸.

El impacto ambiental más significativo de las minas abandonadas, o de un cierre minero inadecuado, es la generación de drenaje ácido por su potencial devastador sobre la vida acuática. Esto se debe a que el drenaje ácido, generado por la excavación como tal, puede disolver los metales que se encuentren en los materiales minados o estén presentes en el suelo, por el cual se transporta hasta un cuerpo hídrico⁹.

1.2. PASIVOS AMBIENTALES

1.2.1. Contexto internacional. Para el año 1980, el reporte “Global 2000 Reporte” realizado por Gerald O. Barney, para el entonces presidente de los Estados Unidos, Jimmy Carter, estimaba que las operaciones mineras ocupan alrededor del 0,2% (37.000 km²) de la superficie de la tierra. En el año 2003, Hilson manifestó que esta cifra es mucho mayor debido al aumento significativo de demanda de materias primas y al aumento poblacional a nivel mundial¹⁰.

En el año 2007 en Australia, se demostró que la minería de metales ha incrementado continuamente. La apertura de minas a cielo abierto a gran escala es

⁸ *Ibíd.*

⁹ ELAW, Alianza Mundial de Derecho Ambiental. Guía para evaluar EIA de proyectos mineros. En: Alianza Mundial de Derecho Ambiental. 1 ed. Estados Unidos: 2011. p 6-9.

¹⁰ HILSON G. Defining “cleaner production” and “pollution prevention” in the mining context. *Minerals Engineering* 2003; 16:305–21.

cada vez un hecho más común, al igual que el aumento en la producción de residuos por el desarrollo de la actividad¹¹.

Por ejemplo en el año 2006 en Queensland (Australia), la superficie total del estado afectada por la minería era equivalente a 146.000 hectáreas, con un daño ambiental del 30% anual respecto al 2005, superior incluso a los niveles reportados en años anteriores, por lo que la rehabilitación anual no alcanza a mantenerse al día respecto la tasa de daños generados¹².

Históricamente, era una práctica común abandonar la mina cuando se completaba el proceso de minería. Por ejemplo, en los Estados Unidos de América las zonas degradadas por la minería “*Legacy mine land*” son lugares abandonados o en ruinas, conocidos también como PAM o sitios huérfanos “*orphaned sites*”, que requieren obras de rehabilitación y cierre minero. Así, el uso posterior de este suelo necesariamente está influenciado por su pasado minero, particularmente porque sus PAM pueden representar amenazas reales o potenciales al medio ambiente, salud y seguridad humana¹³.

Para el año 2009, el principal país con minas en estado de abandono era Estados Unidos de América, seguido de Australia, Inglaterra, Canadá, Sur África, Japón y Suecia, como se muestra en la Tabla 1¹⁴. Sin embargo, alrededor del mundo es probable que existan millones de minas en estado de abandono que aún no han sido tipificadas; lo cierto es, que incluso la información con la que se cuenta para los principales países con PAM, es deficiente.

¹¹ DOMAGALA J, Wilson I. Mining disturbance. Queensland State of the Environment Report 2007:119–23.

¹² *Ibíd.*

¹³ MILGROM T. Environmental aspects of rehabilitating abandoned quarries: Israel as a case study. *Landscape and Urban Planning* 2008; 87:172–9.

¹⁴ WORRALL A., David Neil B., David Brereton C., David Mulligan. Towards a sustainability criteria and indicators framework for legacy mine. *Journal of Cleaner Production* 2009; 17: 1426-1434.

Tabla 1. Principales países con mayor número estimado de minas abandonadas en el mundo

País	Número de minas	Calidad de información
Estados Unidos de América	600,000	Pobre
Australia	32,600	Media
Inglaterra	11,700	Buena
Canadá	10,100	Media
Sur África	8,000	Media
Japón	5,500	Buena
Suecia	1,000	Buena

Fuente: Worrall A., et al. (2009).

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas, en el año 2014, analizó la problemática en torno a los PAM, así como las buenas prácticas mineras que se deberían adoptar para evitar su crecimiento. En ese estudio se dedujo que el primer paso es la identificación y caracterización de los PAM, con la finalidad de priorizar su intervención con objeto de remediación. Canadá, Australia y Estados Unidos han hecho importantes avances, pero aun así no cuentan con un inventario de calidad. En el caso de países latinoamericanos, Chile y Perú son los de mayor avance¹⁵.

Para el caso de Australia, al año 2012 se tenían 52534 minas en abandono (Tabla 2), con tan solo 3 de 6 estados (Queensland, Nueva Gales del Sur y Tasmania) implementando programas formales para su manejo. La discusión en este país radica en que los inventarios no reflejan la magnitud de los impactos ambientales¹⁶. Este debe ser un aspecto importante para priorizar la intervención de los PAM.

¹⁵ CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Buenas prácticas que favorezcan una minería sustentable: La problemática en torno a los pasivos ambientales mineros en Australia, el Canadá, Chile, Colombia, los Estados Unidos, México y el Perú. Serie Macroeconomía del Desarrollo N° 157. 2014, 52p. ISSN 1680-8843 {En línea}. {Consultado julio 2016}. Disponible en: <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/7/53967/BuenasPracticasMineriaSustentable.pdf>

¹⁶ Ibid.

Tabla 2. Número de minas abandonadas en Australia

Estado	Número de minas
Australia Occidental	9,870
Nueva Gales del Sur	410
Australia del Sur	3,638
Queensland	15,380
Victoria	19,010
Tasmania	4,226
Total	52,534

Fuente: Unger, et al. (2012).

Cabe resaltar que Perú fue el primer país en América Latina en establecer un marco normativo específico para PAM, en el año 2004 (Ley de Pasivos Ambientales)¹⁷; seguido de Chile que para el año 2011 estableció la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras¹⁸. Países como Colombia y México se encuentran en una etapa más atrasada en la identificación, inventario y caracterización de sus PAM, no obstante, los gobiernos están haciendo grandes esfuerzos para avanzar en ello¹⁹.

1.2.2. Contexto nacional. En Colombia las actividades mineras están sujetas al código de minas, que regula toda la actividad. En cuanto a los aspectos ambientales, la regulación se hace a partir del proceso de licenciamiento ambiental, que brinda el soporte técnico (para toma de decisiones sobre el uso adecuado de los recursos naturales) en los Estudios de Impacto Ambiental –EIA- y Planes de

¹⁷ PERÚ. PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. LEY Nº 28271. (2, julio, 2004). Por la cual se regula los pasivos ambientales de la actividad minera. {En línea}. {Consultado mayo 2016}. Disponible en: http://www.fonamperu.org/general/pasivos/documentos/ley_pam.pdf

¹⁸ CHILE. MINISTERIO DE MINERÍA. Ley 20551. (11, noviembre, 2011). Por la cual se regula el cierre de instalaciones mineras. {En línea}. {Consultado julio 2016}. Disponible en: <http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/cierrefaena/01.Ley20.551.pdf>

¹⁹ CEPAL. Op. cit.

Manejo Ambiental –PMA-. Así mismo, incluye el concepto de póliza de garantía, para cubrir entre otras obligaciones las de carácter ambiental²⁰.

La Contraloría General de la Nación, en el año 2013, informó que no existen mecanismos normativos directos que obliguen a los titulares mineros a responder por los daños causados, compensar el impacto y asumir sus responsabilidades a largo plazo. Las minas en abandono e ilegales se convierten en una responsabilidad para el estado en materia de restauración ambiental, y las sanciones señaladas en la Ley 1333 de 2009 resultan insuficientes frente a los daños que podrían ocasionar proyectos mineros²¹.

El Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), afirmó en el año 2011 que no es posible hablar en Colombia de pasivos ambientales derivados de la minería, debido a que aún no se ha adoptado una definición y falta reglamentación jurídica al respecto²². Durante los años 1999 y 2000, el Ministerio desarrolló talleres nacionales y regionales, para la discusión de la problemática y abordaje de los PAM²³.

Por ejemplo, Perú en su ley No. 28271 de 2004 definió los Pasivos Ambientales como: "... aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad"²⁴.

²⁰ YUPARI, A. Informe "Pasivos Ambientales Mineros En Sudamérica". Informe elaborado para la CEPAL, el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales, BGR, y el Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN, 2009, p. 1-23. URL:<http://bibliotecavirtual.minam.gob.pe/biam/bitstream/handle/minam/1685/BIV01456.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

²¹ CONTRALORÍA. Op. Cit.

²² ANDRADE, G., Rodríguez, M. y Wills, E. Dilemas Ambientales de la Gran Minería en Colombia. Revista Javeriana, Número 785, Tomo 148, 2012, p. 17-23.

²³ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Asuntos ambientales y Sectorial y Urbana - Artículos {En línea}. {Consultado septiembre 2015}. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=548:plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-44#documentos>

²⁴ PERÚ. Op. Cit.

Andrade, Rodríguez y Wills, en el 2012 relacionaron la problemática de los PMA en Colombia con la forma como se cierran las minas, porque muchas veces las minas son simplemente abandonadas sin manejar los pasivos. Por esto, consideran importante la existencia de normatividad específica para el tema de cierre. Así mismo, manifiestan que en principio la remediación en la etapa de cierre debe exigirse a quienes explotaron la mina, sin embargo las experiencias en otros países, han demostrado que es el Estado, quien asume la responsabilidad.

En Colombia existe una cantidad considerable de minas en estado de abandono, lo que obedece principalmente a la ausencia de gestión y control por parte del Estado, así como también por la existencia de operaciones informales y/o debilidad administrativa y operativa²⁵. Estas minas, aún en su condición de abandono o cierre inadecuado, continúan generando impactos ambientales que pueden prolongarse durante largos periodos de tiempo, es decir indefinidamente.

De acuerdo con el censo minero Colombiano realizado en el 2011, la mayor parte de la actividad minera en el país corresponde a minería a pequeña escala o informal (10,384 operaciones), seguida de 3,749 operaciones de minería de mediana escala y 208 operaciones de minería de gran escala²⁶.

Siendo la actividad minera un importante sector económico en el contexto nacional, el Estado no sólo debe continuar con procesos de inventario de PAM; como es el caso del estudio realizado por la Universidad Industrial de Santander (UIS) en el 2014 (Diagnóstico sobre las áreas afectadas por actividad minera en estado de abandono en algunos municipios de los departamentos de Chocó, Santander y Valle del Cauca), sino que debe regular, de forma rigurosa, el tema de cierre y *pots-cierre*

²⁵ ARANGO, Marcela. Requerimientos para el diseño de una metodología que permita estimar el valor de pasivos ambientales mineros. Tesis de grado para optar el título de Maestría en Medio ambiente y Desarrollo. Colombia, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2011. p. 6-8.

²⁶ GÚIZA, L. La pequeña minería en Colombia: una actividad no tan pequeña. Dyna, año 80, Nro. 181, 2013, p. 109-117. ISSN 0012-7353.

minero, al igual que brindar soporte para el desarrollo y aplicación de tecnologías para el manejo adecuado de los PAM.

De acuerdo con los resultados del Catastro Minero Colombiano del 2012, el 2% del territorio de Santander tiene títulos para la explotación de oro²⁷, principalmente ubicados en los municipios de Vetas y California. Para estos municipios la minería de oro se convierte en su pilar de desarrollo económico²⁸.

En el caso de California, la mayoría de su minería de oro es de tipo artesanal y el beneficio del material extraído es realizado en plantas ubicadas en cercanías a cuerpos hídricos²⁹.

En el 2014, Jiménez y León, desarrollaron un modelo matemático para cuantificar los PAM de la mina “La Bodega” ubicada en California; una de las minas con mayor extensión en el municipio, donde se practicó la extracción de oro artesanal. Los resultados obtenidos concluyeron que los PAM de mayor impacto fueron: deterioro de la infraestructura y erosión del suelo. Sin embargo, el índice del impacto ambiental global se clasificó como bajo, debido a que se realiza tratamiento al DAM por parte de la empresa actualmente propietaria, lo que disminuye considerablemente la valoración de los PMA.

²⁷ CONTRALORÍA. Op. Cit.

²⁸ JIMÉNEZ, A. y LEÓN, S. Modelo Matemático para evaluar el impacto de los pasivos ambientales en la mina La Bodega en California, Santander. Tesis de grado para optar por el título de ingeniero químico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2014, p. 1-103.

²⁹ *Ibíd.*

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. MINERÍA AURÍFERA SUBTERRÁNEA

La explotación minera es un proceso productivo desarrollado en un tiempo corto (décadas), donde se extraen recursos no renovables de la superficie terrestre, con alto valor económico, lo que muchas veces conlleva a daños irreversibles para el medio ambiente, en términos biofísicos y para la salud humana³⁰.

La minería aurífera, en particular, es una actividad económica muy importante, que ha ido cambiando a lo largo del tiempo, tanto de lugar como en intensidad.

Durante varios años la técnica de extracción metalúrgica más utilizada para la extracción de oro fue el proceso por amalgación con mercurio³¹. Esta práctica ha sido suspendida en algunos países debido a la adopción del Convenio de Minamata. Colombia, adopta este convenio en la Ley 1658 de 15 de julio de 2013, con el objeto de “Proteger y salvaguardar la salud humana y preservar los recursos naturales renovables y el ambiente, reglamente en todo el territorio nacional el uso, importación, producción, comercialización, manejo, transporte, almacenamiento, disposición final y liberación al ambiente del mercurio en las actividades industriales, cualquiera que ellas sean”³². La ley en mención otorga un plazo de 5 años para la erradicación del uso del mercurio de la actividad minera, es decir que después del año 2018 la utilización conllevaría procesos sancionatorios.

³⁰ ARANGO, Marcela y OLAYA, Yris. Problemáticas de los pasivos ambientales. En: Revista Gestión y Ambiente, 2012, vol. 15, No 3, p. 125-133.

³¹ MONTEAGUDO, Fabricio. Evaluación de la Contaminación por Mercurio en Población de Mineros Artesanales de Oro de la Comunidad de Santa filomena – Ayacucho - Perú durante el periodo agosto 2000 – septiembre 2001. Tesis para optar el título profesional de Químico Farmacéutico. Perú, Lima: Universidad Nacional Mayor de San marcos, Facultad de Farmacia y Bioquímica, 2002. p. 7-9

³² COLOMBIA. EL CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 1658. (15, julio, 2013). Por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones. {En línea}. {Consultado agosto 2016}. Disponible en: <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/2013/LEY%201658%20DEL%2015%20DE%20JULIO%20DE%202013.pdf>

La explotación de la mina mediante la minería subterránea, consiste en retirar una cantidad de suelo para tener acceso al yacimiento del mineral, en este caso oro, realizando la extracción metalúrgica mediante el proceso de cianuración. El acceso hacia el mineral se logra mediante un túnel. Los conductos o socavones se construyen para conformar una red horizontal de túneles que tienen acceso directo al yacimiento, por lo cual este método menos destructivo en términos de acceder al yacimiento que el método a cielo abierto, pero es más costoso porque conlleva más riesgos de seguridad que la minería superficial³³.

En el caso de California y Vetás (Santander), la minería aurífera subterránea en el marco del desarrollo del Proyecto Río Suratá de finalización en el año 2004 (Convenio interinstitucional con participación de la autoridad ambiental, el acueducto de Bucaramanga y el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania), logró la implementación de un modelo de Producción Más Limpia a partir de nuevas tecnologías como: cambios en la molienda, cianuración por agitación e implementación de laboratorios. Entre los principales resultados están: 1) Incrementos productivos hasta de un 200% en la recuperación de oro, 2) Recuperación y reutilización del 86% del mercurio que antes se vertía al río, y 3) Eliminación total del uso del mercurio en algunas minas³⁴.

2.2. DRENAJE DE MINA:

2.2.1. Definición DM. El drenaje de mina (DM), es el efluente producto de la interacción entre las fuentes potencialmente generadoras (residuos mineros: estériles, escoria, depósitos de relaves y de lixiviación, drenaje en bocaminas o en tajos a cielo abierto) y los factores ambientales (agua y oxígeno)³⁵.

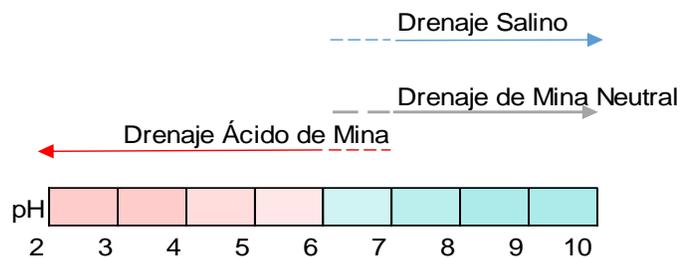
³³ ELAW, Alianza Mundial de Derecho Ambiental. Guía para evaluar EIA de proyectos mineros. En: Alianza Mundial de Derecho Ambiental. 1 ed. Estados Unidos: 2011. p 6-9.

³⁴ COLOMBIA. UPME, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Producción Más Limpia en la Minería del Oro en Colombia, 2007, 64p. ISBN: 9789589813874. {En línea}. {Consultado julio 2016}. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Docs/Mineria_limpiar.pdf

³⁵ SERNAGEOMIN, Servicio Nacional de Geología y Minería. Ministerio de Minería de Chile. Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras, 2015, p. 248.

2.2.2. Clasificación DM. En el 2014, la INAP en su guía de drenaje ácido de roca o de mina, clasifica los drenajes según su pH en tres categorías: drenajes ácidos con pH menores de 7 unidades, drenaje de mina neutral y drenajes salinos, los dos últimos con pH mayores a 6 unidades de pH (ver Figura 1). Es decir que los drenajes con pH entre 6 y 7 unidades pueden tener cualquiera de las tres categorías, y aquellos drenajes con pH entre 7 y 10 unidades, podrían clasificarse entre dos categorías; salina o neutra.

Figura 1. Clasificación DM según pH



Fuente: INAP, 2014

Por lo anterior, es necesario tener criterios adicionales al pH para clasificar el DM. La INAP fija algunas características particulares que permiten la clasificación y el discernimiento de necesidades de tratamiento, esto se aprecia en la Figura 2.

Figura 2. Clasificación DM según pH, características y requerimientos de control



Fuente: Adaptado por el autor a partir de INAP (2014)

Los drenajes de mina también se pueden clasificar considerando las variables acidez o alcalinidad³⁶. Esta clasificación agrupa los drenajes en cinco categorías; muy ácido, moderadamente ácido, débilmente ácido, débilmente alcalino y fuertemente alcalino (ver Figura 3).

Según Advire (2006) cualquier drenaje sin importar su categoría, se puede tratar aplicando sistemas pasivos, obteniendo buenos resultados al diseñarlos con base en las características geoquímicas del drenaje. Los sistemas pasivos son aquellos que requieren un mínimo de intervención humana, no requieren reactivos ni energía eléctrica para su funcionamiento³⁷.

Figura 3. Clasificación DM según Acidez o Alcalinidad



Fuente: Adaptado por el autor a partir de Aduvire (2006)

³⁶ ADUVIRE, Osvaldo. Drenaje Ácido de Mina: Generación y Tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España, 2006, p. 1-136

³⁷ CHAPARRO, Laura T. Drenajes Ácidos de mina: formación y manejo. Revista ESAICA, Vol.1 No.1, Universidad de Santander, 2015, p. 53-57. {En línea}. {Consultado junio 2016}. Disponible en: <http://revistas.udesa.edu.co/site/index.php/esaica/article/download/272/pdf>.

Los tipos de metales presente en los DM, dependen del tipo de mineral explotado y beneficiado. Sin embargo, es conocido que en las capas superiores de los suelos, se presentan concentraciones elevadas de Cobre, Arsénico, Cadmio, Hierro, Manganeso, entre otros³⁸.

2.3. CIERRE MINERO Y PLAN DE CIERRE

La ley Chilena 20551 de 2011 define el Plan de Cierre Minero (PCM) como el documento que especifica las medidas técnicas y actividades, que la empresa minera debe realizar desde el inicio de la operación minera, para prevenir, minimizar o controlar los riesgos y efectos negativos que se puedan generar sobre las personas, y componentes medio ambientales comprometidos, asegurando la estabilidad física y química de los lugares donde se desarrolle la actividad³⁹.

El cierre de mina se puede dar por razones como: agotamiento de materiales o reservas, problemas sociales, perjuicios ambientales (procesos sancionatorios), inconvenientes de seguridad, bajo costo de los minerales y terminación del contrato de concesión minera.

La finalidad de la fase de cierre en un proyecto minero debería ser, prevenir, minimizar y/o controlar los riesgos y efectos negativos que se puedan generar o continúen presentándose con posterioridad al término de las operaciones mineras. Por tanto, el cierre minero es muy importante y lo ideal es que esté concebido desde la planeación del proyecto minero, principalmente por los costos que acarrea la restauración, que implica dejar las áreas intervenidas en condiciones ambientales similares a las existentes, previo al proyecto.

³⁸ GALÁN y ROMERO. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química. Universidad de Sevilla. Revista de la sociedad española de mineralogía, Macla N° 10, 2008, p.48-60.

³⁹ CHILE. Op. Cit.

La preparación e implementación del PCM, debe tener en cuenta aspectos técnicos, económicos y a las partes interesadas del proyecto; como son trabajadores de la mina, organizaciones no gubernamentales, comunidades aledañas, autoridades, entre otros⁴⁰.

En Australia, el PCM debe proyectarse antes del inicio de actividades y debe contemplar las siguientes fases⁴¹:

- Establecer criterios de finalización de cierre de minas, indicadores de desempeño y un procedimiento para la evaluación de riesgos; esto incluye técnicas de seguridad ambiental y criterios sociales.
- Preparación de planes estratégicos y operativos para el cierre, y los planes de rehabilitación.
- Ejecución de los planes de demolición y rehabilitación de concesiones mineras.
- Monitoreo, para asegurar que la rehabilitación ha sido un éxito.
- Elaboración del informe final y la renuncia al título minero.

En Colombia, la Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales, desarrollada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), la, establece en la Resolución 1503 de 2010 numeral 2.8, los lineamientos para la proyección del “Plan de Abandono y Restauración Final (PARF)”. Este aplica en áreas e infraestructura intervenidas de manera directa por el proyecto. El PARF debe como mínimo contener los siguientes aspectos:

- Presentación de una propuesta de uso final del suelo, en armonía con el medio circundante.

