

**SELECCIÓN DE TÉCNICAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
CON CONTENIDO ELEVADO DE METALES PESADOS, ENFOCADO A LA
SOSTENIBILIDAD EN LA INDUSTRIA MINERA COLOMBIANA**

MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ SALAZAR

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
2021**

**SELECCIÓN DE TÉCNICAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
CON CONTENIDO ELEVADO DE METALES PESADOS, ENFOCADO A LA
SOSTENIBILIDAD EN LA INDUSTRIA MINERA COLOMBIANA**

MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ SALAZAR

**Proyecto Integral de Grado para optar al título de
Especialista en Gestión Ambiental**

**Director
JUAN ANDRÉS SANDOVAL HERRERA
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
2021**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Director de la Especialización

Firma del Calificador

Bogotá D.C., Febrero de 2021

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. María Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Especialización en Gestión Ambiental

Ing. Nubia Liliana Becerra Echeverría

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables de los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	12
OBJETIVOS.....	13
Objetivo General	13
Objetivos Específicos	13
1. ASPECTOS GENERALES CONTAMINACION DE METALES PESADOS.....	14
2. TECNICAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL	20
2.1. Técnicas convencionales	20
2.1.1 Filtración por Membrana:	20
2.1.2. Electrodialisis:	21
2.1.3. Ósmosis Inversa:	21
2.1.4 Nanofiltración:	22
2.1.5. Ultrafiltración:	22
2.1.6. Intercambio Iónico:.....	23
2.1.7. Adsorción (Convencional).....	23
2.1.8. Carbón Activado	24
2.1.9 Nanotubos de carbono.....	25
2.1.10. Precipitación química.....	25
2.1.11. Electrocoagulación.....	26
2.1.12. Coagulación-Floculación.....	26
2.1.12. Electrofloculación	27
2.1.13. Flotación	27
2.1.14. Fotocatálisis en la degradación de metales pesados.....	27

2.2. Técnicas No Convencionales	28
2.2.1. Adsorbentes de Bajo Costo y Nuevos Adsorbentes	28
2.2.2. Adsorción de metales pesados por materiales naturales agrícolas e industriales.....	29
2.2.3. Fitorremediación.	29
2.2.4. Biopolímeros	30
2.2.5. Hidrogeles.....	30
2.3.6. Ceniza Volante:.....	31
3. PRINCIPIOS DE SOSTENIBILIDAD	32
3.1. Sustentabilidad.....	32
3.2. Economía circular.....	33
3.3. Producción más limpia	33
3.4. Criterios ambientales.....	33
3.4.1. Generación de subproductos tóxicos	34
3.4.2. Manejo de residuos.....	34
3.4.3. Reutilización de materias primas	34
3.4.4. Generación de olores ofensivos.....	34
3.5. Criterios administrativos	35
3.5.1. Habilidad de los operarios.....	35
3.5.2. Experiencia en la industria minera	35
3.6. Criterios técnicos.....	36
3.6.1. Madurez de tecnología	36
3.6.2. Tiempos de operación y caudales que se manejan	36
3.6.3 Necesidades de reactivos	36
3.6.4. Eficiencia de remoción.....	36

3.7. Criterios económicos.....	37
3.7.1. Costo de equipos.....	37
3.7.2. Mantenimiento y operación.....	37
3.7.3. Área necesaria.....	37
4. MATRICES COMPARATIVAS	39
4.1. Ejercicio de política	39
4.2. Análisis costo-beneficio.....	39
4.3. Análisis costo – efectividad	39
4.4. Análisis multicriterio.....	40
4.5. Herramienta para la evaluación y gestión ambiental (TEAM).....	40
4.6. Matriz de decisión para la adaptación (ADM).....	40
4.7. Screening de opciones de adaptación	40
4.8. Estimación de riesgos relacionados con el clima como indicadores de la necesidad de las respuestas de adaptación.....	41
4.9. Costeo de impactos del cambio climático.....	41
4.10. Identificación de opciones de adaptación.....	41
4.11. Herramienta de evaluación del riesgo comunitario - Adaptación y medios de vida.....	41
Tabla 3. <i>Matriz de selección</i>	49
Tabla 4. <i>Matriz de selección</i>	50
5. CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFIA	53
ANEXOS	59