⁴⁰ SZWEDZICKI, Tad. Program for Mine Clousure. En: Mineral Resources Engineering, 2001, vol. 10, No 3, p. 347-364

⁴¹ Ibid

- Señalización de medidas de manejo y reconfiguración morfológica y paisajística que garanticen la estabilidad, el restablecimiento de la cobertura vegetal, según aplique y en concordancia con la propuesta del uso final del suelo.
- Presentación de una estrategia de información a las comunidades y autoridades del área de influencia acerca de la finalización del proyecto y de la gestión social.
- Presentación de indicadores de los impactos acumulativos y de los resultados alcanzados con el desarrollo de los programas de la gestión social.

El PARF debe ser proyectado dentro de un estudio ambiental para la obtención de la licencia ambiental. Este debe contemplar las especificaciones señaladas anteriormente; sin embargo, se trataría de una guía inicial. Chile por ejemplo exige “Plan de Cierre Progresivo”, que corresponde a un plan, que además de actualizarse continuamente, se ejecuta junto con la explotación de la mina para amortiguar inversiones de cierre; de manera que los costos no se carguen solamente al final de la vida útil de la mina. Esto constituye en una ventaja para el caso de reforestaciones, debido a que se evidenciaría la maduración de las plantaciones, lo que facilitaría la futura entrega a la autoridad ambiental. No obstante, El PARF Colombiano se queda corto respecto a exigencias en materia de seguridad química, ya que se centra en impactos sobre el paisaje y uso del suelo e impactos sociales en general.

2.3.1. Cierre de DAM. Desde la norma aplicada en Chile, los procesos de cierre y *post-cierre* estudian distintas posibilidades en cuanto a tratamientos aplicables a los DAM; analizando los factores económicos, geográficos, químicos, físicos, entre otros. Estas dos etapas se describen a continuación⁴²:

Etapas de cierre: en esta etapa se revisan los tratamientos activos y pasivos existentes con el fin de seleccionar los más aptos para mejorar la calidad del DAM

⁴² SERNAGEOMIN, Servicio Nacional de Geología y Minería. Ministerio de Minería de Chile. Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras, 2015, p. 248.

hasta niveles aceptables según la legislación de la zona, y en lo posible, mitigar los impactos asociados.

Etapas de *post-cierre*: en esta etapa posterior, se concentran las acciones que permitan evaluar, validar y controlar la información y los resultados obtenidos en las distintas etapas del proceso de estabilidad química.

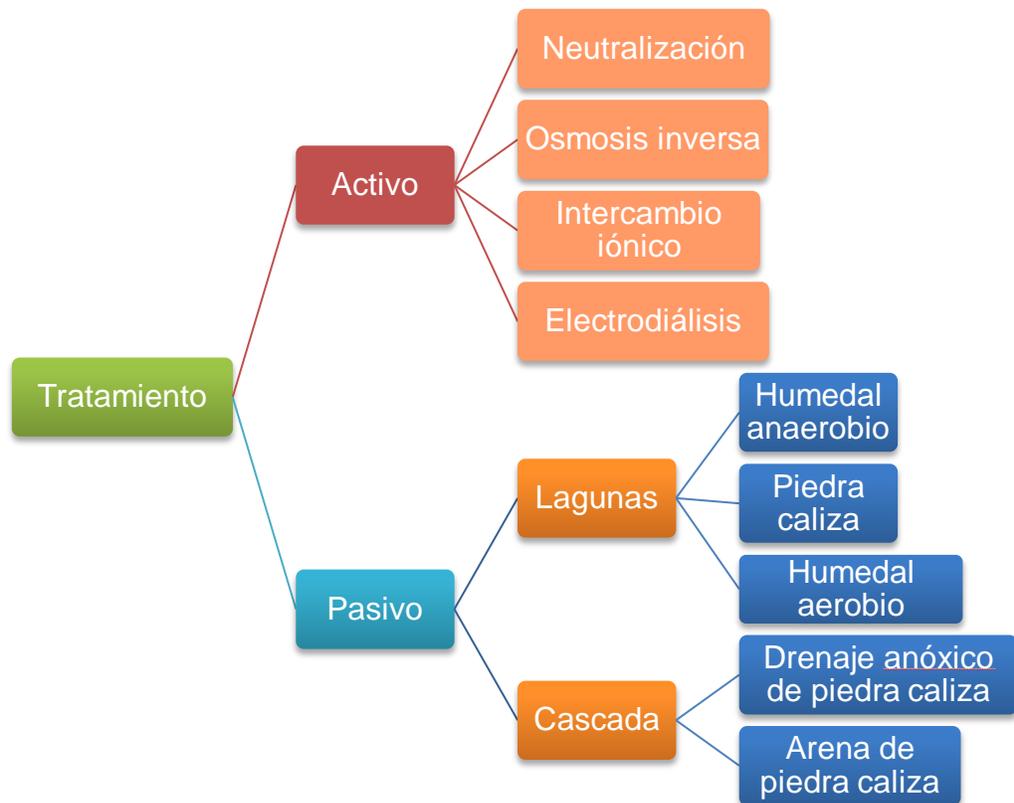
2.3.1.1. Tecnologías de tratamiento de DAM: Existe una amplia gama de tratamientos que pueden ser desarrollados, probados y aplicados en diferentes zonas de explotación y en diferentes tiempos; así, se encuentran los tratamientos de prevención y los correctivos. Los tratamientos de prevención, son aquellos que permiten, como su nombre lo dice, evitar que se desarrollen completamente los procesos DAM actuando sobre los factores generadores como el oxígeno, algunos de estos son: encapsulación, inundación, cubiertas secas e inhibidores bacterianos. Muchos de estos tratamientos preventivos se pueden combinar con tratamientos correctivos⁴³

En la actualidad, existen dos categorías principales para los tratamientos correctivos: tratamientos activos y pasivos. La Figura 4 ilustra los tipos de tratamiento y sus subcategorías, todas con el mismo objetivo, tratar contaminantes, principalmente metales⁴⁴.

⁴³ SANDOW, M. Remediation of Acid Mine Waters. Mine Water – Managing the Challenges. International Mine Water Association, 2011, p.253-258. ISSN 16161068 {En línea}. {Consultado abril 2016}. Disponible en: https://www.imwa.info/docs/imwa_2011/IMWA2011_Ali_338.pdf

⁴⁴ Ibid

Figura 4. Clasificación tratamientos activos y pasivos para DAM



Fuente: Extraído de *Remediation of Acid Mine Waters* (SANDOW, 2011)

A continuación se describen las tres clasificaciones para tratamiento de DAM ⁴⁵.

- **Tratamientos activos:** Se caracterizan por necesitar energía eléctrica, aporte de reactivos y mano de obra para su funcionamiento, por lo cual los costos de operación son mayores en comparación con los tratamientos pasivos. Uno de los problemas que presentan en estos sistemas es la generación de residuos sólidos (lodos), que requieren una gestión especial (por el posible contenido de metales) para llevarlos a una disposición final responsable. Otra desventaja es su alto costo, que se incrementa durante el proceso, lo cual dificulta su aplicación

⁴⁵ SERNAGEOMIN, Op cit. p. 248.

por largos periodos de tiempo. Entre las ventajas, se encuentran: alta eficiencia y amplios rangos operativos para metales en el afluyente. Los tratamientos activos son apropiados para las fases de exploración y operación, debido a que requieren de inversión permanente (personal operativo, consumo de energía e insumos químicos).

- **Tratamientos pasivos:** Están caracterizados por no requerir energía ni insumos químicos para su operación. Las fuentes de energía que los alimentan, surgen de lo que ofrece el medio, como es el caso de la gravedad o la energía metabólica microbiana. Estos tratamientos pueden ser físicos, químicos o biológicos, siendo los más comunes los químico-biológicos. A diferencia de los tratamientos activos, los pasivos no tienen altos costos, pero son menos eficaces y además lentos; también ocupan mayores áreas de tratamiento, como en el caso de los humedales artificiales. Los tratamientos pasivos son más atractivos para las fases de cierre y *post* cierre, puesto que únicamente requieren supervisión, mantenimiento y monitoreo de manera ocasional.

2.4. IMPACTO AMBIENTAL

En Colombia el Decreto único reglamentario para el sector ambiente define “Impacto ambiental” como cualquier alteración en el medio ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo del proyecto, obra o actividad (MINAMBIENTE, 2015)⁴⁶.

2.4.1. Impacto ambiental asociado a los DAM: La explotación y extracción de metales produce anualmente millones de toneladas de residuos, la mayoría con

⁴⁶ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 1076. (26, mayo, 2015). Por el cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2015. No. 49.523. {En línea}. {Consultado agosto 2015}. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/4e-DECRETO%201076%20DE%202015%20MINAMBIENTE%20EXPIDE%20DECRETO%20C3%9ANICO%20REGLAM.%20SECTOR%20AMBIENTE%20Y%20DESARROLLO%20SOSTENIBLE.pdf>

contenido de pirita y otros sulfuros, cuya oxidación libera grandes cantidades de metales pesados al ambiente, en particular al agua y a los suelos⁴⁷ .

Al generarse el DAM, se liberan metales pesados (MP) al ambiente, quedando disponibles y al alcance de los organismos. En el agua, la fauna acuática quedaría expuesta por la ingestión de sedimentos contaminados, generando bioacumulación de metales y biomagnificación a través de la cadena trófica. Además, los sedimentos con MP disminuyen la disponibilidad de gravas limpias (usadas para el desove) y de alimentos, que a su vez repercuten en la disminución de riqueza taxonómica y abundancia de especies⁴⁸.

En estudios desarrollados en la cuenca del río Boulder en Montana (Estados Unidos), por Farag *et al.* (2003), durante la evaluación del impacto de aproximadamente 300 minas abandonadas de metales, encontraron que las fuentes hídricas cercanas a las minas con DAM, están desprovistas de peces y fuentes hídricas lejanas a estas, poseían poblaciones de diferentes especies de trucha⁴⁹.

Jennings, *et al.* (2008), realizaron una revisión a nivel mundial sobre los impactos ambientales generados por los DAM, encontrando que afectan gravemente el entorno ecológico, especialmente el recurso hídrico. Estos efectos perjudiciales se deben a su acidificación, que conlleva a niveles elevados de metales y estos a su vez afectan directamente a poblaciones de peces, y a personas que usen el recurso hídrico aguas abajo de las descargas de un DAM⁵⁰.

El impacto de los DAM sobre los suelos, está asociado a concentraciones anómalas de metales, principalmente: arsénico, cobre, plomo, cadmio y zinc, que exceden los valores de fondo geoquímico del lugar de origen y límites de ecotoxicidad⁵¹. Los

⁴⁷ DUDKA S., Domy A., Environmental Impacts of Metal Ore Mining: Review. J. Environ Qual, Vol. 26, 1997, p. 590-602.

⁴⁸ JENNINGS, S.R., Neuman, D.R. and Blicher, P.S. (2008). Acid Mine Drainage and Effects on Fish Health and Ecology: A Review. Reclamation Research Group Publication, Bozeman, MT, 2008, p.1-26.

⁴⁹ Ibid

⁵⁰ Ibid

⁵¹ OLÍAS, M., *et al.* Geología de Huelva: lugares de interés geológico. 2ª ed. Huelva: Universidad de Huelva, 2008, p. 1-204. ISBN: 978-84-92679-19-5

metales en concentraciones permisibles son esenciales para el suelo y los seres vivos⁵², pero al sobrepasar los límites, pueden convertirse en un contaminante que altere las funciones normales de los mismos.

La caracterización, evaluación y recuperación de suelos contaminados con metales es un gran desafío ambiental, en especial, cuando se quiere hacer un cambio en el uso del recurso⁵³. Así, la predicción exacta de la aparición y peligrosidad de los DAM es un tema de abordaje complejo, aun usando las mejores herramientas científicas disponibles; debido a que son muchos los factores que intervienen: geoquímicos, biológicos e hidrológicos⁵⁴.

Existen modelos para predecir la formación del DAM y su impacto potencial. Estos se basan en ensayos y modelamiento matemático. Los ensayos son: estáticos y cinéticos, los estáticos predicen la calidad de los drenajes y los cinéticos reproducen en laboratorio los posibles rangos de producción ácida. Por su parte, la modelación matemática se realiza para simular la generación del drenaje y su calidad, así como predecir la afectación del DAM⁵⁵.

Los DAM representan el aspecto que más genera impactos ambientales a largo plazo, y sus efectos pueden darse por cientos o miles de años, después del cierre o cese de actividades en la mina⁵⁶. Por lo tanto, es importante insistir en la adopción de técnicas preventivas, que conduzcan a minimizar la formación de DAM durante

⁵² RAMIREZ, M. A., NAVARRO, M.A. Análisis de metales pesados en suelos irrigados con agua del río Guatiquía. Revista Ciencia en Desarrollo, Vol. 6 No. 2, 2015, p. 167-175. ISSN 0121-7488.

⁵³ GALÁN y ROMERO. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química. Universidad de Sevilla. Revista de la sociedad española de mineralogía, Macla N° 10, 2008, p.48-60.

⁵⁴ JENNINGS, S.R., Neuman, D.R. and Blicher, P.S. (2008). Acid Mine Drainage and Effects on Fish Health and Ecology: A Review. Reclamation Research Group Publication, Bozeman, MT, 2008, p.1-26.

⁵⁵ ADUVIRE, O., Baretino, D. y López, E. Tratamientos Pasivos de Drenajes Ácidos de Mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero No. 113, 2002, p. 3-21. ISSN: 0366-0176.

⁵⁶ LENA, A., Elin, A., Seth, M. Neutralization/prevention of acid rock drainage using mixtures of alkaline by-products and sulfidic mine wastes. Environ Sci Pollut Res 20:7907–7916, 2013, p. 7907-7916. DOI: 10.1007/s11356-013-1838-z

la fase de extracción, ya que una vez formado el drenaje, son complicados y costosos, su control, su seguimiento y su monitoreo⁵⁷.

En síntesis, los impactos ambientales causados por los DAM, afectan principalmente los componentes: edáfico e hídrico. Entre los impactos más significativos están los relacionados en la siguiente Figura 5⁵⁸.

Figura 5. Síntesis de impactos ambientales causados por los Drenajes ácidos de mina sobre el recurso hídrico superficial y edáfico



Fuente: El autor a partir de DUDKA y DOMY (1997).

2.5. PASIVO AMBIENTAL

El deterioro ambiental derivado de las prácticas mineras persiste en el entorno aun cuando ya se hayan terminado las existencias de los yacimientos, y por ende, se

⁵⁷ INAP, International Network for Acid Prevention. Global Acid Rock Drainage Guide, 2014, p. 1-473.[en línea] [citado 15 de marzo de 2016] Disponible en: URL: http://www.gardguide.com/index.php?title=Main_Page

⁵⁸ DUDKA y DOMY. Op. Cit.

hayan abandonado dichas prácticas, dejando efectos negativos o colaterales en el ambiente⁵⁹.

En ocasiones, las minas y áreas de manejo minero son abandonadas, dejando como consecuencia la existencia de impactos ambientales (biofísicos y sociales) reconocidos como *Pasivos Ambientales Mineros (PAM)*, sobre los cuales no se presenta ningún tipo de control ambiental, ni plan de rehabilitación y cierre específicos⁶⁰, donde se mitigue, controle y se reponga el daño ambiental, minimizando el riesgo potencial de perjuicio a la salud humana y al entorno.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe –CEPAL- de Naciones Unidas, definió en el año 2008, los PAM como: “...impactos ambientales generados por las operaciones mineras abandonadas con o sin dueño u operador identificables y en donde no se hayan realizado un cierre de minas reglamentado y certificado por la autoridad correspondiente”.

Los sitios donde se desarrolló minería, al quedar abandonados con PAM, impactan la calidad del suelo, las aguas superficiales y subterráneas, afectado posiblemente la salud a poblaciones que obtengan servicios ambientales de estos recursos⁶¹.

En países como Chile, Perú y Bolivia esta obligación se conoce como “Pasivos Ambientales Mineros” (PAM), mientras que en otros países como Canadá y los Estados Unidos, este tipo de obligaciones se tratan como (“sitios huérfanos”) (“*orphaned sites*”) o como “deudas ambientales (“*environmental liabilities*”)⁶²

⁵⁹ ARANGO, Marcela. Requerimientos para el diseño de una metodología que permita estimar el valor de pasivos ambientales mineros. Tesis de grado para optar el título de Maestría en Medio ambiente y Desarrollo. Colombia, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2011. p. 6-8.

⁶⁰ ELAW. Op. Cit.

⁶¹ ARANGO y OLAYA. Op. Cit.

⁶² ARAMBURO. Op. Cit.

3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En Colombia, el código de minas (Ley 685 de 2001) no establece con claridad la responsabilidad ante la generación de los PAM, al no presentar los mecanismos legales suficientes para exigir la no generación de pasivos. Para esto es necesario que se establezca dentro del Plan de Manejo Ambiental –PMA-, el correspondiente PCM que contemple la mitigación, control, reparación y compensación de impactos ambientales durante la etapa de cierre; que para el caso específico de los DAM, el control puede requerirse por un tiempo incierto de años.

En diferentes países del continente Americano como: Estados Unidos, Perú, Guatemala, muchas empresas mineras han abandonado sus DAM, y la responsabilidad sobre su manejo y tratamiento ha recaído directamente sobre el Estado. En Colombia puede ocurrir algo similar, en tanto que, quienes autorizan el Plan de Trabajo y Obra –PTO- y la Licencia Ambiental –LA- para el funcionamiento de los proyectos mineros, son respectivamente la Agencia Nacional Minera –ANM- y la Agencia Nacional de Licencias Ambientales –ANLA- o las Corporaciones Autónomas –CAR-, para estas últimas, cada institución tiene competencia de acuerdo a la cantidad de material explotado y en ambos casos, serían las encargadas de ejercer el seguimiento, control y vigilancia ambiental necesarios para evitar la generación de los PAM.

Sumado a lo anterior, existen factores como, la carencia explícita de esquemas, guías, propuestas y ejecuciones de cierre de minas en el país, y la flexibilidad de las autoridades ambientales, que otorgan LA sin que las empresas consideren desde la planeación de los proyectos su PCM. Estos planes deberían contemplar la seguridad y estabilidad química además del alcance ya definido en la Guía para la Realización de Estudios Ambientales de Colombia, que define el alcance en términos de rehabilitación y abandono.

Otro factor importante, es el desconocimiento del valor económico de los daños que permanecen en el ambiente y los riesgos que estos últimos representan para las comunidades vecinas a las minas⁶³. La suma de los costos del daño ambiental y los costos de rehabilitación, así como de la restauración del cierre para cada uno de los PAM que pueda generar un proyecto, puede resultar en un valor importante, por lo que se deberían plantear cierres parciales, conforme se avanzan los procesos de extracción para amortiguar la inversión y plantear medidas de aprovechamiento de residuos.

Los DAM se constituyen en el más importante pasivo ambiental que puede surgir de la actividad minera. Los impactos ambientales asociados a los DAM afectan los componentes hídrico y edáfico, principalmente, deteriorando su calidad, relacionado, en especial, con la acumulación de metales pesados de carácter tóxico para la salud humana y los ecosistemas.

El CEPAL en el año 2014, manifestó que Colombia y México se encuentran en una etapa más atrasada en la gestión de PAM, ya que están en la fase de identificación, inventario y caracterización, no obstante, estos gobiernos están haciendo grandes esfuerzos por avanzar en el tema. Países como Perú y Chile, llevan la delantera, puesto que cuentan con inventarios, caracterizaciones, normas específicas para cierres mineros, y desarrollan tareas en pro de la remediación de los PAM⁶⁴.

Estando Colombia en etapa de cuantificación y caracterización de las minas abandonadas, y ante las necesidades de iniciar medidas que respondan a las necesidades de cierre de los PAM (incluye los DAM), surge la motivación para la realización del presente trabajo de grado, que busca a partir de un estudio de caso en el municipio de California, departamento de Santander, generar una propuesta de cierre para un DAM de una bocamina en estado de abandono.

⁶³ ARANGO, Marcela y OLAYA, Yris. Problemáticas de los pasivos ambientales. En: Revista Gestión y Ambiente, 2012, vol. 15, No 3, p. 125-133.

⁶⁴ CEPAL. Op. Cit.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer el cierre de un Drenaje Acido de Mina –DAM- procedente de una mina de extracción aurífera subterránea, para la minimización de impactos sobre los componentes edáfico e hídrico, a través del estudio de caso de una mina abandonada, ubicada en el municipio de California, departamento de Santander.

4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar la composición físico química un DAM en condición de abandono generado en una bocamina de extracción aurífera subterránea y su cuerpo receptor (aguas superficiales y suelo).
- Determinar los impactos ambientales existentes sobre los componentes edáfico e hídrico superficial, para un DAM en condición de abandono generado en una bocamina de extracción aurífera subterránea, ubicada en el municipio de California, departamento de Santander.
- Elaborar la propuesta de cierre de un DAM, en una mina de extracción aurífera subterránea, abandonada, ubicada en el municipio de California, departamento de Santander.

5. ALCANCE Y LIMITACIONES

Los siguientes aspectos componen el alcance del trabajo:

- Determinar los impactos ambientales asociados al DAM, específicamente componente hídrico superficial y edáfico.
- Seleccionar una alternativa de tratamiento que permita el cierre del DAM.

Las limitantes del trabajo son:

- Realización de una campaña de monitoreo (en temporada de lluvias). La Guía para la elaboración de Estudios Ambientales define la necesidad de considerar las diferentes temporadas climáticas (seca y húmeda), así como de información estadística relacionada con el clima.
- No se realizó la caracterización de las aguas subterráneas, como tampoco análisis del sedimento en el lecho del cuerpo hídrico superficial, por lo tanto el impacto ambiental sobre este tipo de recursos continuaría siendo desconocido en materia de su calidad.