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. <i>Representación sustentabilidad con ODS</i>	32
Figura 2. Resultados para criterios obtenidos en la encuesta aplicada	42
Figura 3. Resultados para subcriterios ambientales en la encuesta aplicada.....	43
Figura 4. Resultados para subcriterios administrativos en la encuesta aplicada	44
Figura 5. Resultados para subcriterios económicos en la encuesta aplicada	44
Figura 6. Resultados para subcriterios técnicos en la encuesta aplicada	45
Figura 7. Diagrama de torta importancia de los subcriterios	46

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Metales generados en distintos tipos de industria.....	19
Tabla 2. Relación característica-ponderación basada en Subcriterios	46
Tabla 3. Matriz de selección (parte 1)	48
Tabla 4. Matriz de selección (parte 2)	49

INTRODUCCIÓN

Los metales pesados son elementos cuyas propiedades químicas son potencialmente peligrosas tanto para la salud humana como para los ecosistemas y la industria minera es una de las que aporta en gran medida a la producción de este tipo de metales, por lo cual se hace imperante buscar alternativas que no solo reduzcan la cantidad de concentración de estos que es entregada al medio ambiente sino que además posean una mayor eficiencia, lo cual se logra a través de plantas de tratamiento las cuales tienen como función eliminar mediante procesos no solo físicos sino químicos que se encuentran en el agua después de ser usada en este caso puntual en actividades mineras para lograr reducir la cantidad de metales pesados que son entregados a las fuentes hídricas en el retorno del agua de servicio a su cauce natural y de este modo evitar tanto como sea posible que se evite el proceso de bioacumulación de los metales pesados.

Esto especialmente se debe realizar en los sectores mineros donde se producen cantidades elevadas de estos metales, teniendo en cuenta que las técnicas de tratamiento que se empleen sean sostenibles económica, social y ambientalmente, ya que de esto dependerá si son viables para ser implementadas o no, dentro de estas técnicas encontraremos convencionales como no convencionales, siendo estas primeras las que son de mayor conocimiento e implementación.

Y aunque la normativa en cuanto a legislación de aguas residuales posee valores máximos permisibles para los agentes que pueda llegar a tener el agua según su uso al momento de llegar al afluente hídrico, es de vital importancia tener en cuenta que esto no se cumple en un la minería ilegal, lo cual supone un alto grado biológico pues este tipo de desechos de metales pesados que no poseen un tratamiento adecuado pueden llegar a generar afectaciones graves a la salud, contaminación no solo de afluentes hídricos, sino también de los suelos y en casos de gran escala mutaciones.

RESUMEN

En el presente trabajo se mostraran la importancia de los tratamientos de aguas residuales en minería para evitar que los metales pesados lleguen a las fuente hídricas y así poder mitigar la contaminación por estos, para ello se analizaron 14 forma de tratamiento de aguas residuales convencionales y 6 no convencionales, teniendo en cuenta tanto matrices comparativas como encuestas realizadas a personas involucradas en el ámbito minero, para poder obtener una visión un poco más amplia de todos los factores que podrían llegar a verse involucrados dentro el desarrollo de los procesos de limpieza del agua, desde los ambientales hasta los económicos con base en los principios de sostenibilidad.

PALABRAS CLAVE: Contaminación, tratamiento de aguas, sostenibilidad, metales pesados, minería.

ABSTRACT

In this document, the importance of wastewater treatments in mining will be shown to prevent heavy metals from reaching the water sources and thus be able to mitigate contamination by these, for this, 14 forms of conventional wastewater treatment and 6 non-conventional, taking into account both comparative matrices and surveys carried out with people involved in the mining field, in order to obtain a slightly broader vision of all the factors that could be involved in the development of water cleaning processes, from environmental to economic based on the principles of sustainability.

KEY WORDS: Contamination, water treatment, sustainability, heavy metals, mining.

OBJETIVOS

Objetivo General

Seleccionar las técnicas más sostenibles para el tratamiento de aguas residuales con elevada concentración de metales pesados en la industria minera colombiana.

Objetivos Específicos

Describir las técnicas para el tratamiento de aguas residuales con alto contenido de metales pesados.

Identificar los criterios de selección para que las técnicas desarrolladas sean consideradas sostenibles.

Seleccionar los diferentes aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales de los tratamientos de agua residual con alto contenido de metales pesados.

1. ASPECTOS GENERALES CONTAMINACION DE METALES PESADOS

Los metales pesados son elementos que poseen una alta densidad y, que en grandes concentraciones, pueden ser peligrosos tanto para la salud del ser humano como para el desarrollo de los ecosistemas. Ya que son capaces de producir envenenamiento, tanto de las fuentes hídricas como del suelo y el aire. Esto se debe a que este tipo de metales poseen una tendencia a bioacumularse, por lo cual su mal manejo puede traer consecuencias desfavorables al medio ambiente (Sánchez, 2020).

La contaminación ambiental se posiciona como uno de los más importantes problemas que afectan a la sociedad del siglo XXI. La pérdida de calidad del aire, del recurso hídrico y de suelos disponibles para actividades agrícolas se ha incrementado exponencialmente (Singh et. al, 2010; Chen et. al, 2013). La tasa de contaminación del agua puede ser estimada en 2000 millones de metros cúbicos diarios. Se hace evidente una crisis de este recurso para los próximos años, lo que podría comprometer el cumplimiento de uno de los objetivos de Desarrollo del Milenio de la Organización de Naciones Unidas (ONU-DAES, 2005-2015). En septiembre de 2015, la Asamblea general de la ONU, acordó como objetivo: “asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible de agua y saneamiento para todos”, otorgándole al agua un carácter prioritario para todos los países miembro.

Los vertimientos generados a través de diversas industrias como la minera poseen un alto contenido de metales pesados por lo tanto actualmente es de suma importancia tener en cuenta que los valores de concentración producidos. Antes no causaban la cantidad de impactos negativos que se han evidenciado hoy en día: hablando específicamente de contaminación del suelo (cambio en su alcalinidad), toxicidad en las plantas y alimentos, enfermedades genéticas y/o sin un tratamiento conocido, bioacumulación, persistencia y no biodegradabilidad son algunos de ellos; además, contaminan el agua y los cultivos (Purga,2006).

Por ejemplo, para una cantidad excesiva de plomo se pueden producir algunas alteraciones en las plantas, asimismo degrada el suelo, lo cual disminuye su productividad. Si la contaminación continua, puede llegar a producir desertificación.

El mayor inconveniente de la contaminación del medio ambiente por metales pesados es su efecto silencioso, es decir, no se ve, por lo tanto, el daño producido no se logra identificar a tiempo causando riesgos para la salud; a pesar de que se han tomado medidas para mitigar este problema, para algunos países industrializados ha sido difícil su aplicación puesto que se requiere colaboración del gobierno, de la sociedad civil y del sector privado por igual.

Dos de los sectores que más contribuyen a la contaminación por metales pesados, no solo en Colombia sino en el mundo, son la actividad industrial y la actividad minera, pues estas prácticas aportan una cantidad considerable de estos elementos al medio ambiente, lo cual es alarmante. Es preocupante que un país como Colombia, el cual cuenta con una red de fuentes hídricas bastante amplia, sea uno de los que más contaminación por mercurio genera, para el año 2010 llegó a ocupar el segundo lugar a nivel mundial en generación de este metal pesado gracias a su uso irresponsable en la explotación minería artesanal de oro, teniendo un valor de 75 t/año en la extracción de 36,9 t de oro en el año 2011 (Moreno,2017).

Pero si bien es cierto que la producción de oro es una de las que más aporta mercurio (Uno de los metales más riesgosos para el desarrollo de la vida) al ecosistema no es el único tipo de minería presentes dentro del país, ni la única que arroja elementos nocivos al medio ambiente. Se puede encontrar minería no solo de metales preciosos como la plata o el platino, sino también de piedras preciosas además de minerales, dando lugar así a los 9.602 títulos mineros que actualmente se encuentran vigentes en Colombia según la Agencia Nacional de Minería (ANM). Los mencionados títulos, para poder iniciar sus labores mineras deben contar con la aprobación del plan de manejo ambiental, plan de trabajos y obras y plan de manejo de vertimientos, por cada una de las entidades correspondientes según la región del país donde se quiera realizar la explotación.

En Colombia, los títulos mineros no pertenecen solamente a empresas o personas nacionales sino también extranjeras. Es importante mencionar que la legislación colombiana permite que no solo las empresas sino también las personas naturales puedan ser poseedores de títulos mineros siempre y cuando demuestren que cuentan con los medios económicos para costear todos los gastos que el desarrollo de la actividad minera conlleva, por lo cual es más fácil hablar de cuántos títulos mineros existen actualmente que de cuántas personas o empresas son dueños de estas; sin embargo, tres de las más grandes y reconocidas a nivel nacional son las siguientes Drummond, empresa que se dedica a la explotación y exportación de carbones; Carbones de Cerrejón, una de las pocas y la segunda mina más grande a cielo abierto; y finalmente, Prodeco, que trabaja la exportación de carbón térmico y metalúrgico (Agencia Nacional de Minería).