El presente trabajo fue totalmente financiado por el investigador principal.

6. METODOLOGÍA

La metodología que se siguió para el cumplimiento de los objetivos planteados en el presente trabajo, consta de cinco etapas, las cuales se describen a continuación.

6.1. ETAPA 1: SELECCIÓN DE LA BOCAMINA CON DAM PARA LA APLICACIÓN DEL ESTUDIO DE CASO

La selección de la bocamina se realizó teniendo en cuenta cuatro criterios: 1) condiciones seguras de acceso a la bocamina y al cuerpo receptor de la descarga del DAM, 2) Bocamina en condición de abandono, 3) existencia de drenaje con pH menor o igual a 6 unidades, y 4) Caudal que no permite su medición (aforo de tipo volumétrico). Para esto se realizaron varias visitas al municipio de California, con el acompañamiento de personas de la zona relacionadas con el sector minero. Dichas personas, indicaron cuales eran las minas en condición de abandono temporal por parte de sus titulares. Posteriormente, se realizaron las mediciones de pH en el sitio y finalmente la selección del DAM objeto de estudio.

6.2. ETAPA 2: CARACTERIZACIÓN DEL DAM SELECCIONADO COMO ESTUDIO DE CASO Y SUS COMPONENTES HÍDRICO SUPERFICIAL Y EDÁFICO ASOCIADOS

El objeto de la caracterización del DAM es determinar el impacto ambiental sobre los componentes edáfico e hídrico, por lo cual se monitorearon y analizaron, como se indica en los siguientes numerales.

6.2.1. Caracterización del Drenaje de mina. Se caracterizó el DAM determinando el índice de calidad del agua estipulado por el IDEAM para 6 variables (IDEAM, 2011). Esta actividad se realizó porque el DAM es un afluente de la Quebrada La

Baja y para poder identificar si existía deterioro en la calidad del agua y sus posibles limitaciones de uso.

Los metales determinados en el DAM, corresponden a los de mayor importancia para la identificación y caracterización del impacto ambiental sobre el recurso. Los metales se analizaron en el laboratorio acreditado *Consultas Industriales UIS* y fueron: Arsénico, Cadmio, Cromo Total, Cromo Hexavalente, Hierro Total, Plomo, Cobre, Manganeso y Aluminio. La determinación de la presencia de metales (y su impacto asociado) se efectuó también en la Quebrada La Baja, tanto aguas arriba como aguas abajo del DAM. Estos metales se seleccionaron por ser los más representativos en DAM⁶⁵. No se estudió la incidencia del mercurio y el cianuro porque son metales asociados al beneficio del oro y para el caso interesa el estudio del impacto ambiental asociado a la generación de DAM.

En cuanto a, la caracterización del pH y la acidez del DAM, permitió su tipificación de acuerdo con los criterios de INAP (2014) y ADUVIRE (2006), señalados en el numeral 2.2.2. La caracterización del contenido de sólidos suspendidos, aluminio y hierro, permitió el uso del árbol de decisión de TRUMM (2010), para la selección del tratamiento del drenaje.

6.2.2. Caracterización del componente edáfico. Para la caracterización del componente edáfico, se tomaron 4 muestras de suelo, siguiendo como referencia la Norma Técnica Colombiana para la toma de muestras de suelo para determinar su contaminación; NTC 3656.⁶⁶ De acuerdo con esta norma, el muestreo realizado fue simple, donde se tomaron muestras puntuales a una profundidad no mayor a 25 cm. El presupuesto del proyecto correspondía a cuatro (4) muestras de suelos. Estas fueron distribuidas en zig-zag donde el suelo permitía accesibilidad al punto y penetración de la pala para la toma de porciones de suelo. La Tabla 3 muestra la

⁶⁵ ADUVIRE, et al. Op. cit.

⁶⁶ COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS, ICONTEC. Norma Técnica Colombiana No. 3656. Gestión Ambiental. Suelo. Toma de muestras de suelo para determinar contaminación, 1994, p.7.

codificación de los puntos, las distancias a la bocamina, sus coordenadas de localización y observaciones de campo. Los puntos se aprecian espacialmente en la Figura 6.

Tabla 3. Localización y codificación de muestras de suelo

Código	Distancia a la Bocamina	Coordenada: Latitud	Coordenada: Longitud	Observaciones
P1 suelo	A 22,1m de la BM	7°22'4.34"N	72°55'3.51"O	Suelo inmediatamente colindante al DAM.
P2 suelo	A 29,6m de la BM	7°22'3.59"N	72°55'3.70"O	Suelo inmediatamente colindante al DAM.
P3 suelo	A 48,7m de la BM	7°22'3.43"N	72°55'3.37"O	Suelo inmediatamente colindante al DAM.
P4 suelo	A 98m de la BM	7°22'2.49"N	72°55'2.43"O	Suelo a 8m del DAM.

Fuente: El autor.

Figura 6. Ubicación puntos de muestreo de suelo afectado por DAM



Fuente: Ubicados por el autor en Google Earth, 2016

Las muestras, una vez extraídas del suelo, se guardaron en bolsas plásticas de polietileno, con sellado hermético, se rotularon y se transportaron en cadena de frío hasta el laboratorio *Consultas Industriales de la UIS* (acreditado por el IDEAM mediante Resolución No. 1111 de 2015). En la Figura 7 se evidencia la entrega de las muestras al laboratorio.

Figura 7. Entrega de muestras de suelos al Laboratorio



Fuente: El autor.

6.2.3. Caracterización componente hídrico. Para la caracterización del componente hídrico superficial se tomaron dos (2) muestras de agua superficial; una (1) muestra aguas arriba de la Quebrada La Baja (antes de la descarga del DAM) y una (1) muestra aguas abajo de la entrega del DAM sobre la Quebrada La Baja. En la Tabla 4 se muestra la codificación de las muestras, coordenadas de localización y observaciones de campo. Los puntos muestreados se muestran especialmente en la Figura 7.

Tabla 4. Localización y codificación de muestras de suelo

Código	Descripción del punto	Coordenada: Latitud	Coordenada: Longitud	Observaciones
P1	DAM en Bocamina	7°22'4.97"N	72°55'3.76"O	La muestra se tomó una vez sale de la bocamina.
P2	Aguas Arriba del DAM	7°22'2.05"N	72°55'1.82"O	El punto se ubica aproximadamente 15m arriba de la entrega del DAM.
P3	Aguas Abajo del DAM	7°22'1.33"N	72°55'2.38"O	El punto se ubica aproximadamente 20m abajo de la entrega del DAM. Después de la mezcla del vertimiento.

Fuente: El autor.

Figura 8. Ubicación espacial de los puntos de muestreo del componente hídrico superficial.



Fuente: Ubicados por el autor en Google Earth, 2016

Las muestras de aguas fueron puntuales y se realizaron siguiendo la metodología establecida por el IDEAM en la Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Aguas Subterráneas⁶⁷.

Los parámetros analizados por el laboratorio *Consultas Industriales de la UIS* fueron: pH, DQO, SST, Nitrógeno Total, Fósforo Total, Conductividad, Acidez, % de saturación de oxígeno y metales asociados a DAM: Arsénico, Cadmio, Cromo Total, Cromo Hexavalente, Hierro Total, Plomo, Cobre, Manganeseo y Aluminio. Los parámetros fisicoquímicos: pH, DQO, SST, Nitrógeno Total, Fósforo Total, Conductividad, Acidez y % de saturación de oxígeno, los cuales se analizaron para determinar el Índice de Calidad del Agua del IDEAM, tanto en condiciones aguas arriba como aguas abajo del DAM, para la determinación del impacto asociado al recurso. En la Figura 8 se evidencia la entrega de las muestras al laboratorio.

Figura 9. Entrega de muestras de suelos al Laboratorio



Fuente: El autor.

⁶⁷ COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Aguas Subterráneas, 2002, p. 83. {En línea}. {Consultado febrero 2016}. Disponible en: http://oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/guia_para_monitoreo_de_vertimientos.pdf

6.2.3.1. Cálculo del ICA: El índice de calidad de agua (ICA) sirve como una herramienta de evaluación del estado del recurso hídrico. Es una expresión matemática que corresponde a la sumatoria de las ponderaciones de cinco o seis variables fisicoquímicas, que permiten evaluar la calidad de agua⁶⁸.

El ICA aplicado es el formulado por el IDEAM en el 2009, incluye seis variables: oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica, pH y relación nitrógeno y fósforo total. La fórmula (de este ICA) aplicada corresponde a⁶⁹:

$$ICA_{njt} = \sum_{i=1}^n W_i * I_{ikjt}$$

Donde:

ICA_{njt} = Es el Índice de calidad del agua de una determinada corriente superficial en la estación de monitoreo de la calidad del agua j en el tiempo t, evaluado con base en n variables.

W_i = Es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad i.

I_{ikjt} = Es el valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente), en la estación de monitoreo j, registrado durante la medición realizada en el trimestre k, del período de tiempo t.

n = Es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador; n es igual a 5, o 6 dependiendo de la medición del ICA que se seleccione.

⁶⁸ TORRES, Patricia, Cruz, Camilo H. y Patiño, Paola. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín, No. 15 especial, vol. 8, 2009, p. 79-94. ISSN 1692-3324.

⁶⁹ COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA, IDEAM. Hoja Metodológica del Indicador de Calidad del Agua (Versión 1). Sistemas de Indicadores Ambientales de Colombia – Indicadores de Calidad del agua superficial, 2011, 10p. {En línea}. {Consultado diciembre 2015}. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/36-3.21_HM_Indice_calidad_agua_3_Fl.pdf/9d28de9c-8b53-470e-82ab-daca2d0b0031

En la Tabla 5 se especifica la ponderación usada como un factor de importancia para la variable dentro del cálculo del ICA.

Tabla 5. Ponderación ICA con 6 variables del IDEAM

Variable	Unidades	Factor de importancia
Oxígeno Disuelto, OD	% de saturación	0,17
Sólidos suspendidos totales, SST	mg/L	0,17
Demanda química de oxígeno, DQO	mg/L	0,17
Conductividad eléctrica, C.E.	μS/cm	0,17
Relación Nitrógeno total / Fosforo total, N/P	-	0,17
pH	Unidades de pH	0,15

Fuente: IDEAM, 2011

La determinación del índice de cada variable es el producto del factor de importancia y el valor obtenido para cada variable aplicando las siguientes ecuaciones de referencia (ver Tabla 6). Para aplicar las ecuaciones se tuvieron en cuenta los datos resultantes obtenidos en laboratorio.

Tabla 6. Cálculo para cada variable del ICA

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	FORMULA PARA EL CALCULO
% de saturación OD	Determina la existencia de condiciones aeróbicas o anaeróbicas del agua.	$I_{OD} = 1 - (1 - 0.01 * ((PS_{OD}))$ Cuando el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto es mayor al 100%: $I_{OD} = 1 - (1 - 0.01 * ((PS_{OD}) - 1))$
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	Cantidad de material sólido retenido después de realizar la filtración de un volumen de agua.	$I_{SST} = 1 - (-0.02 + 0.003 * SST)$ Si $SST \leq 4,5$; entonces $I_{SST} = 1$ Si $SST \geq 320$, entonces $I_{SST} = 0$
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	Cantidad de oxígeno requerido para oxidar por métodos químicos, la materia orgánica disuelta	Si $DQO \leq 20$, entonces $I_{DQO} = 0.91$ Si $20 < DQO \leq 25$, entonces $I_{DQO} = 0.71$ Si $25 < DQO \leq 40$, entonces $I_{DQO} = 0.51$

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	FORMULA PARA EL CALCULO
	o en suspensión, presente en el agua.	Si $40 \text{ DQO} \leq 80$, entonces $I_{\text{DQO}} = 0.26$ Si $\text{DQO} > 80$, entonces $I_{\text{DQO}} = 0.125$
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	Habilidad del agua para transportar la corriente eléctrica; depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en agua.	$I_{\text{C.E.}} = (1 - 10^{(-3.26 + 1.34 \text{ Log}_{10} \text{ Conductividad})})$ Cuando $I_{\text{C.E.}} < 0$, entonces $I_{\text{C.E.}} = 0$
pH (Unidades de pH)	Concentración de iones hidrogeno presentes en la muestra de agua. Indica el grado de acidez o basicidad de la misma.	Si $\text{pH} < 4$, entonces $I_{\text{pH}} = 0.1$ Si $4 \leq \text{pH} \leq 7$, entonces $I_{\text{pH}} = 0.02628419 * e^{(\text{pH} * 0.520025)}$ Si $7 < \text{pH} \leq 8$, entonces $I_{\text{pH}} = 1$ Si $8 < \text{pH} \leq 11$, entonces $I_{\text{pH}} = 1 * e^{((\text{pH}-8) * -0.5187742)}$ Si $\text{pH} > 11$, entonces $I_{\text{pH}} = 0.1$
Nitrógeno total / Fósforo total	Mide la degradación por intervención antrópica.	Si $15 \leq \text{NT/PT} \leq 20$, entonces $I_{\text{NT/PT}} = 0.8$ Si $10 < \text{NT/PT} < 15$, entonces $I_{\text{NT/PT}} = 0.6$ Si $5 < \text{NT/PT} \leq 10$, entonces $I_{\text{NT/PT}} = 0.35$ Si $\text{NT/PT} \leq 5$, ó $\text{NT/PT} > 20$, entonces $I_{\text{NT/PT}} = 0.15$

Fuente: El autor a partir de IDEAM (2011)

Después de obtener los índices de cada variable, se realizó la sumatoria aplicando la fórmula general para el cálculo del ICA, obteniendo la valoración numérica que se asocia a un descriptor de la calidad del agua, ver Tabla 7.

Tabla 7. Descripción de la valoración ICA

Descriptor	Ámbito numérico	Color
Muy malo	0 – 0.25	Rojo
Malo	0.26 – 0.50	Naranja
Regular	0.51 – 0.70	Amarillo
Aceptable	0.71 – 0.90	Verde
Bueno	0.91 – 1.00	Azul

Fuente: IDEAM, 2011

6.2.3.2. Cálculo de carga control y carga de vertimiento: La evaluación del drenaje involucró el caudal para el establecimiento de las cargas contaminante y cargas control. Estos cálculos se realizaron aplicando las ecuaciones establecidas en el artículo 75 del Decreto 1594 de 1984. Las ecuaciones denominan la carga control como A y la carga del vertimiento como B. Ambas cargas se calculan en función del caudal, la concentración del control (artículo 74 del Decreto 1594) y la concentración del vertimiento (resultado de laboratorio), y se afectan por un factor de conversión de unidades. Las ecuaciones que se aplicaron se describen a continuación⁷⁰:

$$A = (Q) (CDC) (0,0864)$$

$$B = (Q) (CV) (0,0864)$$

Donde;

A es la carga de control, expresada en Kg/día

B es la carga en el vertimiento, expresada en Kg/día

Q es el caudal promedio del vertimiento, expresado en L/s

CDC es la concentración de control, expresada en mg/L

⁷⁰ COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. Decreto 1594. (26, junio, 1984). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 1984. No. 36.700. {En línea}. {Consultado mayo 2016}. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18617>

CV es la concentración en el vertimiento, expresada en mg/L
0,0864 es el factor de conversión.

6.3. ETAPA 3: DETERMINACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS SOBRE LOS COMPONENTES EDÁFICO E HÍDRICO SUPERFICIAL, POR EL DAM SELECCIONADO COMO ESTUDIO DE CASO

6.3.1. Determinación de impactos ambientales sobre el componente edáfico por acción del DAM. El impacto ambiental sobre el componente edáfico se determinó en función de la presencia de metales en el suelo, tomando como referencia estándares internacionales (Estados Unidos, Canadá, Perú y Unión Europea), en tanto existe la ausencia de normativa a nivel nacional. Esto debido a la toxicidad de los metales y su efecto sobre el recurso, dando como resultado el impacto: degradación, contaminación de aguas subterráneas, disminución de la biodiversidad y limitaciones en el uso del suelo⁷¹.

6.3.2. Determinación de impactos ambientales sobre el componente hídrico por acción del DAM. El impacto ambiental sobre el componente hídrico superficial se determinó mediante la evaluación de las condiciones de calidad de la corriente receptora del DAM, Quebrada La Baja, tomando como punto de referencia el Índice de Calidad del Agua del IDEAM, el cual fue estimado para el punto aguas arriba y el cambio del Calidad del Agua del IDEAM, encontrado en el punto aguas abajo del DAM. También se evaluó la calidad del agua del DAM por ser un afluente de la Quebrada La Baja.

En la evaluación del deterioro de la calidad del agua, como un impacto generado sobre el componente hídrico, se analizaron las concentraciones de metales como limitantes en pro de identificar la destinación del recurso, en sus usos: consumo

⁷¹ RUEDA, Germán, Rodríguez, Jenny y Madriñan Raúl. Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: Perspectivas para Colombia. 2011

humano y de preservación de ecosistemas. Las referencias nacionales para este análisis son: Decreto 1594 de 1984 (norma Colombiana vigente para usos del agua) y Acuerdo 1075 de 2006 (objetivos de calidad de la CDMB). También se tomaron algunos referentes internacionales (Estados Unidos, Canadá, Perú y Unión Europea) para desarrollar esta evaluación.

6.4. ETAPA 5: ELABORACIÓN DE UNA PROPUESTA DE CIERRE PARA EL DAM SELECCIONADO COMO ESTUDIO DE CASO

La propuesta de cierre planteada para el DAM seleccionado como estudio de caso, tiene por objeto su aseguramiento químico para reducir los impactos ambientales asociados a los componentes hídrico y edáfico, y en consecuencia disminuir el riesgo de afectación a la salud humana y ecosistemas.

Existen dos tipos de estrategias de gestión para el aseguramiento químico, una preventiva y otra reactiva. La estrategia preventiva se enfoca en el desarrollo de acciones previas a la producción del DAM, y las reactivas corresponden a las técnicas de control y tratamiento cuando ya hay existencia de drenaje⁷².

Para el caso del DAM seleccionado, la propuesta de cierre corresponde al control del drenaje para su aseguramiento químico. Este consiste en tratar el drenaje para reducir las cargas contaminantes; especialmente su contenido de metales para mejorar la calidad del vertimiento y las condiciones de la Quebrada La Baja, aguas abajo de la descarga del DAM.

Existen diagramas o arboles de decisión para la selección de la tecnología de tratamiento de acuerdo con las características del DMA. Estos diagramas se basan en la investigación desarrollada por expertos en su manejo exitoso. Para el caso en

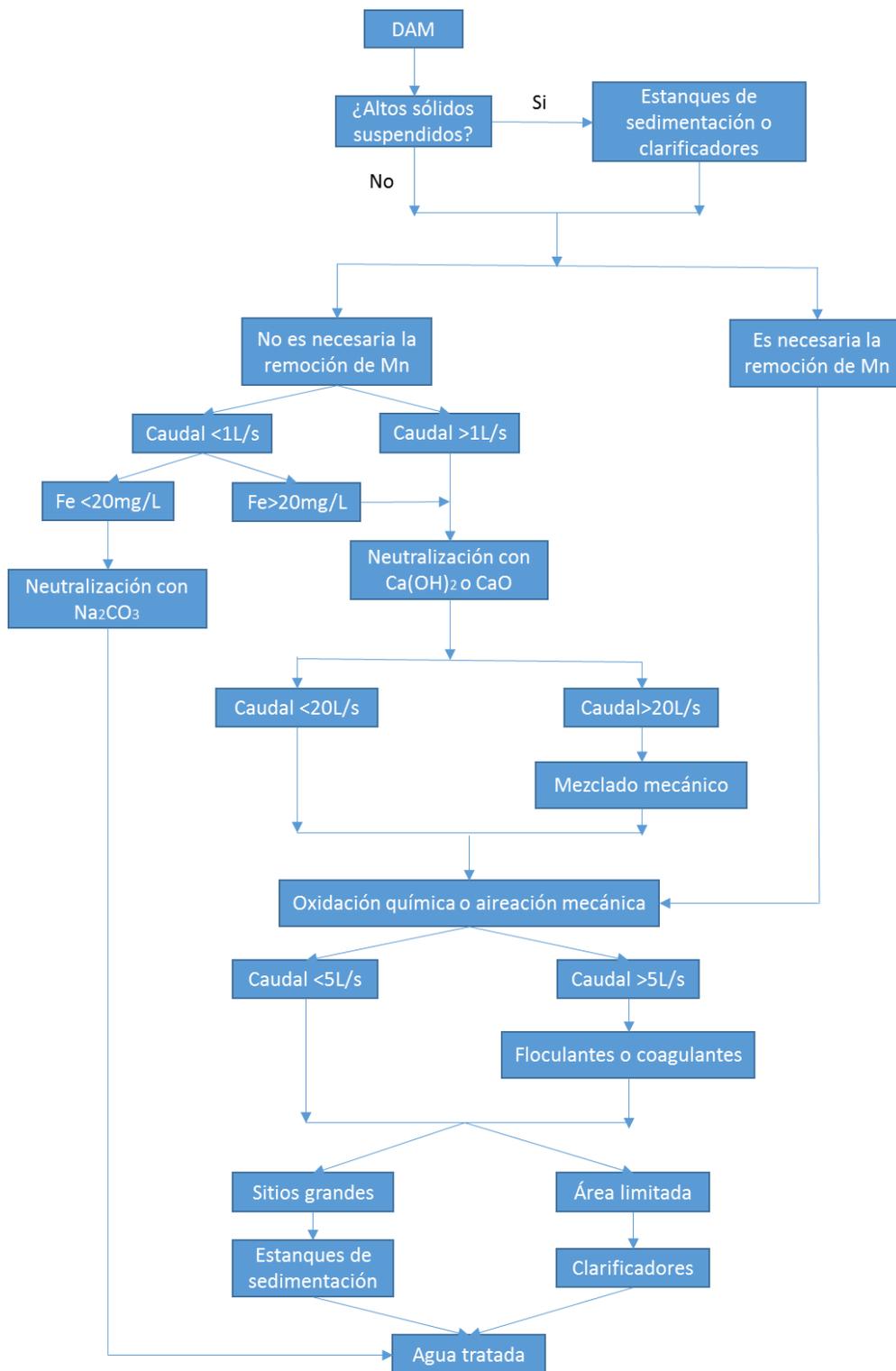
⁷² SERNAGEOMIN, Servicio Nacional de Geología y Minería. Ministerio de Minería de Chile. Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras, 2015, p. 248.

estudio, se aplicaron los diagramas de decisión propuestos por Trumm⁷³, que a su vez son similares a los de la Red Internacional para la Prevención del Ácido (INAP por sus siglas en inglés)⁷⁴. Se seleccionaron los de Trumm porque contemplan varios criterios, algunos asociados al DAM: caudal, contenido de hierro, manganeso, aluminio y oxígeno disuelto (este expresado como porcentaje de saturación de oxígeno), y otros relacionados con el lugar donde se proyecta la instalación del tratamiento. Sin embargo, el autor no define todos los criterios de decisión para todas las variables, por lo cual para el caso de estudio se consideró la legislación ambiental vigente y la minimización de los impactos ambientales. Los árboles de decisión de Trumm son los que se ilustran en las Figuras 10 y 11.