Ahora en lo referente a normativa y legislación actualmente la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) regula que dentro del plan de vertimientos se debe garantizar que ningún tipo de elemento diferente al agua salga del centro de tratamiento. Existen unos valores de concentración mínimos permitidos por el estado, que dependerán de las características fisicoquímicas y biológicas de la fuente. Dichas concentraciones presentes en el elemento hídrico se determinan a través de ensayos de laboratorio, los cuales indican en sus resultados qué metales pesados y otros elementos deben removerse antes de volver a su cauce original.

Dichos valores normativos deberían ser reevaluados teniendo en cuenta el proceso de bioacumulación que se da en cierto tipo de materiales nocivos no solo contra la salud del ser humano sino contra los ecosistemas, teniendo como punto de partida la minería legal regulada por corporaciones como la Agencia Nacional de Minería, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, ANLA; y las Corporaciones Autónomas Regionales CAR. No obstante, Colombia es un país donde la minería ilegal es una realidad que azota al país y a la salud pública, pues al no contar con ningún tipo de control se hace de forma artesanal y en muchos casos apoyada por los grupos armados al margen de la ley sin tener en cuenta las afectaciones que el mal manejo de residuos de los elementos y de su explotación de manera indebida traerá para la comunidad y su entorno, ya no solo afectando el recurso hídrico sino además al suelo.

Se encuentran, entonces, también los desechos sólidos que se producen en las minas tales como escombros por voladuras, material de desecho o la remoción de masas del terreno entre otros factores lo cuales al igual que el agua se encuentran regulados por las entidades pertinentes anteriormente mencionadas, dando lugar a que cada uno de los elementos que no se aprovechan para su uso dentro de la mina o comercialización deben seguir un proceso riguroso pues no se permite que sean arrojados al medio ambiente de forma aleatoria, ya que esto podría causar daños en la biodiversidad del lugar donde fuesen arrojados razón por la cual estos procesos se encuentran constantemente bajo vigilancia estatal.

En cuanto a la calidad del aire, tanto dentro como fuera de las minas, se debe garantizar la seguridad de los operarios así como en dado momento de los supervisores e interventores, por lo cual la normativa colombiana exige que se debe diseñar un sistema de ventilación el cual sea capaz de proporcionar tanto un nivel como una calidad del oxígeno en todos los puntos de los túneles de la bocamina o bocaminas que posea el área, ya que de lo contrario la acumulación de los gases producidos por la explotación del material podrían resultar nocivos de forma drástica para la salud; además dando el caso de acuerdo a la cantidad de emisión de gases se debe plantear un sistema de filtración que retorne al medio ambiente una calidad en el aire que no perjudique a la salud ni la seguridad del entorno.

Sin embargo, para el uso de suelos no se tienen definidos de forma clara los valores en cuanto a cantidades de concentración permitidas en elementos como el plomo, el mercurio, el cadmio y el arsénico, con lo cual no se sabe si es apto o no para actividades como la agricultura y la ganadería, poniendo así en peligro la calidad de los productos que se le ofrecen al consumidor.

Por otro lado, la producción de residuos en el área minera es bastante amplia pues dependerá desde las condiciones propias de la zona, de su suelo y sus fuentes hídricas hasta el tipo de elemento o elemento a explotar, con lo cual se producen desde escombros de fácil manejo y resolución hasta desechos de metales pesados los cuales requieren de tratamientos, filtros y diversos procesos para poder ser eliminados, aunque es importante aclarar que nunca se retiran en su totalidad. Así mismo, no hay una cifra exacta en páginas oficiales del estado que indiquen qué cantidad de estos se está produciendo anualmente, lo cual dificulta llevar un monitoreo constante de cómo va avanzando el tema del manejo y la generación de estos residuos.

Con todo y esto, Colombia ha recorrido un gran camino para legalizar una gran cantidad de minas que se encontraban trabajando fuera de la ley, brindándole a sus titulares la posibilidad de acogerse a programas en los cuales se les permite entrar oficialmente al sistema, siempre y cuando estén dispuestos a acogerse a la normativa vigente y así evitar de alguna manera que se le siga haciendo daño al medio ambiente, pero son procesos lentos en los que muchas veces las personas desisten ante los altos costos y la poca eficiencia de los tramites.