⁷³ TRUMM, D. Selection of active and passive treatment systems for AMD—flow charts for New Zealand conditions, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 53:2-3, 2010, p. 195-210, ISSN: 0028-8306.

⁷⁴ INAP. Op. cit.

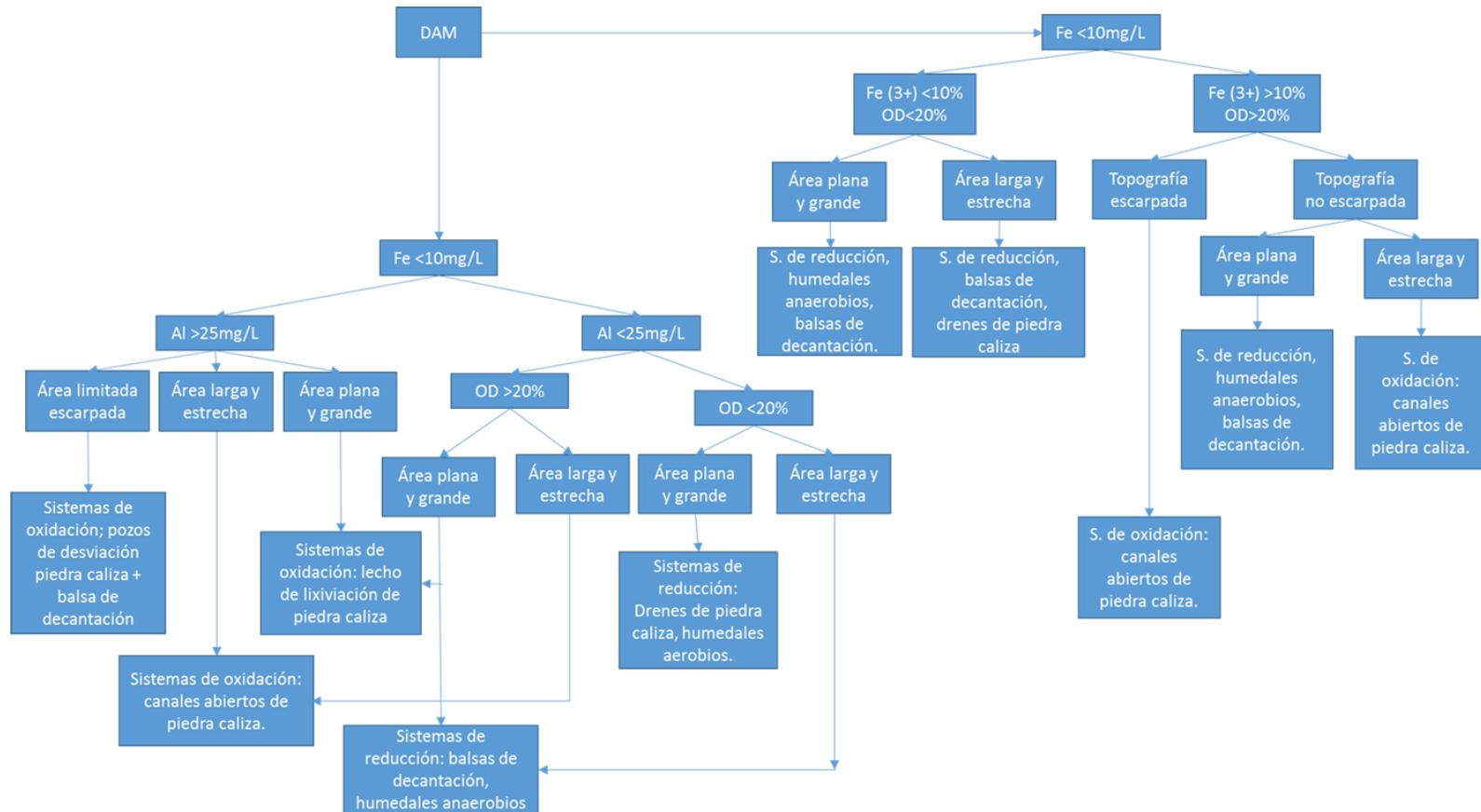
Figura 10. Árbol de decisión para la selección de tratamientos activos



Fuente: Adaptado por el autor a partir de Trumm D. (2010).

Para la selección de métodos pasivos se aplica el siguiente árbol de decisión.

Figura 11. Árbol de decisión para la selección de tratamientos pasivos



Fuente: Adaptado por el autor a partir de Trumm D. (2010)

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. BOCAMINA SELECCIONADA PARA LA APLICACIÓN DEL ESTUDIO DE CASO

Para la selección de la bocamina objeto de aplicación del estudio de caso, se realizaron varias visitas durante el segundo semestre del 2015, primero con el fin reconocer la actividad minera en el municipio de California (Santander), así como también establecer contacto con los mineros de la zona y posteriormente recorrer diferentes bocaminas en estado de abandono. En las figuras 12 a 16 se muestran los resultados obtenidos para varias bocaminas visitadas, siendo seleccionada la codificada con el número 4.

Figura 12. Bocamina visitada No. 1: No seleccionada

Bocamina # 1

pH: 5 unidades
Estado: Inactivo y en abandono
Caudal: Despreciable
Ubicación: California Santander
Accesibilidad a la bocamina: Sin problema
Accesibilidad al cuerpo receptor: Sin problema

Concepto:
Descartado porque el caudal es muy pequeño.



Fuente: El autor.

Figura 13. Bocamina visitada No. 2: No seleccionada

Bocamina # 2

pH: 6 unidades

Estado: Inactivo y en abandono

Caudal: Representativo

Ubicación: California Santander

Accesibilidad a la bocamina: Sin problema

Accesibilidad al cuerpo receptor: Dificil acceso, barreras topográficas.

Concepto:
Descartado por la dificultad para la toma de muestras en el cuerpo receptor.



Fuente: El autor.

Figura 14. Bocamina visitada No. 3: No seleccionada

Bocamina # 3

pH: 5 unidades

Estado: Inactivo y en abandono

Caudal: Despreciable

Ubicación: California Santander

Accesibilidad a la bocamina: Sin problema

Accesibilidad al cuerpo receptor: Dificil acceso, barreras topográficas.

Concepto:
Descartado por la dificultad para la toma de muestras en el cuerpo receptor.



Fuente: El autor.

Figura 15. Bocamina visitada No. 4: Seleccionada



Fuente: El autor.

La bocamina seleccionada se ubica en las coordenadas: 7.368048° latitud y - 72.917712° longitud, vereda La Baja, municipio de California (Santander). Esta se escogió por encontrarse en estado de abandono, con buenas condiciones de accesibilidad y por contar con un drenaje ácido de mina (pH *in situ* igual a 6 unidades). Cabe aclarar que el pH de esta bocamina en temporada seca posiblemente sea más bajo. El muestreo del DAM se realizó en mayo de 2016, es decir en temporada de lluvia. De acuerdo con información suministrada por personas de la zona, el día anterior al muestreo se presentaron lluvias en este sector.

El DAM seleccionado presentaba a lo largo de su longitud desde la bocamina hasta su llegada al cuerpo receptor o Quebrada La Baja (120m aproximadamente), un precipitado color naranja, el cual es característico de este tipo de drenajes⁷⁵. La figura 16 muestra la bocamina escogida.

⁷⁵ ADUVIRE et al. Op. Cit.

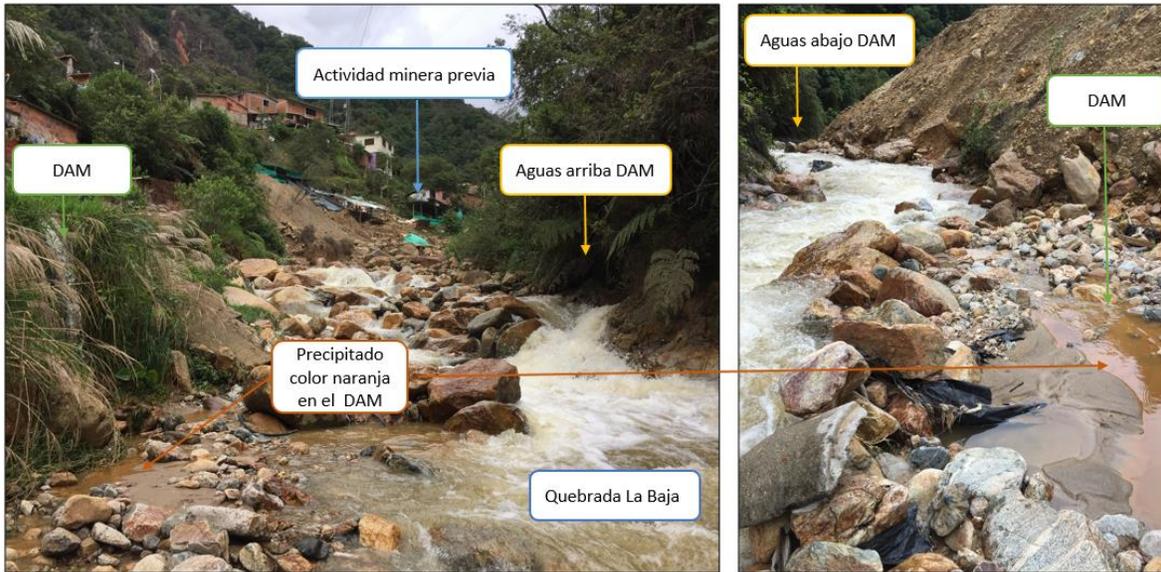
Figura 16. Bocamina seleccionada para la aplicación del estudio de caso



Fuente: El autor

De acuerdo con información dada por personas del sector, esta bocamina se denomina *San Antonio*. Aguas arriba del punto de descarga del DAM generado en esta bocamina, se observó la existencia de actividad minera, por lo cual el cuerpo hídrico cuenta con una afectación previa. La Figura 17 muestra el cuerpo receptor (Quebrada La Baja) y las condiciones aguas arriba y aguas abajo del mismo.

Figura 17. Quebrada La Baja: Llegada del DAM y condiciones aguas arriba y aguas abajo.



7.2. CARACTERIZACIÓN DEL DAM SELECCIONADO COMO ESTUDIO DE CASO

7.2.1. Caracterización del Drenaje Ácido de Mina. En los siguientes numerales se exponen los resultados de la caracterización de los diferentes aspectos del DAM seleccionado.

7.2.2.1 Caracterización físico química del DAM. La Tabla 8 resume los resultados de la caracterización del DAM seleccionado. El reporte del laboratorio *Consultas Industriales UIS* se adjunta en el Anexo A.

Tabla 8. Resultados caracterización DAM seleccionado como caso de estudio

Parámetro	Unidades	DAM en Bocamina	Norma de Vertimiento Resolución 631 de 2015, art. 10
pH	Unidades de pH	6,93	6 a 9

Parámetro	Unidades	DAM en Bocamina	Norma de Vertimiento Resolución 631 de 2015, art. 10
DQO	mg O ₂ /L	34,5	150
SST	mg/L	15	50
Nitrógeno Total	mg N/L	16,66	Análisis y reporte
Fósforo Total	mg P/L	0,8	Análisis y reporte
Conductividad	µS/cm	354	No considerado
Acidez	mg/L	97,96	Análisis y reporte
Azufre	mg/L	25,18	No considerado
% de saturación de oxígeno	%	84,1	No considerado
Arsénico	mg As/L	<0,00055	0,1
Cadmio	mg Cd/L	<0,0011	0,05
Cromo Total	mg Cr/L	<0,0045	0,5
Cromo Hexavalente	mg Cr ⁺⁶ /L	0,014	No considerado
Hierro Total	mg Fe/L	8,764	2,0
Plomo	mg Pb/L	<0,0068	0,2
Cobre	mg Cu/L	<0,0021	1,0
Manganeso	mg Mn/L	1,975	No considerado
Aluminio	mg Al/L	<0,005	No considerado

Fuente: A partir de resultados reportados del laboratorio Consultas Industriales UIS.

El DAM vertido a la Quebrada La Baja deberá cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en la resolución 631 de 2015, artículo 10 para la actividad de extracción de oro (ver tabla 8). De acuerdo con estos límites y las concentraciones resultantes de la caracterización del drenaje, se estaría cumpliendo con pH, DQO, SST, As, Cd, Cr total, Pb y Cu, incumpliendo solamente para el hierro total. Metales como el Cromo hexavalente, Manganeso y Aluminio no tienen norma asociada. Así mismo, la norma establece algunos parámetros únicamente de control, los cuales se deben analizar y reportar. De los metales exigidos por la resolución 631 de 2015, no se analizaron: mercurio, níquel y plata, por no estar entre los metales regularmente asociados a los drenajes ácidos⁷⁶. En el caso del zinc no se muestreo por limitaciones en el presupuesto del proyecto.

⁷⁶ Ibid.

El contenido de azufre en el DAM es 25,18 mg/L. Este elemento está presente por oxidación de la piritita presente en el yacimiento minero. Esta oxidación es la que da origen a la liberación de acidez y presencia de metales en el DAM⁷⁷.

7.2.2.2. Cantidad de DAM generado en la Bocamina: En campo se realizó el aforo volumétrico y se determinó el caudal del DAM. Se usó un recipiente aforado y se contabilizó el tiempo para el llenado de 3,5 litros. Los resultados del caudal del DAM se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Caudal del DMA seleccionado (medido *in situ*)

Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal DAM (L/s)	Caudal DAM (L/d)
3,5	3,3	1,06	91.636,4
3,5	3,1	1,13	97.548,4
3,5	3,1	1,13	97.548,4
3,5	3,3	1,06	91.636,4
3,5	3,2	1,09	94.500,0

Fuente: El autor

En promedio el DAM tiene un caudal de 1,09 litros por segundo, que equivaldrían a 94.573,9 litros por día.

7.2.2.3. Cargas control y de vertimiento de sustancias de interés sanitario: Se realizó el cálculo de las cargas control y de vertimiento para el DAM, para los parámetros: arsénico, cadmio, cromo hexavalente, plomo y cobre, por ser sustancias de interés sanitario (artículo 74 del Decreto 1594 de 1984)⁷⁸. Los resultados se reportan a continuación en la Tabla 10.

⁷⁷ MORENO, R. y JIMENEZ, J. Mejoramiento del actual tratamiento activo y propuesta de un método pasivo para el manejo de drenajes ácidos en el distrito minero auroargentífero Vetas – California (Santander). Monografía Especialización en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. 2012, 77p.

⁷⁸ COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. Decreto 1594. (26, junio, 1984). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Diario Oficial.

Tabla 10. Cargas control y de vertimiento de sustancias de interés sanitario

Parámetro	CV DAM	CDC Art. 74 Dec. 1594 del 84 (mg/L)	Q DAM (L/s)	A: Carga Control (Kg/d)	B: Carga DAM (Kg/d)	A: Carga Control (Kg/año)	B: Carga DAM (Kg/año)
Arsénico	0,0006	0,5	1,095	0,0473	0,00005	17,27	0,02
Cadmio	0,0011	0,1	1,095	0,0095	0,0001	3,45	0,04
Cromo Hexavalente	0,014	0,5	1,095	0,0473	0,0013	17,27	0,48
Plomo	0,0068	0,5	1,095	0,0473	0,0006	17,27	0,23
Cobre	0,0021	3,0	1,095	0,2838	0,0002	103,60	0,07

Fuente: El autor

Las cargas del vertimiento de las sustancias de interés sanitario monitoreadas en el DAM son muy pequeñas e inferiores a todas las cargas control. Sin embargo, al aplicar el artículo 75 del Decreto 1594 de 1984, establece la carga máxima permisible –CMP-, como la menor entre A y B, por tanto la CMP del DAM correspondería a los valores de B, es decir que para el cierre minero se debe plantear la remoción de metales, aun cuando su carga sea muy pequeña.

7.2.2.4. Tipificación del DAM. En este punto se verifica que el DAM seleccionado efectivamente se clasifica como drenaje ácido de mina, según criterios INAP (2014) y Aduvire (2006). La Tabla 11 muestra los resultados del DAM confrontados con dos criterios. Estos definen el drenaje según criterio INAP como ácido y según Aduvire como moderadamente ácido.

Tabla 11. Clasificación del DAM seleccionado como caso de estudio

Criterio	DAM	Valor Clasificación	Descripción de la Clasificación	Fuente
pH <i>in situ</i> (unidades pH)	6	≥ 6	Drenaje ácido	INAP, 2014
pH en Laboratorio (unidades pH)	6,93	6-7	Drenaje ácido. Por su bajo contenido de arsénico, cadmio y magnesio.	INAP, 2014
Acidez (mg/L)	97,96	100-300	Moderadamente ácido	ADUVIRE, 2006

Fuente: El autor

7.3. CARACTERIZACIÓN DEL COMPONENTE HÍDRICO SUPERFICIAL

Los resultados de la caracterización de la quebrada La Baja se presentan en la Tabla 12 (el soporte del laboratorio se adjunta en el Anexo A).

Tabla 12. Resultados caracterización Quebrada La Baja aguas arriba y aguas abajo del DAM seleccionado como caso de estudio.

Parámetro	Unidades	DAM	Quebrada La Baja	
			Aguas Arriba DAM	Aguas Abajo DAM
pH	Unidades de pH	6,93	7,47	7,49
DQO	mg O ₂ /L	34,5	47,04	70,56
SST	mg/L	15	44	49
Nitrógeno Total	mg N/L	16,66	15,27	13,88
Fósforo Total	mg P/L	0,8	0,3	0,5
Conductividad	μS/cm	354	160,3	159,7
Acidez	mg/L	97,96	53,87	48,98
Azufre	mg/L	25,18	14,06	13,68
% de saturación de oxígeno	%	84,1	79,8	72,3
Arsénico	mg As/L	<0,00055	<0,00055	<0,00055
Cadmio	mg Cd/L	<0,0011	<0,0011	<0,0011
Cromo Total	mg Cr/L	<0,0045	<0,0045	<0,0045
Cromo Hexavalente	mg Cr ⁺⁶ /L	0,014	0,042	0,011
Hierro Total	mg Fe/L	8,764	2,265	2,298

Parámetro	Unidades	DAM	Quebrada La Baja	
			Aguas Arriba DAM	Aguas Abajo DAM
Plomo	mg Pb/L	<0,0068	<0,0068	<0,0068
Cobre	mg Cu/L	<0,0021	<0,0021	<0,0021
Manganeso	mg Mn/L	1,975	0,097	0,143
Aluminio	mg Al/L	<0,005	<0,005	<0,005

Fuente: A partir de resultados reportados del laboratorio *Consultas Industriales UIS*.

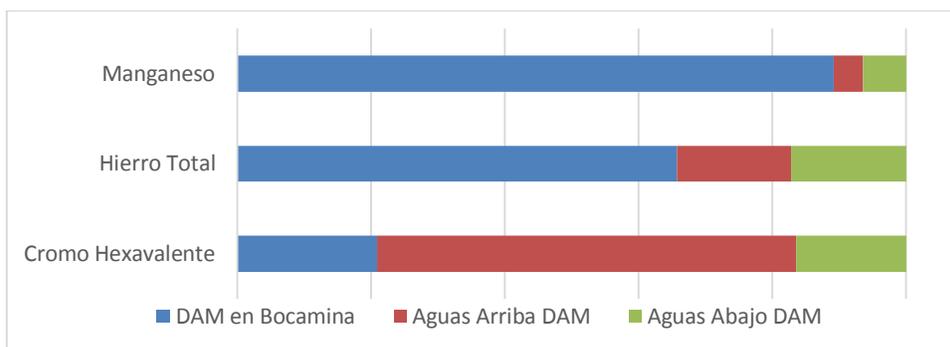
Las condiciones de variación de pH y conductividad en la Quebrada La Baja son insignificantes. Los sólidos suspendidos totales aumentan en 10,2%, la demanda química de oxígeno aumenta 33,3% y el fósforo total 40%, en relación con las condiciones aguas arriba del DAM, evidenciándose afectación por el incremento de estos parámetros. Las variables nitrógeno total, acidez y porcentaje de saturación de oxígeno, disminuyen después de recibir el DAM; en 10%, 9% y 10,4%, respectivamente. En el caso del nitrógeno y acidez, es favorable que disminuyan porque a mayor concentración afectan la calidad del recurso, por su parte la disminución del porcentaje de oxígeno disuelto es proporcional al deterioro del recurso. En el numeral 7.5.2.2 se analiza la pérdida de la calidad del recurso en función del índice de calidad colombiano.

El azufre en la Quebrada La Baja antes del vertimiento del DAM se encuentra en 14,06 mg/L y después de del DAM en 13,68 mg/L, por lo cual no se evidencia un aporte como tal de parte del drenaje. No existe límite permisible para este parámetro.

Los metales con mayor concentración tanto aguas arriba, como aguas abajo y en el DAM, son el hierro total y el Manganeso (ver Tabla 12). Los metales: As, Cd, Cr total, Pb, Cu y Al, están por debajo del límite de detección del laboratorio, por tanto se desconoce su concentración.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Figura 18 se muestra la distribución de Fe, Mn y Cr⁶⁺ en el agua. El Mn y Fe están en alta proporción en el DAM. El metal con mayor presencia aguas abajo del drenaje es el Fe.

Figura 18. Distribución contenido de MP en el DAM y su cuerpo hídrico receptor.



Fuente: El autor.

La presencia de los MP es discutida en el numeral 7.5.2.3 en relación con la normatividad de usos de agua.

7.4. CARACTERIZACIÓN DEL COMPONENTE EDÁFICO

Los resultados de la caracterización del suelo para los cuatro puntos muestreados, se resumen en la Tabla 13 (en el Anexo A se adjunta el reporte del laboratorio):

Tabla 13. Resultados caracterización suelo afectado por el DAM seleccionado como caso de estudio

Parámetro	Unidades	P1 *	P2 *	P3 *	P4 *	Promedio
pH	Unidades de pH	5,72	4,29	5,78	4,28	5,0175
Conductividad	µS/cm	137,3	154,5	208,1	127,8	156,925
Acidez	(mg / kg)	2,37	3,67	1,98	1,19	2,3025
Azufre	(mg S/ kg)	2100	1100	1200	30	1107,5

Parámetro	Unidades	P1 *	P2 *	P3 *	P4 *	Promedio
Arsénico	(mg As/ kg)	122,59	46,20	69,57	59,12	74,4
Cadmio	(mg Cd/kg)	30,46	5,38	20,43	<3,73	18,8
Cromo Hexavalente	(mg Cr+6 /Kg)	2,083	0,390	0,975	1,49	1,2
Cromo Total	(mg Cr/kg)	<24	<24	<24	<24	<24
Hierro Total	(mg Fe/kg)	64000	45200	37500	42900	47.400,0
Aluminio	(mg Al/kg)	4200	11500	5100	14200	8.750,0
Plomo	(mg Pb/kg)	8,93	14,94	11,90	15,86	12,9
Cobre	(mg Cu/kg)	1740,58	307,94	173,64	483,70	676,5
Manganeso	(mg Mn/kg)	382,94	376,46	614,34	2.569,73	985,9

* P1 a 22,1m, P2 a 29,6m, P3 a 48,7 y P4 a 98m de la Bocamina.

Fuente: A partir de resultados reportados del laboratorio *Consultas Industriales UIS*.

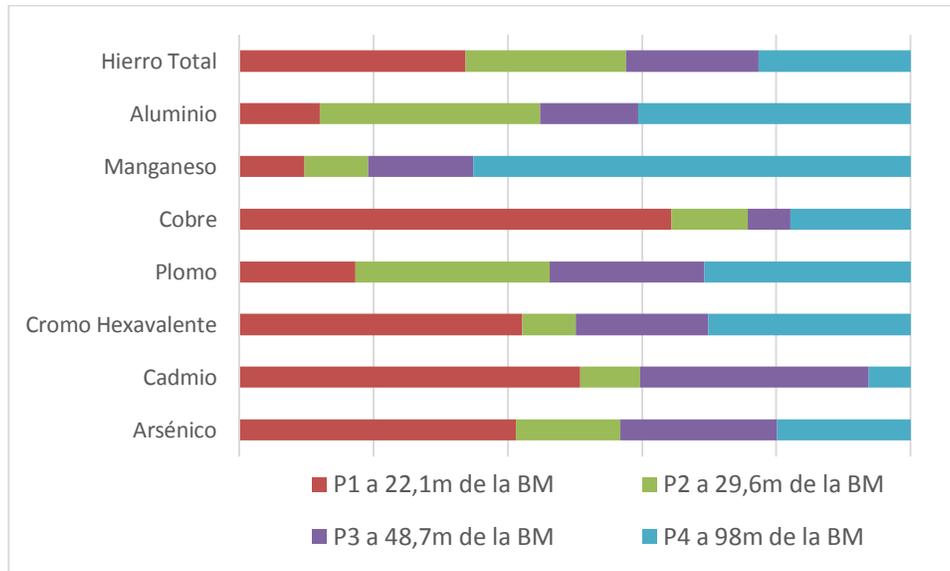
El suelo en los puntos analizados presenta acidez. En el numeral 7.5.1.1 se discute sobre este parámetro.

El azufre en el suelo muestreado varía entre 30 a 2.100 mg/kg, encontrándose más concentrado en el suelo más cercano a la bocamina. El azufre es un elemento fundamental para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Sin embargo, en todos los puntos se supera el valor de 25 mg/kg sugerido por Castro y Munevar (2013) como nivel tolerable en las plantas⁷⁹.

El contenido promedio de los MP en el suelo, sigue la siguiente secuencia Fe>Al>Mn>Cu>As>Cr>Cd>Pb>Fe>Cr⁺⁶. Las concentraciones promedio más altas en relación con los demás metales son: Hierro (47.400 mg/kg), Aluminio (8.750 mg/kg), Manganeso (985 mg/kg) y Cobre (676 mg/kg). La Figura 19 muestra la distribución de los diferentes metales por punto.

⁷⁹ CASTRO, H., MUNEVAR, Ó. Mejoramiento químico de suelos ácidos. Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica, Vol.16 No. 2, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, 2013, p. 409-416 {En línea}. {Consultado agosto 2016}. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v16n2/v16n2a15.pdf>.

Figura 19. Distribución del contenido de MP en suelos colindantes al DAM



Fuente: El autor

En la Figura 19 se aprecia que los metales que tienen mayor proporción en el punto más cercano a la boca mina son: Fe, Cu, Cr⁺⁶, Cd y As. En el punto más lejano a la boca mina los metales con mayor presencia son Mn, Al y Pb. Para el punto dos de muestreo de suelos los metales más frecuentes son Al y Cu. En el punto tres Cd, As y Pb.

En el numeral 7.5.1.3 se realiza la discusión de MP respecto a estándares internacionales, toda vez que en Colombia no se cuenta con normatividad que determine límites máximos permisibles para este recurso.

7.5. DETERMINACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES SOBRE LOS COMPONENTES EDÁFICO E HÍDRICO PARA EL DAM SELECCIONADO COMO ESTUDIO DE CASO

La determinación de los impactos ambientales sobre el recurso agua y suelo, asociados al aspecto de generación de DAM, partió de la síntesis de impactos

ambientales derivados de los DMA, Figura 5, realizada a partir de Dudka y Domy (1997). Posteriormente se realizó una matriz de verificación presencia, ausencia o posibilidad de existencia para estos impactos. Las matrices se muestran en las Tablas 14 y 15.

Tabla 14. Matriz de identificación de impactos ambientales sobre el componente edáfico por acción del DAM

Impacto ambiental	Presencia	Ausencia	Posible	Observaciones <i>in situ</i>
Acidificación del suelo			X	El pH de las muestras de suelo se debe analizar en el laboratorio.
Pérdida de la calidad del suelo	X			En el suelo colindante al DAM tiene cobertura vegetal, excepto por un tramo de aproximadamente 40m, que corresponde a próximamente el 33% de la longitud total del drenaje.
Contaminación a la cadena alimenticia			X	Posiblemente, pero requiere de estudios especiales para su verificación.
Acumulación de elementos tóxicos			X	Se verificarán las concentraciones analizadas en el laboratorio con normas nacionales e internacionales.
Daños a la biota y flora			X	La verificación requiere de caracterizaciones biológicas especiales.
Erosión	X			El DAM no es conducido hasta su cuerpo receptor y por esto crea erosión hídrica.

Fuente: El autor

Tabla 15. Matriz de identificación de impactos ambientales sobre el componente hídrico por acción del DAM

Impacto ambiental	Presencia	Ausencia	Posible	Observaciones <i>in situ</i>
Acidificación del agua	X			pH <i>in situ</i> del DAM es 6, pH <i>in situ</i> Q. La Baja antes y después del DAM es 5. Se evidencia actividad minera previa al punto aguas arriba.
Pérdida de la calidad del agua	X			El DAM vertido presenta precipitado color naranja (asociado metales) durante su recorrido desde la bocamina hasta la Q. La Baja.
Contaminación a la cadena alimenticia			X	Posiblemente pero requiere de estudios especiales para su verificación.
Acumulación de elementos tóxicos			X	Se debe verificar si aguas abajo del DAM aumentan los metales.
Daños a la biota			X	La verificación requiere de caracterizaciones biológicas especiales.

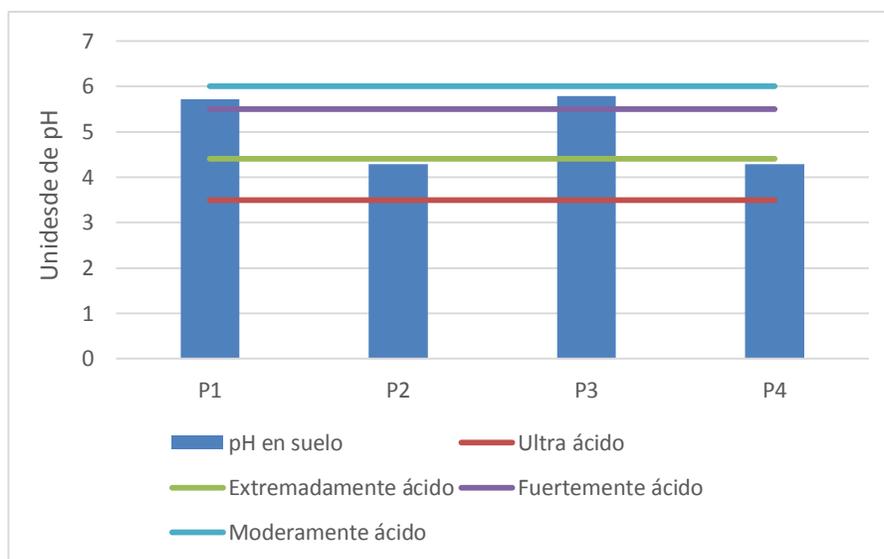
Fuente: El autor

De los impactos identificados (Tabla 14 y 15) ninguno está ausente, algunos se evidenciaron en campo, otros se determinaron a partir de los resultados de laboratorio, mientras otros requieren de estudios especializados que no son objeto del presente trabajo. Por lo tanto, en los siguientes numerales, se determinará la presencia de los siguientes impactos (tanto en el suelo como en el agua): 1) Acidificación del suelo, 2) Pérdida de la calidad del recurso suelo y 3) Acumulación de elementos tóxicos.

7.5.1. Determinación de impactos ambientales sobre el componente edáfico por acción del DAM

7.5.1.1. Acidificación del suelo: El suelo colindante al DAM se clasifica según su pH (USDA, 1993)⁸⁰, el cual resulta extremadamente ácido para las muestras de suelo 2 y 4, y moderadamente ácido para las muestras 1 y 3.

Figura 20. Clasificación del suelo colindante al DAM



Fuente: El autor

Las muestras de suelos afectados por el DAM, presentan acidez (ver Figura 20). Las condiciones de acidez en el suelo favorecen la movilidad de los metales y su disponibilidad en este medio (ALLOWAY, 2013).

7.5.1.2. Pérdida de la calidad del recurso suelo: Para establecer la pérdida de la calidad del suelo, se reconoce la calidad como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad

⁸⁰ USDA, United States Natural Resources Conservation Service. Soil Survey Division Staff. Soil Survey Manual. Handbook No. 18. Washington D. C., 1993, 437p.

de las plantas y los animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat (definición de la Sociedad Científica Americana del Suelo). Para esto a nivel mundial se establecen indicadores que varían de acuerdo con las características del lugar. Entre los indicadores más usados están: 1) Físicos: textura, profundidad, infiltración, densidad aparente, capacidad de retención de agua, estabilidad y agregados, 2) Químicos: materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, nitrógeno, fósforo y potasio, capacidad de intercambio catiónico de metales y MP disponibles, y 3) Biológicos: biomasa, nitrógeno potencial mineralizable, respiración edáfica, contenido de agua, temperatura del suelo, número de lombrices y rendimiento del cultivo⁸¹.

De acuerdo con lo anterior se requiere de una línea base o referencia para establecer dicho impacto, así como de información complementaria a la caracterización realizada. Solo se cuenta con el indicador de contenido de metales disponibles en el suelo, el cual se presenta en la Tabla 16, para los cuatro puntos en relación con normas internacionales de límites máximos permisibles. Cuando las concentraciones de metales sobrepasan los límites establecidos, se puede afirmar que existe la presencia de este impacto.

7.5.1.3. Acumulación de elementos tóxicos: Colombia actualmente no cuenta con normatividad de calidad para el suelo. La normativa existente es la alusiva al uso de biosólidos en la agricultura, plantaciones forestales, estabilización de taludes, así como sustratos, material de cobertura, entre otros. Es por esto, que se toman estándares internacionales como niveles de referencia para realizar la comparación

⁸¹ GARCÍA, Y., RAMÍREZ, W., SÁNCHEZ, S. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. Revista Pastos y Forrajes, Vol. 35, No. 2, 2012, p. 125-138. {En línea}. {Consultado noviembre 2015}. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001

con los suelos en estudio. En la Tabla 16 se muestran los resultados por punto y las normas de referencia^{82,83,84,85}.

Tabla 16. Concentraciones de metales en suelos afectados por DAM y normas internacionales de calidad de suelo

Metales (mg/Kg)	P1 a 22,1m de la BM	P2 a 29,6m de la BM	P3 a 48,7m de la BM	P4 a 98m de la BM	Promedio P1-P4	Colombia *	Estados Unidos**	Canadá***	Perú****
Arsénico	122,59	46,20	69,57	59,12	74,4	40	75	25	50
Cadmio	30,46	5,38	20,43	<3,73	18,8	40	85	8	1,4
Cromo Total	<24	<24	<24	<24	<24	N.E.	N.E.	75	N.E.
Cromo Hexavalente	2,083	0,390	0,975	1,49	1,2	N.E.	N.E.	N.E.	0,4
Plomo	8,93	14,94	11,90	15,86	12,9	400	10	200	70
Cobre	1.740,58	307,94	173,64	483,70	676,47	1750	5 a 30	100	N.E.
Manganeso	382,94	376,46	614,34	2.569,73	985,87	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Aluminio	4.200	11.500	5.100	14.200	8.750	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Hierro Total	64.000	45.200	37.500	42.900	47.400	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.

*Resolución No.1287-2014, **EPA/540/ R-95/128, ***Galán y Romero (2008), ****Decreto supremo No.002-2013. N.E. No Establecido.

Fuente: El autor.

Los estándares seleccionados no tienen todos los parámetros, por ende, se analizaran solo aquellos que tienen alguna referencia, sin dejar de lado que están establecidos en función de sus propias condiciones (características locales, uso, tipo de suelo, clima, entre otros).

El metal con mayor presencia en los suelos estudiados es el Hierro. Las concentraciones de Hierro en el suelo están entre 37.500 y 64.000 mg/Kg. La mayor

⁸² COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD y TERRITORIO. Resolución No. 1287. (10, julio, 2014). Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. {En línea}. {Consultado mayo 2016}. Disponible en: <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/JULIO/10/DECRETO%201287%20DEL%2010%20DE%20JULIO%20DE%202014.pdf>

⁸³ RUEDA, Germán, Rodríguez, Jenny y Madriñan Raúl. Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: Perspectivas para Colombia. 2011

⁸⁴ GALÁN y ROMERO. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química. Universidad de Sevilla. Revista de la sociedad española de mineralogía, Macla N° 10, 2008, p.48-60.

⁸⁵ PERÚ. PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. DECRETO SUPREMO N° 002. (25, marzo, 2013). Por la cual se aprueban estándares de calidad ambiental para suelo. {En línea}. {Consultado mayo 2016}. Disponible en: http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_002-2013-minam-fe-erratas.pdf

concentración se ubica en el punto más cercano a la bocamina. No existe norma relacionada al suelo que involucre este parámetro.

El Aluminio es el segundo metal con mayor presencia en el suelo estudiado, sus concentraciones están entre 4.200 y 14.200 mg/Kg. La mayor concentración se ubica en el punto más lejano a la bocamina. No existe norma relacionada al suelo que involucre este parámetro.

Después del Fe y Al, el Mn es el metal con mayor presencia en el suelo; con concentraciones entre 382,94 a 2.569,73 mg/kg. La mayor concentración se ubica en el punto más lejano a la bocamina. No existe norma relacionada al suelo que involucre este parámetro.

Las concentraciones de Cu en el suelo son altas; van desde 173,6 hasta 1740,5 mg/Kg. La mayor concentración se ubica en el punto más cercano a la bocamina. Los niveles de este metal superan los límites máximos establecidos en normas internacionales para calidad del suelo (30 mg/Kg para Estados Unidos y 100 mg/Kg para Canadá). La norma Colombiana es flexible porque se trata de biosólidos.

El Arsénico se encuentra en concentraciones altas, esto, tomando como referencia las normas internacionales (75 mg/Kg para Estados Unidos, 25 mg/Kg para Canadá y 50 mg/Kg para Perú). Las concentraciones se encontraron desde 46,2 a 122,5 mg/Kg, superando incluso el límite colombiano de 50 mg/Kg. La mayor concentración se ubica en el punto más cercano a la bocamina.

El cromo total está presente en concentraciones menores a 24 mg/Kg, pero su valor podría ser cualquiera debido a que este es el límite de detección del laboratorio. Si el valor estuviera en 24 mg/Kg cumpliría con la referencia Canadiense; 75 mg/Kg, por tanto no se consideraría contaminación asociada a este metal.

El cromo hexavalente, en todos los puntos, supera la norma Peruana, la cual tiene como fundamento la norma Alemana. Las concentraciones de cromo hexavalente están entre 0,39 a 2,083 mg/Kg. La mayor concentración está ubicada en el punto más cercano a la bocamina.

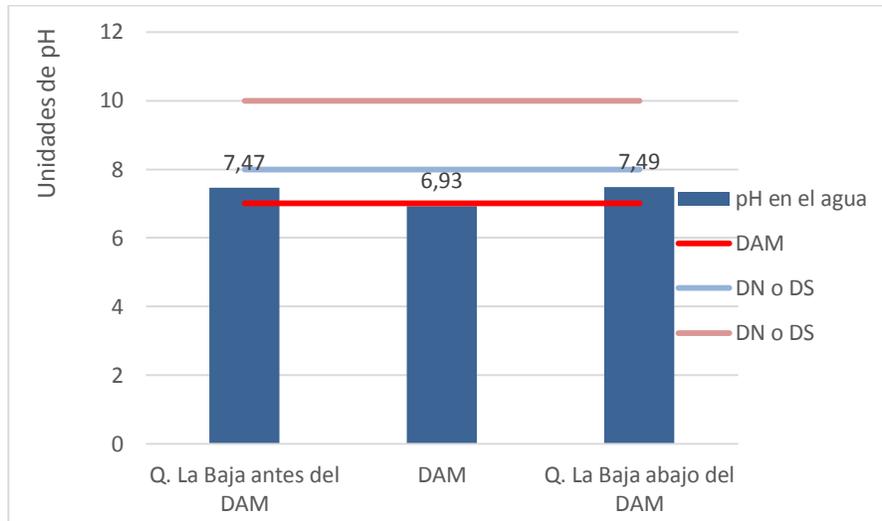
En promedio la concentración de Cd es de 18,8 mg/Kg y se encuentra por debajo de las normas de Estados Unidos y Colombia, pero supera las concentraciones permisibles de Canadá y Perú; ambas para uso agrícola del suelo. Teniendo en cuenta las condiciones de acidez del suelo, facilitaría la absorción del metal a plantas.

El valor promedio del Pb corresponde a 12,9 mg/Kg para los suelos cercanos al DAM. Según las normas de referencia solamente superaría una, la norma de Estados Unidos; 10 mg/Kg, con respecto a las demás normas el valor es muy pequeño, por lo tanto no se consideraría que el suelo esté contaminado por la presencia de este metal.

7.5.2. Determinación de impactos ambientales sobre el componente hídrico superficial por acción del DAM

7.5.2.1. Acidificación del recurso hídrico superficial: La variación del pH en la Quebrada La Baja es mínima (0,3%) al comparar la condición antes y después del DAM, el pH aumenta, por lo cual se considera que la descarga ligeramente ácida del drenaje no genera un cambio significativo sobre su cuerpo receptor.

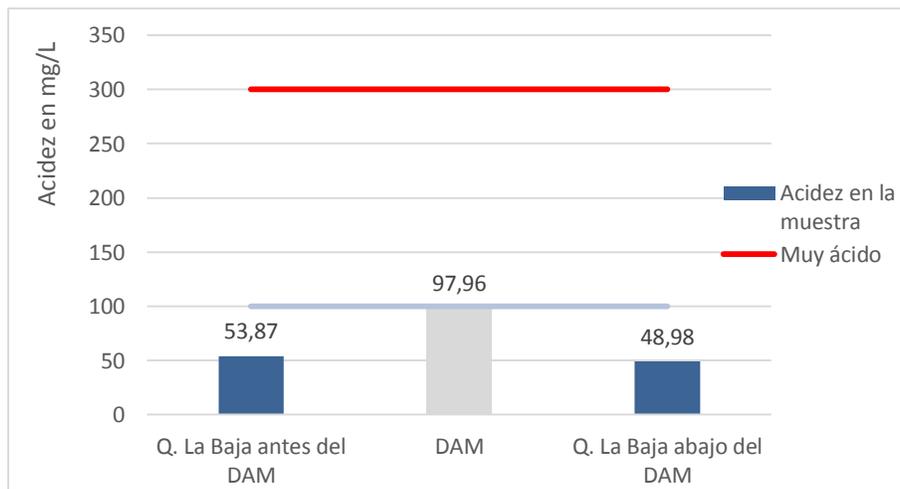
Figura 21. Valores de pH en el DAM y en la Quebrada La Baja



Fuente: El autor

La acidez del DAM aparentemente no afecta las condiciones aguas abajo en la Quebrada La Baja, por el contrario este parámetro disminuye en 9%, respecto a sus condiciones previas (Figura 22). Esto puede ser dar por condiciones puntuales del agua en el momento en que se tomó la muestra.