En la tabla 1 se presentan algunas de las fuentes de contaminación por metales más importantes por su cantidad y efectos en Colombia. No solo se incluyen las mineras, sino que también se aprecia que, por ejemplo, el plomo es generado por la industria de las pinturas, baterías y electrónica.

Tabla 1.**Metales generados en distintos tipos de industria**

Industria	Metales	Contaminación derivada
Minería de metales ferrosos	Cd, Cu, Ni, Cr, Co, Zn	Drenaje ácido de mina, relaves, escombreras
Extracción de minerales	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Presencia en las menas como en los subproductos
Fundición	As, Cd, Pb, H	Procesado del mineral para obtención de metales
Metalúrgica	Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn	Procesado térmico de metales
Aleaciones y aceros	Pb, Mo, Ni, Cu, Cd, As, Te, U, Zn	Fabricación, eliminación y reciclaje de metales. Relaves y escoriales
Gestión de Residuos	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg, Mn	Incineración de residuos o en lixiviados
Corrosión Metálica	Fe, Cr, Pb, Ni, Co, Zn	Inestabilidad de los metales expuestos al medio ambiente
Galvanoplastia	Cr, Ni, Zn, Cu	Los efluentes líquidos de procesos de recubrimiento
Pinturas y pigmentos	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn	Residuos acuosos procedentes de la fabricación y el deterioro de la pintura vieja.
Baterías	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg	Fluido de la pila de residuos, la contaminación del suelo y las aguas subterráneas.
Electrónica	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, Mn	Residuos metálicos acuosa y sólida desde el proceso de fabricación y reciclaje
Agricultura y Ganadería	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn, As, Mn, Cu	Contaminación de escorrentía, aguas superficiales y subterráneas, la bioacumulación planta

Nota: En esta tabla se muestran los metales generados en distintos procesos industriales y el tipo de contaminación que se podría generar, adicionalmente están señalados algunos de las industrias mineras que más genera residuos de metales pesados. Tomado de: • Rubio, F, D. I. C., Calderón, R. A. M., Gualtero, A. P., Acosta, D. R., & Sandoval, J. (2015). Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una revisión. Ingeniería y Región, (13), 73-90.

2. TECNICAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

La clasificación de las técnicas de tratamiento de metales pesados en las aguas residuales depende de diferentes factores. En este documento se han clasificado como convencionales, refiriéndose a las técnicas que habitualmente se emplean para la remoción de estos contaminantes; y las no convencionales, aquellas que corresponden a procesos innovadores para la eliminación de metales en aguas residuales generalmente de origen industrial.

2.1. Técnicas convencionales

2.1.1 Filtración por Membrana:

Esta tecnología ha tenido un auge en los últimos años gracias a su alta eficiencia, a su facilidad de operación, no requiere de espacios grandes; no es una técnica selectiva y es amigable con el medio ambiente; el inconveniente que se identifica es la generación de grandes cantidades de lodos que contienen los metales. Esta técnica es empleada en procesos para el tratamiento de agua potable, aguas residuales industriales y domésticas.

Las membranas utilizadas se pueden clasificar de acuerdo con sus características como el material de la membrana (sintéticos o polímeros naturales modificados, acoplados y estructurados), su peso molecular de corte, la permeabilidad y solubilidad del soluto, solvente, superficie y espesor activo de la película. Esta tecnología se emplea comúnmente para tratar y recuperar sales metálicas de residuos generados en procesos galvanoplásticos, en el reciclaje de aceites, en la producción de alimentos y bebidas; y, en la explotación y producción de hidrocarburos (Nemerow & Dasgupta, 1998; Ji, 2015).

El quitosano y la quitina son sustancias ambientalmente amigables, por lo tanto, son de interés en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. Los principales usos de estos biomateriales y algunos derivados actualmente son la coagulación primaria

para aguas residuales de alta turbidez y alcalinidad; captura de metales pesados y pesticidas en soluciones acuosas, y en algunos copolímeros de injerto del quitosano se evidencia una alta efectividad para la remoción de metales pesados (Bonecco et al., 2017).