Figura 22. Valores de Acidez en el DAM y en la Quebrada La Baja

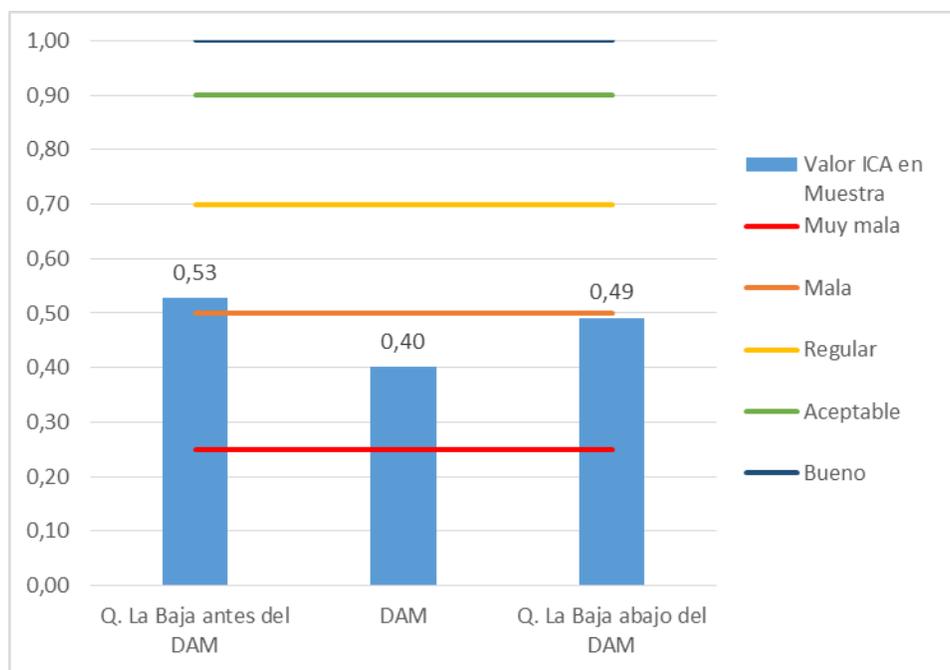


Fuente: El autor

No se evidencia acidificación del recurso hídrico superficial.

7.5.2.2. Pérdida de la calidad del recurso hídrico superficial: La calidad de la Quebrada La Baja se analiza a partir de la aplicación del ICA compuesto por seis (6) variables. Los resultados del ICA se muestran en la Figura 23.

Figura 23. Índice de Calidad del Agua Q. La Baja - condiciones antes y después del DAM, municipio de California (Santander), mayo de 2016



Fuente: El autor

La calidad del agua en la Quebrada La Baja disminuye en un 6,8%. Esta principalmente es afectada por el vertimiento del DAM, y su aporte se traduce, principalmente, en altas Demanda Química de Oxígeno (DQO) y conductividad.

La calidad del agua debe estar asociada a la cantidad, pero como no se cuenta con valores de caudales para el cuerpo receptor, se analiza el DAM como un efluente,

ya que es agua, que de contar con buena calidad, podría usarse aguas abajo, por ejemplo en riego, consumo humano, entre otros usos.

La Organización Mundial de la Salud –OMS- expone que la cantidad mínima de agua que requiere una persona al día está entre 20 a 25 litros (OMS, 2003). Teniendo en cuenta esto, se realizó el cálculo del número de personas que se podrían abastecer del DAM. Se tomó como base 25 litros por persona al día. La Tabla 17 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 17. Resultados número de personas que se podrían abastecer del DAM en estudio.

Caudal DAM (L/d)	Mínimo de Agua * (L-persona/d)	Número de personas que se abastecerían con el caudal DAM
91.636,4	25	3.665
97.548,4	25	3.902
97.548,4	25	3.902
91.636,4	25	3.666
94.500,0	25	3.780

*OMS, 2003

Fuente: El autor

En promedio, el DAM podría abastecer (con un mínimo de agua de 25L/d) a 3.783 personas, equivalente al número proyectado de personas en el casco urbano del municipio de California (según Plan de Desarrollo 2012-2015, la proyección a 2015 estaría entre 3000 a 5000 habitantes).

7.5.2.3. Acumulación de elementos tóxicos en el agua. A diferencia del recurso suelo este impacto sería la presencia de elementos tóxicos en el agua por acción de un vertimiento permanente –DAM-. Es decir que este impacto no sería

acumulativo por tratarse de cuerpo receptor lotico. La acumulación podría estar en los sedimentos, pero el estudio no los contempló en el alcance.

En la Tabla 18 se observan las condiciones de la Quebrada La Baja y las normas para destinación del recurso: consumo humano y preservación de ecosistemas, tanto a nivel nacional⁸⁶ como internacional^{87,88,89}.

Tabla 18. Resultados de parámetros para el DAM y los puntos (muestras) agua arriba y aguas abajo, y su comparación por tipo de uso con normativa nacional e internacional

Parámetro	Unidades	DAM en Bocamina	Quebrada La Baja		Colombia*		Estados Unidos**		Canadá***		Perú****	
			Aguas Arriba DAM	Aguas Abajo DAM	Consum. Humano	Fauna y Flora	Consum. Humano	Vida Acuática	Consum. Humano	Fauna y Flora	Consum. Humano	Vida Acuática
Arsénico	mg As/L	<0,00055	<0,00055	<0,00055	0,05	0,1	1,8E-05	0,34	0,05	0,05	0,01	0,1
Cadmio	mg Cd/L	<0,0011	<0,0011	<0,0011	0,01	0,01	0,005	0,0018	0,005	2E-04	0,005	0,01
Cromo Total	mg Cr/L	<0,0045	<0,0045	<0,0045	N.E	N.E	1,3	N.E	0,05	0,02	0,05	N.E
Cromo Hexavalente	mg Cr ⁶⁺ /L	0,014	0,042	0,011	0,05	0,01	N.E	0,016	N.E	N.E	N.E	0,1
Hierro Total	mg Fe/L	8,764	2,265	2,298	N.E	0,1	N.E	N.E	0,03	0,3	1	N.E
Plomo	mg Pb/L	<0,0068	<0,0068	<0,0068	0,05	0,01	0,015	0,065	0,05	0,001	0,05	0,0025
Cobre	mg Cu/L	<0,0021	<0,0021	<0,0021	1	0,1	0,0013	N.E	1	0,002	2	0,2
Manganeso	mg Mn/L	1,975	0,097	0,143	N.E	0,1	0,05	N.E	0,05	N.E	0,4	N.E
Aluminio	mg Al/L	<0,005	<0,005	<0,005	N.E	N.E	0,05 a 0,2	N.E	N.E	0,005	5	N.E

* Decreto 1594-1984, **USEPA, *** Canadian Water Quality Guidelines, ****Decreto supremo 015-2015. N.E. No establecido.

Fuente: El autor

Los metales: arsénico, cadmio, cromo total, plomo, cobre y aluminio están presentes en cantidades muy bajas, todas por debajo del límite de detección del laboratorio. Si se tomara para estos metales como concentración el límite de detección, se tendría que tanto en el DAM como en la Quebrada La Baja, cumplirían los límites nacionales e internacionales para destinación del recurso hídrico, para consumo

⁸⁶ COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. Op. Cit.

⁸⁷ USEPA, United States Environmental Protection. National recommended water quality criteria. Section 304(a) of the Clean Water, 2013. {En línea}. {Consultado mayo 2016}. Disponible en: <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria>

⁸⁸ CCME, Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian Water Quality Guidelines, 2008, 1484p.

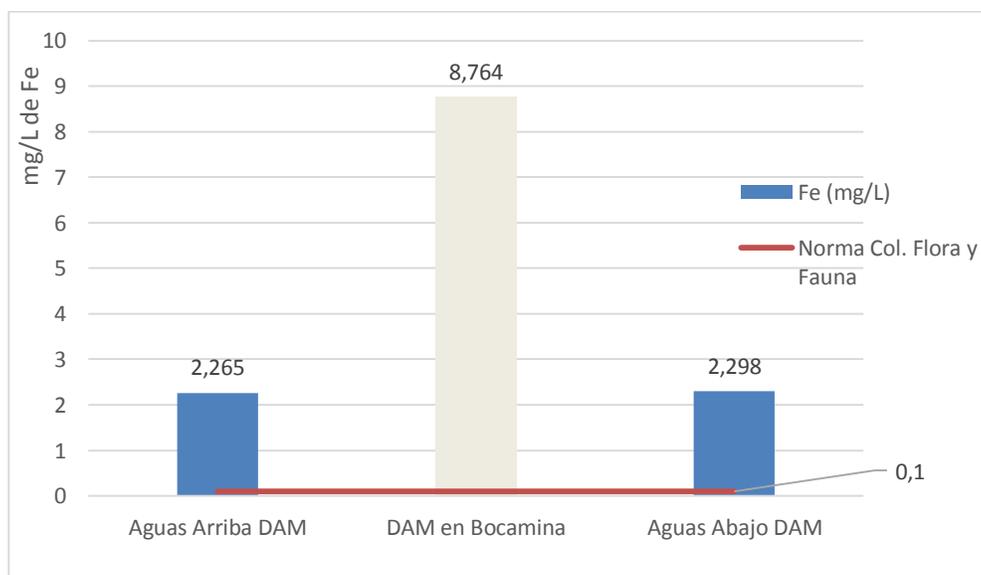
⁸⁹ PERÚ. PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. DECRETO SUPREMO N° 015. (19, diciembre, 2015). Por la cual se modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación. {En línea}. {Consultado mayo 2016}. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/12/Decreto-Supremo-N%C2%B0-015-2015-MINAM.pdf>

humano y preservación de ecosistemas acuáticos, para los parámetros: Cd, Cr, Pb y Al, en el caso del As y Cu, se sobrepasaría la norma de Estados Unidos para consumo humano.

El DAM en estudio, presenta hierro y manganeso, de 8,7 y 1,9 mg/L respectivamente; lo que representa un aumento aguas abajo del drenaje, aumento de 1% para el Fe y 47% para el Mn. Se evidencia impacto ambiental por el aporte de estos metales a la Quebrada La Baja.

Aunque la influencia de la descarga de hierro del DAM en la Quebrada La Baja podría considerarse insignificante, es importante controlarla en el cierre porque podría generar posibles limitaciones en el uso de agua para consumo humano. En la Figura 24 se observa el no cumplimiento de la norma Colombiana actual, en la materia.

Figura 24. Concentraciones de hierro en el DAM y Quebrada La Baja, mayo de 2016.

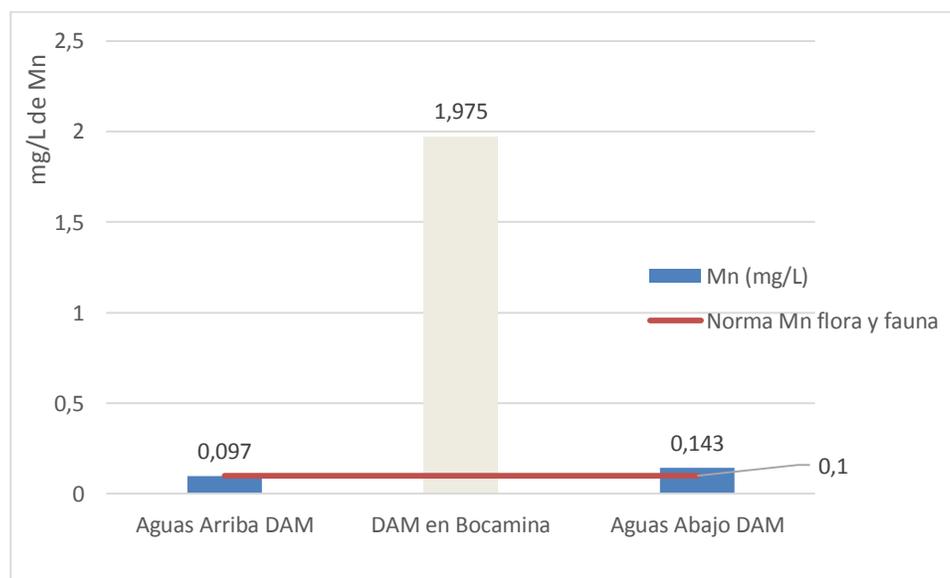


Fuente: El autor

El DAM del estudio tiene un aporte importante de manganeso; 1,9 mg/L. La EPA ha establecido que en exposición de por vida a 0,3 mg/L no causa efectos adversos (ATSDR, 2012)⁹⁰. La concentración en la Quebrada La Baja, aguas abajo, está en 0,143 mg/L, lo que no representa ningún riesgo para la salud humana. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este cuerpo de agua durante su recorrido por el distrito minero está recibiendo otros DAM, lo que crea incertidumbre acerca de su uso más adelante.

Por otra parte, desde el punto de vista de la destinación del recurso para la preservación de la flora y la fauna, el manganeso no podría superar la concentración de 0,1 mg/L y aguas abajo del DAM se encuentra en 0,14 mg/L; 43% sobre la norma, evidenciando un impacto ambiental al deterioro de la calidad del agua para su uso en el ecosistema.

Figura 25. Concentraciones de manganeso en el DAM y Quebrada La Baja, mayo de 2016

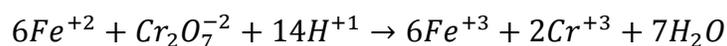


Fuente: El autor

⁹⁰ ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological Profile for Manganese. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public {En línea}. {Consultado junio 2016}. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/es/index.html>

En relación con el cromo hexavalente, se evidencia alto contenido aguas arriba de la Quebrada La Baja, posiblemente asociado a otros vertimientos mineros existentes. Aunque el DAM presenta concentración baja; 0,014 mg/L, esta puede ser perjudicial para la vida acuática, debido a que supera en un 10% la norma Colombiana (Decreto 1594 de 1984, artículo 45)⁹¹.

Respecto a las condiciones aguas abajo de esta descarga, la quebrada presenta disminución en su concentración de Cr⁺⁶. Esto se debe al pH, el cual, co-ayuda al desarrollo de una reacción de reducción del Cr⁺⁶ a Cr⁺³ en presencia de Fe (Rodríguez, M. et al., 2000)⁹², que en pH <7 se obtiene una la velocidad de remoción mayor. La reacción que ocurre en el proceso (Cenkin, 1985) es:



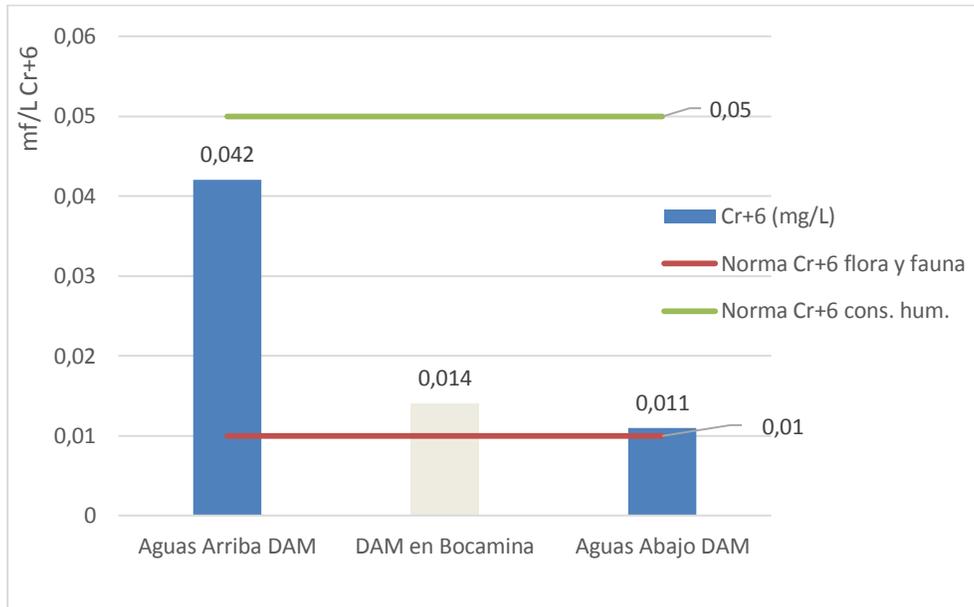
El cromo hexavalente es un metal con toxicidad alta y es considerado carcinógeno por la Agencia International para la Investigación del Cáncer; según la Secretaria Distrital de Salud de Bogotá, el valor permisible de exposición para la población es de 0,01mg/L. La Quebrada La Baja aguas abajo presenta 0,011mg/L valor por debajo de la norma de destinación del recurso para consumo humano; 0,05 mg/L.

En relación con el contenido de Cr⁺⁶ del DAM no se evidencia impacto a la salud humana, pero si puede afectar a la flora y fauna por su contenido de Cr⁺⁶ (ver Figura 26).

⁹¹ COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. Op. Cit.

⁹² COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. Op. Cit.

Figura 26. Concentraciones de cromo hexavalente en el DAM y Quebrada La Baja, mayo de 2016



Fuente: El autor

7.6. PROPUESTA DE CIERRE PARA EL DAM SELECCIONADO COMO ESTUDIO DE CASO

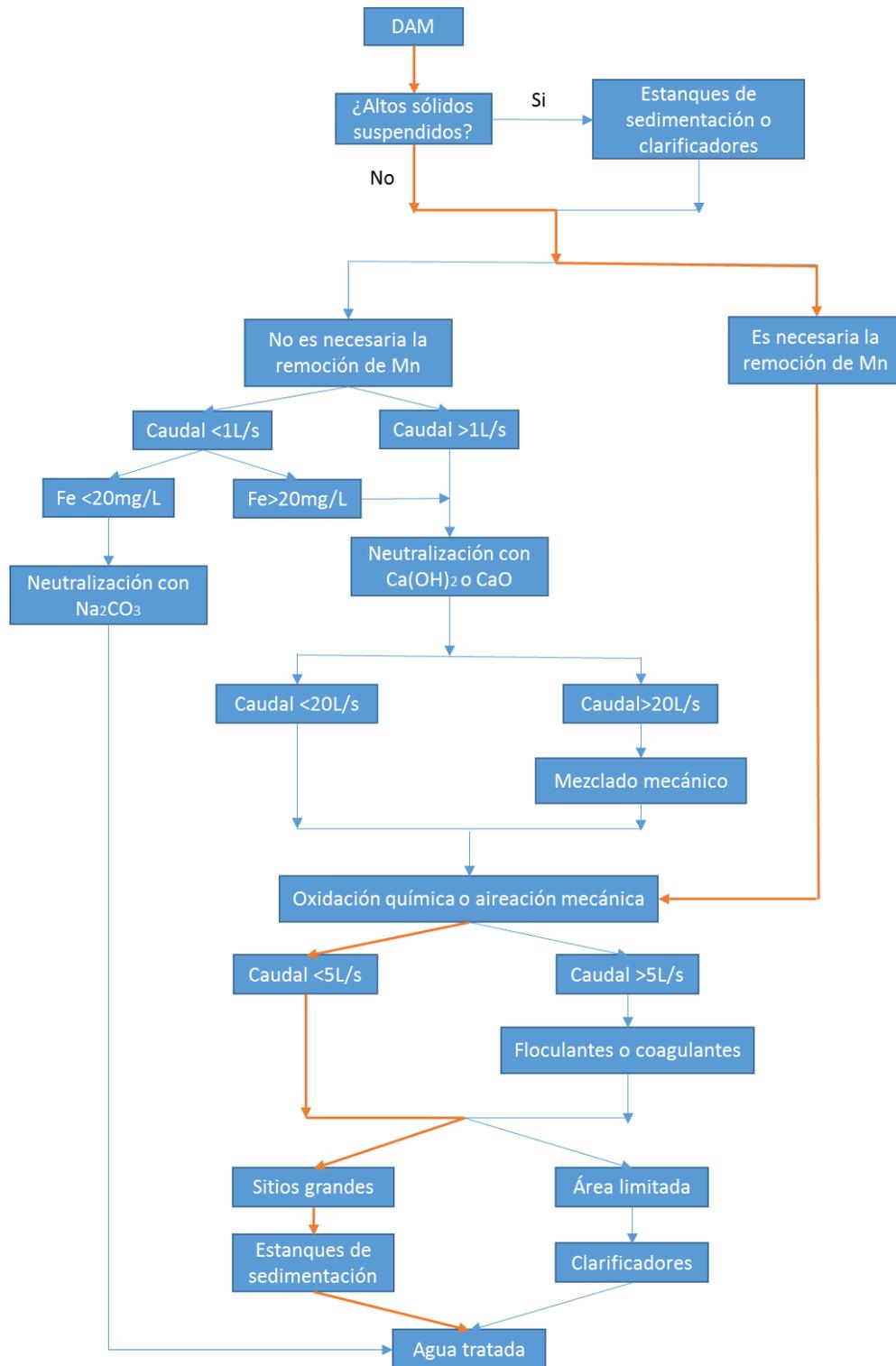
7.7.1. Objetivos del cierre del DAM seleccionado como estudio de caso. Los objetivos para el proceso de cierre del DAM son:

- Proteger el medio ambiente, principalmente el componente hídrico y edáfico mediante la gestión ambiental del DAM.
- Tratar de manera permanente, en el tiempo el DAM
- Conducir el DAM tratado hasta el cuerpo receptor o Quebrada La Baja.
- Disponer adecuadamente los residuos generados en el tratamiento del DAM. En lo posible recuperar los productos útiles y negociables (esto en caso de que se pueda recuperar metales).
- Proteger la salud humana, mediante la seguridad y estabilidad química del DAM.

7.7.2. Selección de sistema de tratamiento para el cierre del DAM del estudio de caso. Para la selección del sistema de tratamiento para el manejo del DAM, se empleó el árbol de decisión establecido por TRUMM (2010), tanto para el sistema de tratamiento activo, como para el sistema de tratamiento pasivo. Las decisiones se tomaron teniendo en cuenta los resultados de la caracterización del DAM, para finalmente elegir los posibles tratamientos (activos y pasivos).

7.7.2.1. Selección de sistema de tratamiento activo para el DAM en estudio. Se aplicó el diagrama de Trumm de acuerdo con las características particulares del drenaje. La Figura 27 muestra el diagrama que indica con el flujo color naranja, cada una de las decisiones tomadas para la selección del tratamiento activo para el cierre del drenaje.

Figura 27. Selección de tratamiento activo para el DAM en estudio



Fuente: El autor a partir de Trumm.

Las decisiones dentro el diagrama fueron las siguientes:

- Los sólidos suspendidos en el DAM están en 15 mg/L, considerados como bajos, debido a que se encuentran por debajo del límite máximo permisible establecido en la Resolución 631 de 2015 (artículo 10 aplicando para el sector minero aurífero); 50 mg/L. Se procede a revisar el siguiente criterio.
- El manganeso en el DAM está en 1,975 mg/l. Para Colombia este metal no es una sustancia de interés según el Decreto 1594 del 1984; y tampoco tiene límite máximo permisible en la Resolución 631 de 2015 (artículo 10 aplicando para el sector minero aurífero). Sin embargo, es importante disminuir la concentración en el efluente del DAM porque podría limitar el uso del recurso para la conservación de la fauna y flora (la concentración de la quebrada aguas abajo del DAM se encuentra en 0,14 mg/L y la norma está en 0,1 mg/L, es decir se encuentra 43% sobre la norma)⁹³. En consecuencia se toma la decisión de remover el Mn y se procede al siguiente paso.
- El caudal del DAM es 1 L/s y existe un área grande y plana colindante a la bocamina estudiada es de aproximadamente 200m² (ver Figura 28). Siendo el caudal menor a 5 L/s y no teniendo limitaciones de espacio, se toma la decisión de seleccionar como tratamiento activo: oxidación química o aireación mecánica y posteriormente la sedimentación en estanques.

Como este sistema es activo tendría requerimientos de insumos químicos para la oxidación química, de energía eléctrica en caso de que se realice aeración, y de limpieza permanente (purga de sedimentos) de los estanques de sedimentación. Además se requiere un área para tratar lodos. Estos posiblemente sean ricos en MP, podrían recuperarse siempre y cuando sea viable, y promover el reúso del agua, junto con el sostenimiento propio del sistema (operación en el tiempo).

⁹³ COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. Op. Cit.

Figura 28. Posible ubicación para el tratamiento del DAM en estudio

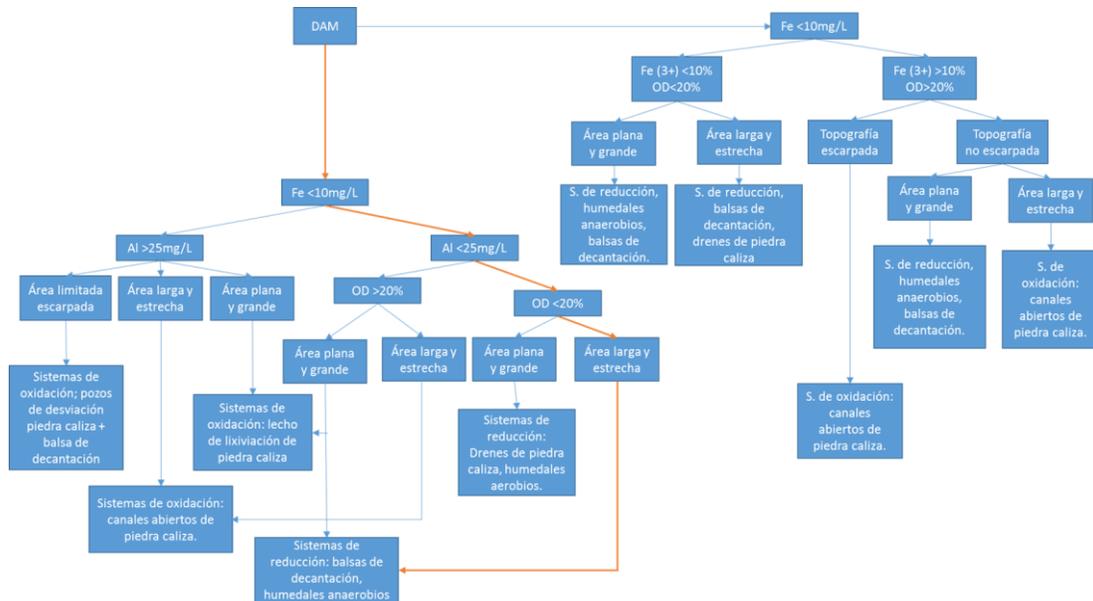


Fuente: Ubicado por el autor en Google Earth, 2016

7.7.2.2. Selección de sistema de tratamiento pasivo para el DAM en estudio.

La Figura 29 muestra en el diagrama de Trumm las decisiones tomadas resaltadas en naranja. Estas decisiones se tomaron con base en las características técnicas del DAM y la zona de estudio.

Figura 29. Selección de tratamiento pasivo para el DAM en estudio



Fuente: El autor a partir de Trumm.

El sustento de las decisiones tomadas es el siguiente:

- El hierro en el DAM es 8,7 mg/L siendo menor a criterio de Trumm de 10 mg/L, luego se procede a la siguiente característica.
- El aluminio en el DAM es menor a 0,005 mg/L concentración por debajo del criterio Trumm de 25 mg/L, por tanto se procede a revisar el criterio de oxígeno disuelto.
- El criterio de oxígeno disuelto esta expresado como porcentaje de saturación de oxígeno. El DAM tiene una saturación de oxígeno de 84%, valor mayor al 20%, este criterio lleva a dos posibilidades de tratamiento, una para cuando el área plana y grande, y el otra para cuando el área larga y estrecha.
- En el área disponible para la ubicación del tratamiento es una zona colindante al DAM, que corresponde a una forma rectangular, con ancho de 10 m y largo de 20m, por lo cual se decide que el lugar es largo y estrecho, y se selecciona la opción de tratamiento: sistemas de reducción (Ejemplos: humedales anaeróbico, basas de decantación, entre otros).

La tecnología seleccionada como propuesta de cierre del DAM en estudio es “Humedales anaeróbicos”, debido a que según investigaciones ha funcionado muy bien para el tratamiento de DAM. La investigación desarrollada por ROMERO y JIMENEZ (2012)⁹⁴, recomienda el uso de humedales como tratamiento de los DAM, usando como material vegetal para la biorremediación; *Lemna minor* o Lenteja de agua, por sus buenos resultados en la remoción de metales, además porque se encuentra de manera natural en la zona minera del municipio de California. Sin embargo, se debe garantizar que el efluente esté libre de estas plantas, para evitar procesos de eutrofización en la corriente.

Los humedales anaeróbicos tienen poca necesidad de mantenimiento y logran remociones de metales con buena eficiencia, al tener alto tiempo de retención del agua; para esto requieren de grandes extensiones de tierra. En el caso de estudio se cuenta con un área de aproximadamente 200m², extensión suficiente para el establecimiento del humedal.^{95,96,97,98,99}

Aduvire *et al.* (2002), establecen que el sustrato del humedal anaerobio es un aspecto fundamental para lograr buenos rendimientos y según la revisión efectuada por los autores, el sustrato con mejores remociones es paja/estiércol y compost, que ha obtenido entre 80% y 78% para el Fe, entre 7% y 20% para el Mn, al derredor de 54% para el Al y del 53% al 67% para la acidez. Así mismo, aseguran que el humedal anaerobio de flujo vertical (ver Figura 30) presenta mayor reactividad del afluente con el sustrato¹⁰⁰.

⁹⁴ MORENO, R. y JIMENEZ, J. Op. cit.

⁹⁵ SERNAGEOMIN. Op. Cit.

⁹⁶ INAP. Op. Cit.

⁹⁷ KIRBY, D.; Efectiv treatment options for acid Mine drainage in the coal region of west Virginia, Virginia, Paper 857, 2014, p. 1-47

⁹⁸ SCHRAUF, T.; SMITH, M.; Humedales de tratamiento de drenaje de mina, Lima, Perú. Revista Minería Nov, 2005, p. 1-5.

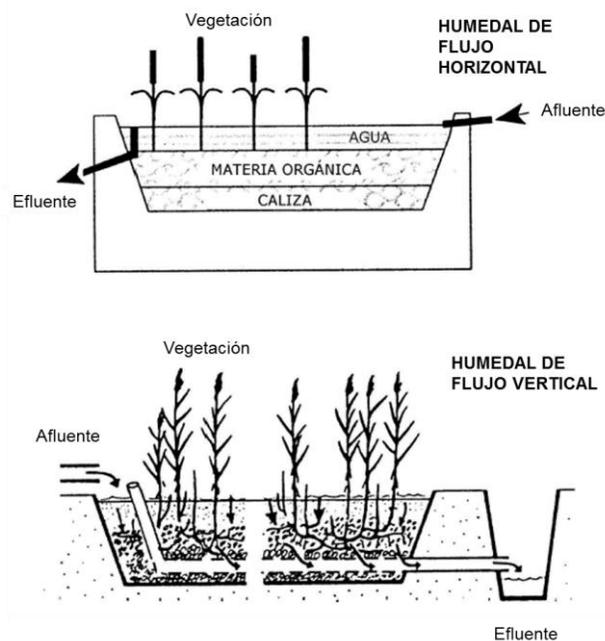
⁹⁹ SKOUSEN, J.; SEXSTONE, A.; ZIEMKIEWICZ, P.; Acid mine drainage control and treatment, 2000, p. 1-42

¹⁰⁰ ADUVIRE *et al.* Op. Cit.

Entre las limitantes de los humedales anaerobios están: 1) Reducción de rendimiento a bajas temperaturas, reduciéndose durante los meses más fríos. 2) Posible acumulación de metales en el material vegetal. En este sentido se debe determinar el contenido de MP, en caso de encontrar trazas y no poder realizar recuperación, se debe disponer como residuo peligro de acuerdo con la legislación nacional vigente (Decreto 1076 de 2015). Esto podría acarrear costos considerables.

El efluente del sistema de tratamiento propuesto “Humedales anaerobios” se debe conducir por tubería hasta la Quebrada La Baja, con el fin de evitar erosión hídrica y contaminación de suelos colindantes.

Figura 30. Tipo de Humedales Anaerobios aplicado a los DAM



Fuente: Aduvire et al. A partir de Brix (1993) y US EPA (2000)

8. CONCLUSIONES

Los impactos ambientales determinados sobre el componente edáfico a partir de la caracterización físico química del DAM y suelo colindante, son:

- Se evidencia acidificación en todas las muestras de suelo, lo cual favorece la acumulación de metales en el suelo.
- No es posible determinar si existe pérdida de la calidad del recurso suelo, debido a que no existen referentes del suelo previo a la minería y a la falta de normatividad nacional.
- La erosión evidenciada en la visita al sitio, está relacionada con falta de conducción del DAM, se está generando la erosión hídrica.
- El contenido promedio de metales en el suelo estudiado siguen la siguiente secuencia Fe>Al>Mn>Cu>As>Cr>Cd>Pb>Cr+6. Los metales Fe, Mn y Al, no poseen referentes normativos a nivel mundial, por lo que se desconoce su riesgo.
- Se evidencia acumulación de MP. Se superan las normas internacionales de límites permisibles en el recurso, en relación con: Cu (Estados Unidos y Canadá), As (Estados Unidos, Canadá y Perú), Cr+6 (Perú), Cd (Canadá y Perú) y Pb (Estados Unidos). Esto limita el uso futuro del recurso suelo, posterior a la minería, y genera riesgos hacia la salud humana y ecosistema por exposición a elementos tóxicos.

Los impactos ambientales determinados en el componente hídrico superficial a partir de la caracterización físico química del DAM y la Quebrada La Baja, son:

- Generación de drenaje moderadamente ácido, pero que no acidifica al cuerpo receptor (Quebrada La Baja).

- Disminución en 6,8% de la calidad del agua de la Quebrada La Baja, en términos del Índice de Calidad del Agua – ICA, principalmente por aportes de DQO y conductividad.
- Contaminación de la Quebrada La Baja con MP, especialmente Fe y Mn; 8,7 y 1,9 mg/L respectivamente. Aportando un aumento en la quebrada de 1% de Fe y 47% de Mn.
- El contenido representativo de Fe (8,764 mg/L) y Mn (1,975 mg/L) en el DAM, podría generar limitaciones para la destinación del recurso de La Quebrada La Baja, para los usos: consumo humano y preservación de la flora y fauna. El vertimiento del DAM no puede pasar de 2 mg/L de Fe (artículo 10 de la Resolución 635 de 2015). No existe norma para el Manganeseo.
- Disminución de la cantidad de agua limpia disponible para poblaciones actuales y futuras, por vertimiento de DAM sin tratamiento y sin estabilización química. Esto sugiere que el cierre del DAM sea fundamental para prevenir pasivos ambientales e impactos asociados a los mismos.

La caracterización físico química del recurso hídrico superficial receptor del DAM y suelo colindante al mismo, permite a partir de la comparación con referentes normativos nacionales e internacionales establecer la existencia de impactos ambientales asociados a este pasivo ambiental minero.

La aplicación del árbol de decisión de Trumm (2010) con las características propias del DAM estudiado, permite establecer varias alternativas para el tratamiento del drenaje, una activa y otra pasiva. De la alternativa activa se obtuvo específicamente para el DAM en estudio, un sistema de tratamiento compuesto por aireación mecánica y estacas de sedimentación. La alternativa pasiva obtenida corresponde a sistemas de reducción. La tecnología seleccionada para el cierre del DAM es el sistema pasivo: humedales anaeróbicos, debido a su bajo costo, buenas remociones de MP, bajos costos de operación y a que ha dado resultado en el manejo de drenajes según investigaciones previas.

9. RECOMENDACIONES

Considerar en futuros estudios de DAM para la evaluación de impactos ambientales y diseño de estrategias de cierre: 1) Impacto en las aguas subterráneas, 2) Muestrear en ambas temporadas climáticas (seca y húmeda), 3) Estudiar la acumulación de metales en estratos más profundos del suelo, 4) Correlacionar resultados con estudios geológicos, hidrológicos, climáticos, topográficos y geotécnicos.

La Quebrada La Baja es uno de los afluentes principales del Río Suratá. Este cuerpo de agua es una de las fuentes de abastecimiento del acueducto la ciudad de Bucaramanga. Teniendo en cuenta los niveles de Manganeseo y posiblemente otros metales pesados en la Quebrada La Baja, se recomienda la caracterización de todos los drenajes ácidos existentes en el municipio de California, así como la priorización de su cierre basado en el principio de estabilidad química.

Efectuar estudios toxicológicos asociados a los metales de mayor presencia en el agua y en el suelo, ya que su efecto es desconocido sobre todo en el caso de metales como hierro, manganeseo y aluminio.

Desarrollar investigaciones enfocadas a escalar la tecnología de humedales anaeróbicos para el cierre de DAM en el municipio de California. Así mismo, se considera importante el desarrollo de investigaciones de tecnologías emergentes de tipo biotecnológico, específicamente con el uso de microorganismos nativos.

Acompañar la propuesta de cierre con actividades de pos-cierre, que se enfoquen a establecer los mecanismos de seguimiento y monitoreo permanente, especialmente al componente edáfico e hídrico.

Se deben investigar alternativas para la descontaminación de los suelos aledaños al DAM, con el propósito de dar cierre al impacto relacionado con la acumulación de MP en el suelo y proyectar uso futuro para las áreas afectadas.

10. BIBLIOGRAFÍA

ADUVIRE, Osvaldo. Drenaje Ácido de Mina: Generación y Tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España, 2006, 136p.

ADUVIRE, O., Baretino, D. y López, E. Tratamientos Pasivos de Drenajes Ácidos de Mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero No. 113, 2002, p. 3-21. ISSN: 0366-0176.

ANDRADE, G., Rodríguez, M. y Wills, E. Dilemas Ambientales de la Gran Minería en Colombia. Revista Javeriana, Número 785, Tomo 148, 2012, p. 17-23.

ANZMEC, Australian and New Zealand Minerals and Energy Council, and MCA, Minerals Council of Australia. Strategic Framework for Mine Closure. ISR 2000/155, Commonwealth of Australia, Canberra, 2000, 32p. ISBN 0642721386.

ANZMEC, Australian and New Zealand Minerals. Leading practice sustainable development program for the mining industry, 2006, 73p. ISBN 064272475X

ARANGO, Marcela y Olaya, Yris. Problemáticas de los pasivos ambientales. Revista Gestión y Ambiente, 2012, vol. 15, No 3, p. 125-133. ISSN 2357-5905 [En línea]. [Consultado octubre 2015]. Disponible en: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/36286/43158>

ARANGO, Marcela. Requerimientos para el diseño de una metodología que permita estimar el valor de pasivos ambientales mineros. Tesis de grado para optar el título de Maestría en Medio ambiente y Desarrollo. Colombia, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2011.

ASGMI, Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericana. Pasivos Ambientales Mineros. En: Manual para el Inventario de Minas Abandonadas o Paralizadas. 2010. p 12.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological Profile for Manganese. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public [En línea]. [Consultado junio 2016]. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/es/index.html>

AZAPAGIC A. Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. *Journal of Cleaner Production* 2004; 12: 639–62.

CASTRO, H., MUNEVAR, Ó. Mejoramiento químico de suelos ácidos. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, Vol.16 No. 2, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, 2013, p. 409-416 {En línea}. {Consultado agosto 2016}. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v16n2/v16n2a15.pdf>

CCME, Canadian Council of Ministers of the Environment. *Canadian Water Quality Guidelines*, 2008, 1484p.

CENKIN, V.; BELAVTSEV, A.; Electrochemical treatment of industrial wastewater. *Effluent and water treatment Journal*. p. 244-247.

CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Buenas prácticas que favorezcan una minería sustentable: La problemática en torno a los pasivos ambientales mineros en Australia, el Canadá, Chile, Colombia, los Estados Unidos, México y el Perú. *Serie Macroeconomía del Desarrollo* N° 157. 2014, 52p. ISSN 1680-8843 [En línea]. [Consultado julio 2016]. Disponible en: <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/7/53967/BuenasPracticasMineriaSustentable.pdf>

CHAPARRO, Laura T. Drenajes Ácidos de mina: formación y manejo. Revista ESAICA, Vol.1 No.1, Universidad de Santander, 2015, p. 53-57. [En línea]. [Consultado junio 2016]. Disponible en: <http://revistas.udes.edu.co/site/index.php/esaica/article/download/272/pdf>.

CHILE. MINISTERIO DE MINERÍA. Ley 20551. (11, noviembre, 2011). Por la cual se regula el cierre de instalaciones mineras. [En línea]. [Consultado julio 2016]. Disponible en: <http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/cierrefaena/01.Ley20.551.pdf>

COLOMBIA. CONTRALORÍA GENERAL DE LA NACIÓN. Minería en Colombia: Fundamentos para superar el modelo extractivista. 2013, 209p. [En línea]. [Consultado septiembre 2015]. Disponible en: <http://www.colombiapuntomedio.com/Portals/0/Archivos2013/Miner%C3%ADa.pdf>

COLOMBIA. EL CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 1658. (15, julio, 2013). Por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones. {En línea}. {Consultado agosto 2016}. Disponible en: <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/2013/LEY%201658%20DEL%2015%20DE%20JULIO%20DE%202013.pdf>

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Asuntos ambientales y Sectorial y Urbana - Artículos [En línea]. [Consultado septiembre 2015]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=548:planta-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-44#documentos>

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 1076. (26, mayo, 2015). Por el cual se expide el Decreto Único

Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2015. No. 49.523. [En línea]. [Consultado agosto 2015]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/4e-DECRETO%201076%20DE%202015%20MINAMBIENTE%20EXPIDE%20DECRETOS%20%20C3%9ANICO%20REGLAM.%20SECTOR%20AMBIENTE%20Y%20DESARROLLO%20SOSTENIBLE.pdf>

COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD y TERRITORIO. Resolución No. 1287. (10, julio, 2014). Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. [En línea]. [Consultado mayo 2016]. Disponible en: <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/JULIO/10/DECRETO%201287%20DEL%2010%20DE%20JULIO%20DE%202014.pdf>

COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. Decreto 1594. (26, junio, 1984). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 1984. No. 36.700. [En línea]. [Consultado mayo 2016]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18617>

COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS, ICONTEC. Norma Técnica Colombiana No. 3656. Gestión Ambiental. Suelo. Toma de muestras de suelo para determinar contaminación, 1994, p.7.

COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Aguas Subterráneas, 2002, p. 83. [En línea]. {Consultado febrero 2016}. Disponible en: [http://oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-](http://oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-102)

files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/guia_para_monitoreo_de_vertimientos.pdf

COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA, IDEAM. Hoja Metodológica del Indicador de Calidad del Agua (Versión 1). Sistemas de Indicadores Ambientales de Colombia – Indicadores de Calidad del agua superficial, 2011, 10p. [En línea]. [Consultado diciembre 2015]. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/36-3.21_HM_Indice_calidad_agua_3_FI.pdf/9d28de9c-8b53-470e-82ab-daca2d0b0031

COLOMBIA. UPME, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Producción Más Limpia en la Minería del Oro en Colombia, 2007, 64p. ISBN: 9789589813874. [En línea]. [Consultado julio 2016]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Docs/Mineria_limpia.pdf

CUBEROS, E.; RODRIGUEZ, A.; PRIETO, E.; Niveles de cromo y alteraciones de salud en una población expuesta a las actividades de curtiembres en Bogotá, Colombia. Colombia, 2009. p. 278-289.

DOMAGALA J, Wilson I. Mining disturbance. Queensland State of the Environment Report 2007:119–123.

DUDKA S., Domy A., Environmental Impacts of Metal Ore Mining: Review. J. Environ Qual, Vol. 26, 1997, p. 590-602.

ELAW, Alianza Mundial de Derecho Ambiental. Guía para evaluar Estudios de Impacto Ambiental de proyectos mineros. Primera edición, 2011. [En línea]. [Consultado noviembre 2015]. Disponible en: <http://www.elaw.org/files/mining-eia->

guidebook/Guia%20%20para%20Evaluar%20EIAs%20de%20Proyectos%20Mineros.pdf

ENVIRONMENT AUSTRALIA. Best Practice Environmental Management in Mining – Mine Decommissioning. Commonwealth of Australia, Canberra. 2002 ISBN 0642194181.

GALÁN y ROMERO. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química. Universidad de Sevilla. Revista de la sociedad española de mineralogía, Macla Nº 10, 2008, p.48-60.

GARCÍA, Y., RAMÍREZ, W., SÁNCHEZ, S. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. Revista Pastos y Forrajes, Vol. 35, No. 2, 2012, p. 125-138. {En línea}. {Consultado noviembre 2015}. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001

GÜIZA, L. La pequeña minería en Colombia: una actividad no tan pequeña. Dyna No. 181, 2013, p. 109-117. ISSN 00127353.

HARLEY Lacy. Closure and rehabilitation tailings storage facilities. Developments in Mineral Processing, 2005 Mike D. Adams (Editor); Vol. 15; 233-250. Health Service, 2012.

HILSON G, Murck B. Sustainable development in the mining industry: clarifying the corporate perspective 2000; 26: 227–38.

HILSON G. Defining “cleaner production” and “pollution prevention” in the mining context. Minerals Engineering 2003; 16:305–21.

HOROWITZ, L. Editorial Section 2: mining and sustainable development. *Journal of Cleaner Production* 2006; 14: 307–308.

IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. *Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Aguas Subterráneas*, 2002, 83p. [En línea]. [Consultado diciembre 2015]. Disponible en: <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/con-la-comunidad//gui-a-para-el-monitoreo-de-vertimientos-aguas-superficiales-y-aguas-subterraneas>

INAP, International Network for Acid Prevention. *Global Acid Rock Drainage Guide*, 2014, 473p. [En línea]. [Consultado julio 2016]. Disponible en: http://www.gardguide.com/index.php?title=Main_Page

JARAMILLO, Daniel. *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad De Ciencias Medellín, 2002, 619p. [En línea]. [Consultado junio 2016]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/2242/1/70060838.2002.pdf>

JENNINGS, S.R., Neuman, D.R. and Blicher, P.S. (2008). *Acid Mine Drainage and Effects on Fish Health and Ecology: A Review*. Reclamation Research Group Publication, Bozeman, MT, 2008, 26p.

JIAO, W., Ouyang, W., Hao, F., Huang, H., Shan, Y., and Geng, X. Combine the soil water assessment tool (SWAT) with sediment geochemistry to evaluate diffuse heavy metal loadings at watershed scale. *Environmental Science and Pollution Research*, Volume 21, Issue 9, 2014, p. 5960-5971

JIMÉNEZ, A. y LEÓN, S. *Modelo Matemático para evaluar el impacto de los pasivos ambientales en la mina La Bodega en California, Santander*. Tesis de grado para optar por el título de ingeniero químico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2014, p. 1-103.

KIRBY, D.; Efectiv treatment options for acid Mine drainage in the coal región of west Virginia, Virginia, Paper 857, 2014, p. 1-47

LECHUGA, Jorge; Rodríguez, Marisela y Lloveras, Joaquim. Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 11-3, 2007, p. 5-14, ISSN: 1665-529X.

LENA, A., Elin, A., Seth, M. Neutralization/prevention of acid rock drainage using mixtures of alkaline by-products and sulfidic mine wastes. Environ Sci Pollut Res 20:7907–7916, 2013, p. 7907-7916. DOI: 10.1007/s11356-013-1838-z

MARS, Enriquez. Drummond J. Social-environmental certification: sustainable development and competitiveness in the mineral industry of the Brazilian Amazon. Natural Resources Forum 2007; 31:71–86.

MILGROM T. Environmental aspects of rehabilitating abandoned quarries: Israel as a case study. Landscape and Urban Planning 2008; 87:172–9.

MINAMBIENTE, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Definición de Herramientas de Gestión de Pasivos Ambientales. 2000, p. 54-57

MINAMBIENTE, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Metodología General para la Presentación de Estudios Ambientales. 2010, 72p. [En línea]. [Consultado septiembre 2015]. Disponible en: http://www.anla.gov.co/documentos/normativa/metodologia_presentacion_ea.pdf

MONTEAGUDO, Fabricio. Evaluación de la Contaminación por Mercurio en Población de Mineros Artesanales de Oro de la Comunidad de Santa filomena – Ayacucho - Perú durante el periodo agosto 2000 – septiembre 2001. Tesis para

optar el título profesional de Químico Farmacéutico. Perú, Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Farmacia y Bioquímica, 2002. p. 7-9

MORENO, R. y JIMENEZ, J. Mejoramiento del actual tratamiento activo y propuesta de un método pasivo para el manejo de drenajes ácidos en el distrito minero auroargentífero Vetas – California (Santander). Monografía Especialización en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. 2012, 77p.

MUDD GM. Global trends in gold mining: towards quantifying environmental and resource sustainability Resources Policy 2007; 32: 42–56.

OLÍAS, M., et al. Geología de Huelva: lugares de interés geológico. 2ª ed. Huelva: Universidad de Huelva, 2008, 204p. ISBN: 978-84-92679-19-5

OMS, Organización Mundial de la Salud. El Derecho al Agua. Folleto Informativo No. 35, 2003, 64p.

PEREZ, José. Manejo del Ambiente y Riesgos Ambientales. En: Capítulo IV: Riesgos Ambientales, 2006, p. 112-113.

PERÚ. PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. DECRETO SUPREMO N° 002. (25, marzo, 2013). Por la cual se aprueban estándares de calidad ambiental para suelo. [En línea]. [Consultado mayo 2016]. Disponible en: http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_002-2013-minam-fe-erratas.pdf

PERÚ. PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. DECRETO SUPREMO N° 015. (19, diciembre, 2015). Por la cual se modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación. [En línea]. [Consultado mayo 2016]. Disponible en:

<http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/12/Decreto-Supremo-N%C2%B0-015-2015-MINAM.pdf>

PERÚ. PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. LEY N° 28271. (2, julio, 2004). Por la cual se regula los pasivos ambientales de la actividad minera. [En línea]. [Consultado mayo 2016]. Disponible en: http://www.fonamperu.org/general/pasivos/documentos/ley_pam.pdf

RAMIREZ, M. A., Navarro, M.A. Análisis de metales pesados en suelos irrigados con agua del río Guatiquía. Revista Ciencia en Desarrollo, Vol. 6 No. 2, 2015, p. 167-175. ISSN 0121-7488.

RODRIGUEZ, M.; MARTÍNEZ, S.; TELLO, L.; Efecto de la cantidad de cromo hexavalente y el pH en la remoción de Cr⁺⁶ en un reactor electroquímico de electrodos rotatorios. México, p. 1-5

RUEDA, Germán, Rodríguez, Jenny y Madriñan Raúl. Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: Perspectivas para Colombia. 2011

SANDOW, M. Remediation of Acid Mine Waters. Mine Water – Managing the Challenges. International Mine Water Association, 2011, p.253-258. ISSN 16161068 [En línea]. [consultado abril 2016]. Disponible en: https://www.imwa.info/docs/imwa_2011/IMWA2011_Ali_338.pdf

SERNAGEOMIN, Servicio Nacional de Geología y Minería. Ministerio de Minería de Chile. Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras, 2015, 248p. [En línea]. [Consultado abril 2016]. Disponible en: <http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/cierrefaena/GuiaMetodologicaQuimica.pdf>

SCHRAUF, T.; SMITH, M.; Humedales de tratamiento de drenaje de mina, Lima, Perú. Revista Minería Nov, 2005, p. 1-5.

SKOUSEN, J.; SEXSTONE, A.; ZIEMKIEWICZ, P.; Acid mine drainage control and treatment, 2000, p. 1-42

STANISLAW, Dudka and Domy C. Adriano. Environmental Impacts of Metal Ore Mining and Processing: A Review, J. ENVIRON. QUAL., VOL. 26, 1997, p. 590-602.

SZWEDZICKI, Tad. Program for Mine Clousure. En: Mineral Resources Engineering, 2001, vol. 10, No 3, p. 347-364

TORRES, Patricia, Cruz, Camilo H. y Patiño, Paola. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín, No. 15 especial, vol. 8, 2009, p. 79-94. ISSN 1692-3324.

TRUMM, D. Selection of active and passive treatment systems for AMD—flow charts for New Zealand conditions, New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 53:2-3, 2010, p. 195-210, ISSN: 0028-8306.

USEPA, United States Environmental Protection. National recommended water quality criteria. Section 304(a) of the Clean Water, 2013. [En línea]. [Consultado mayo 2016]. Disponible en: <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria>

USDA, United States Natural Resources Conservation Service. Soil Survey Division Staff. Soil Survey Manual. Handbook No. 18. USDA. Washington D. C., 1993, 437p.

WORRALL A., David Neil B., David Brereton C., David Mulligan. Towards a sustainability criteria and indicators framework for legacy mine. *Journal of Cleaner Production* 2009; 17: 1426-1434.

YUPARI, A. Informe "Pasivos Ambientales Mineros En Sudamérica". Informe elaborado para la CEPAL, el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales, BGR, y el Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN, 2009, p. 1-23. [En línea]. [Consultado mayo 2016]. Disponible en: <http://bibliotecavirtual.minam.gob.pe/biam/bitstream/handle/minam/1685/BIV01456.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ANEXO

Anexo A. Resultado de laboratorio: monitoreo de aguas y suelos

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 1 de 8	



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1111 de 2015, en los parámetros pH, DBO₅, DQO, SST, fósforo, SAAM, grasas y aceites en aguas, metales totales y disueltos en aguas, metales totales en suelos y toma de muestras puntuales y compuestas"



"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"

Informe de resultados No.	I-16-181-1	Fecha de emisión:	Mayo 17 de 2016
Cliente:	YUSARA CONTRERAS		
Dirección del cliente:	Carrera 27 A No. 48-16		
Solicitud de servicio No.	16-154	No. de muestras:	07
Fecha de recepción de las muestras:	Mayo 03 de 2016		
Muestras recibidas por:	Amparo López		
Fecha de análisis:	Mayo 03 de 2016 – Mayo 17 de 2016		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-154-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	DRENAJE ACIDO DE MINA		
Matriz de la muestra:	Agua Cruda		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	California / Boca Mina		
Fecha del muestreo:	Mayo 03 de 2016		

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
pH (Unidades de pH)	6,93	Potenciométrico / SM 4500-H ⁺ B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	34,5	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)	15	Gravimétrico/ SM 2540 D
Nitrógeno Total (mg N/L)	16,66	Titrimétrico –Kjeldahl / SM 4500 N _T
Fósforo Total (mg P/L)	0,8	Espectrofotométrico / SM 4500 P
Arsénico (µg As/ L)	<0,55	Absorción Atómica-Generación Hidruros/ SM 3114C
Cadmio (mg Cd/L)	<0,0011	Absorción Atómica / SM 3111B
Cromo Hexavalente(mg Cr ⁶⁺ /L)	0,014	Espectrofotométrico/ SM 3500-Cr ⁶⁺
Cromo Total (mg Cr/L)	<0,0045	Absorción Atómica / SM 3111 B
Hierro Total (mg Fe/L)	8,784	Espectrofotométrico / SM 3500-B
Plomo (mg Pb /L)	<0,0068	Absorción Atómica / SM 3111B
Azufre (mg S/L)	25,18	Espectrofotométrico/SM 4500-SO ₄ ⁻²
Cobre (mg Cu/L)	<0,0021	Absorción Atómica / SM 3111B
Conductividad (µS/cm)	354	Conductivimétrico / SM 2510 B
Acidez (mg/L)	97,96	Titrimétrico/ SM 2310 B
Saturación de Oxígeno (%)	84,1	Sonda Luminescente Infrarroja
Manganeso (mg Mn/L)	1,975	Absorción Atómica / SM 3030 E, SM 3111B B
Aluminio (mg Al/L)	<0,005	Absorción Atómica SM 3111 B

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2463-1469-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com; labquimco@uis.edu.co
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 2 de 8	

Informe de resultados No. I-16-181 Solicitud de servicio No. 16-154

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-154-02	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: AGUAS ARRIBA – DAM QUEBRADA LA BAJA	
Matriz de la muestra: Agua Cruda	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: California / Vereda La Baja	
Fecha del muestreo: Mayo 03 de 2016	

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
pH (Unidades de pH)	7,47	Potenciométrico / SM 4500-H ⁺ B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	47,04	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L).	44	Gravimétrico/ SM 2540 D
Nitrógeno Total	15,27	Titrimétrico –Kjeldahl / SM 4500 N _T
Fósforo Total (mg P/L)	0,3	Espectrofotométrico / SM 4500 P
Arsénico (µg As/ L)	<0,55	Absorción Atómica-Generación Hidruros/ SM 3114C
Cadmio (mg Cd/L).	<0,0011	Absorción Atómica / SM 3111B
Cromo Hexavalente(mg Cr ⁺⁶ /L)	0,042	Espectrofotométrico/ SM 3500-Cr ⁺⁶
Cromo Total (mg Cr/L)	<0,0045	Absorción Atómica / SM 3111 B
Hierro Total (mg Fe/L)	2,265	Espectrofotométrico / SM 3500-B
Plomo (mg Pb /L)	<0,0068	Absorción Atómica / SM 3111B
Azufre (mg S/L)	14,06	Espectrofotométrico/SM 4500-SO ₄ ⁻²
Cobre (mg Cu/L)	<0,0021	Absorción Atómica / SM 3111B
Conductividad (µS/cm)	160,3	Conductivimétrico / SM 2510 B
Acidez (mg/L)	53,87	Titrimétrico/ SM 2310 B
Saturación de Oxígeno (%)	79,8	Sonda Luminiscente Infrarroja
Manganeso (mg Mn/L)	0,097	Absorción Atómica / SM 3030 E, SM 3111 B
Aluminio (mg Al/L)	<0,005	Absorción Atómica SM 3111 B

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222

Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2463-1469-2465. Telefax: (7) 6349009

Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com; labquimco@uis.edu.co

Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 3 de 8	

Informe de resultados No. I-16-181

Solicitud de servicio No. 16-154

3. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-154-03	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	AGUAS ABAJO – DAM QUEBRADA LA BAJA		
Matriz de la muestra:	Agua Cruda		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	California / Vereda La Baja		
Fecha del muestreo:	Mayo 03 de 2016		

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
pH (Unidades de pH)	7,49	Potenciométrico / SM 4500-H*B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	70,56	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L),	49	Gravimétrico/ SM 2540 D
Nitrógeno Total	13,88	Titrimétrico –Kjeldahl / SM 4500 N _T
Fósforo Total (mg P/L)	0,5	Espectrofotométrico / SM 4500 P
Arsénico (µg As/ L)	<0,55	Absorción Atómica-Generación Hidruros/ SM 3114C
Cadmio (mg Cd/L)	<0,0011	Absorción Atómica / SM 3111B
Cromo Hexavalente(mg Cr ⁶⁺ /L)	0,011	Espectrofotométrico/ SM 3500-Cr ⁶⁺
Cromo Total (mg Cr/L)	<0,0045	Absorción Atómica / SM 3111 B
Hierro Total (mg Fe/L)	2,298	Espectrofotométrico / SM 3500-B
Plomo (mg Pb /L)	<0,0068	Absorción Atómica / SM 3111B
Azufre (mg S/L)	13,68	Espectrofotométrico/SM 4500-SO ₄ ²⁻
Cobre (mg Cu/L)	<0,0021	Absorción Atómica / SM 3111B
Conductividad (µS/cm)	159,7	Conductivimétrico / SM 2510 B
Acidez (mg/L)	48,98	Titrimétrico/ SM 2310 B
Saturación de Oxígeno (%)	72,3	Sonda Luminiscente Infrarroja
Manganeso (mg Mn/L)	0,143	Absorción Atómica / SM 3030 E, SM 3111 B
Aluminio (mg Al/L)	<0,005	Absorción Atómica SM 3111 B

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222

Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2463-1469-2465. Telefax: (7) 6349009

Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com; labquimco@uis.edu.co

Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 4 de 8	

Informe de resultados No. I-16-181 Solicitud de servicio No. 16-154

4. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-154-04	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	P1 SUELO A 22,1m de la BOCA MINA		
Matriz de la muestra:	Suelo		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	California / 22,1m de la BOCA MINA		
Fecha del muestreo:	Mayo 03 de 2016		

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
pH (Unidades de pH)	5,72	Potenciométrico / SM 4500-H ⁺ B
Conductividad (µS/cm)	137,3	Conductivimétrico/ SM 2510 B
Arsénico (mg As/ kg)	122,59	Absorción Atómica-Generación Hidruros/ SM 3114C
Cadmio (mg Cd/kg)	30,46	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Cromo Hexavalente(mg Cr ⁶⁺ /Kg)	2,083	Espectrofotométrico / EPA 3050 B y SM 3500 – Cr ⁶⁺ B
Cromo Total (mg Cr/kg)	<24	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Hierro (% Fe)	6,40	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Plomo (mg Pb/kg)	8,93	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Cobre (mg Cu/kg)	1740,58	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Azufre (%S)	0,21	Espectrofotométrico/EPA 1311, SM 4500- SO ₄ ⁻²
Acidez (mg/kg)	2,37	Titrimétrico / EPA 1311, SM 2310 B
Manganeso (mg Mn/L)	382,94	Absorción Atómica / SM 3030 E, SM 3111 B
Aluminio (% Al)	0,42	Absorción Atómica/ EPA 3050 B

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 5 de 8	

Informe de resultados No. I-16-181

Solicitud de servicio No. 16-154

5. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-154-05	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	P2 SUELO A 29,6m de la BOCA MINA		
Matriz de la muestra:	Suelo		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	California / 29,6m de la BOCA MINA		
Fecha del muestreo:	Mayo 03 de 2016		

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
pH (Unidades de pH)	4,29	Potenciométrico / SM 4500-H*B
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	154,5	Conductivimétrico/ SM 2510 B
Arsénico (mg As/ kg)	46,20	Absorción Atómica-Generación Hidruros/SM 3114C
Cadmio (mg Cd/kg)	5,38	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Cromo Hexavalente(mg Cr ⁶⁺ /Kg)	0,390	Espectrofotométrico / SM 3500 – Cr ⁶⁺ B
Cromo Total (mg Cr/kg)	<24	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Hierro (% Fe)	4,52	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Plomo (mg Pb/kg)	14,94	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Cobre (mg Cu/kg)	307,94	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Azufre (%S)	0,11	Espectrofotométrico/EPA 1311, SM 4500-SO ₄ ⁻²
Acidez (mg/kg)	3,67	Titrimétrico / EPA 1311, SM 2310 B
Manganeso (mg Mn/L)	376,46	Absorción Atómica / SM 3030 E, SM 3111 B
Aluminio (% Al)	1,15	Absorción Atómica/ EPA 3050 B

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222

Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2463-1469-2465. Telefax: (7) 6349009

Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com; labquimco@uis.edu.co

Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 6 de 8	

Informe de resultados No. I-16-181

Solicitud de servicio No. 16-154

6. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-154-06	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	P3 SUELO A 48,7m de la BOCA MINA		
Matriz de la muestra:	Suelo		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	California / 48,7m de la BOCA MINA		
Fecha del muestreo:	Mayo 03 de 2016		

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
pH (Unidades de pH)	5,78	Potenciométrico / SM 4500-H*B
Conductividad (µS/cm)	208,1	Conductivimétrico/ SM 2510 B
Arsénico (mg As/ kg)	69,57	Absorción Atómica-Generación Hidruros/ SM 3114C
Cadmio (mg Cd/kg)	20,43	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Cromo Hexavalente(mg Cr ⁺⁶ /Kg)	0,975	Espectrofotométrico / SM 3500 – Cr ⁺⁶ B
Cromo Total (mg Cr/kg)	<24	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Hierro (% Fe)	3,75	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Plomo (mg Pb/kg)	11,90	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Cobre (mg Cu/kg)	173,64	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Azufre (%S)	0,12	Espectrofotométrico/EPA 1311, SM 4500-SO ₄ ⁻²
Acidez (mg/kg)	1,98	Titrimétrico / EPA 1311, SM 2310 B
Manganeso (mg Mn/L)	614,34	Absorción Atómica / SM 3030 E, SM 3111 B
Aluminio (%Al)	0,51	Absorción Atómica/ EPA 3050 B

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222

Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2463-1469-2465. Telefax: (7) 6349009

Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com; labquimco@uis.edu.co

Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 7 de 8	

Informe de resultados No. I-16-181 Solicitud de servicio No. 16-154

7. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-154-07	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: P4 SUELO A 98 m de la BOCA MINA"	
Matriz de la muestra: Suelo	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: California / Blanco	
Fecha del muestreo: Mayo 03 de 2016	

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
pH (Unidades de pH)	4,28	Potenciométrico / SM 4500-H*B
Conductividad (µS/cm)	127,8	Conductivimétrico/ SM 2510 B
Arsénico (mg As/ kg)	59,12	Absorción Atómica-Generación Hidruros/SM 3114C
Cadmio (mg Cd/kg)	<3,73	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Cromo Hexavalente(mg Cr ⁶⁺ /Kg)	1,487	Espectrofotométrico / SM 3500 – Cr ⁶⁺ B
Cromo Total (mg Cr/kg)	<24	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Hierro (% Fe)	4,29	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Plomo (mg Pb/kg)	15,86	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Cobre (mg Cu/kg)	483,70	Absorción Atómica/EPA 3050 B, SM 3111 B
Azufre (% S)	0,003	Espectrofotométrico/EPA 1311, SM 4500-SO ₄ ²⁻
Acidez (mg/kg)	1,19	Titrimétrico / EPA 1311, SM 2310 B
Manganeso (mg Mn/L)	2569,73	Absorción Atómica / SM 3030 E, SM 3111 B
Aluminio (%Al)	1,42	Absorción Atómica/ EPA 3050 B

Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 8 de 8	

Informe de resultados No. I-16-181

Solicitud de servicio No. 16-154

Revisó y aprobó:



Luz Yolanda Vargas Fiallo
Directora del Laboratorio
Química. M.Sc Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López G