2.1.2. Electrodialisis:

Es una técnica capaz de remover componentes iónicos de soluciones acuosas a través de membranas permeables selectivas en un campo eléctrico constante. Este proceso ha presentado eficiencias para el cloruro de níquel en un 69% y para el óxido de cobalto en un 90% (Sarria-Villa et al., 2020). Su ventaja es la habilidad de producir corrientes altamente concentradas para la recuperación y rechazo de metales pesados presentes en el agua; no obstante, requiere del uso de membranas con su consiguiente limpieza y cuidado durante la operación y mantenimiento continuo para prevenir daños.

“Esta técnica tiene la capacidad de remover iones contaminantes cargados de hasta 0,0001 μm , mediante hojas o láminas porosas de resinas de intercambio iónico con una baja permeabilidad relativa para el agua”- (Taylor & Wiesner, 2002).

2.1.3. Ósmosis Inversa:

Es un proceso de permeación a través de membrana para la separación por difusión controlada o cribado. Tiene la capacidad de seleccionar elementos de tan solo 0.0001 mm, lo que le otorga un amplio abanico de capacidades de tratamiento (Nemerow & Dasgupta, 1998). Las principales ventajas de este método son: facilidad de automatización; no hay cambio en la composición química de las aguas residuales y presenta altos niveles de remoción. Las desventajas que se podrían presentar son: alto costo por reemplazar la membrana; requiere de presiones muy altas para su funcionamiento; mediana selectividad y tolerancia a cambio de pH; bajo tiempo de vida con soluciones corrosivas; es necesario separar las partículas insolubles o en

suspensión para evitar la saturación de las membranas y requiere mantenimiento frecuente para esta.

2.1.4 Nanofiltración:

Es una técnica de tratamiento de agua relativamente reciente que ha incrementado rápidamente su utilización en la industria petroquímica, alimentaria, farmacéutica, química, biotecnológica y en la desalinización. Sus dos propiedades principales son el tamaño (aproximadamente 300-500 g/mol) de corte de las membranas y la carga eléctrica neta en la superficie de los poros que poseen las membranas de nanofiltración, las cuales dependen del pH y de las sustancias absorbidas. Las ventajas para esta técnica son el ablandamiento de agua potable; trabaja a menor presión que la ósmosis inversa; eliminación de materia orgánica y trihalometano; eliminación de pesticidas, metales pesados, contaminantes emergentes, micro contaminantes y microorganismos; permite el paso de sales monovalentes, pero rechazan las divalentes. Estas ventajas que se presentan durante su proceso resaltan la nanofiltración como una tecnología prometedora e innovadora que puede ser aplicada en diferentes industrias. (Rubio, 2015).

2.1.5. Ultrafiltración:

En la ultrafiltración se da un proceso de fraccionamiento selectivo con presiones bajas que pueden llegar hasta 145 psi (10 bar). Este procedimiento se emplea con una alta frecuencia tanto en el fraccionamiento de leche y suero, y como en el proteico. Concentra sólidos en suspensión y solutos de peso molecular mayor a 1000 uma. El permeado contiene solutos orgánicos de bajo peso molecular y sales (Rubio, 2015).

Su aplicación se evidencia principalmente en la industria textil, de hidrocarburos, en la industria alimentaria y de bebidas donde este proceso ayuda a la eliminación de sustancias orgánicas nocivas, en la eliminación de trihalometanos del agua y el tratamiento de aguas residuales. Para sólidos tienen un 95% de remoción; en grasas y aceites de 80%; al igual que en los hidrocarburos y en turbiedad de un 98%. Los

beneficios que se obtienen con esta técnica es el bajo consumo de energía si se compara con la ósmosis inversa, requiere de poco espacio para su instalación y las remociones son superiores al 80% en aguas residuales y es capaz de retener partículas muy pequeñas; sin embargo, tiene un alto costo para su instalación, operación y mantenimiento, la vida útil de las membranas es corta y hay un alto grado de ensuciamiento en estas (Alka, 2012).

2.1.6. Intercambio Iónico:

Es un procedimiento mediante el cual los iones que se encuentran en solución son transferidos a una matriz sólida, la cual a su vez se encarga de liberar iones que, a pesar de ser de un tipo diferente, poseen la misma carga. El intercambio iónico es un proceso de separación física lo que representa que los iones intercambiados no se modifiquen químicamente. Las principales ventajas que ofrece el intercambio iónico son la recuperación del valor del metal, la alta selectividad, menos volumen de lodos producidos y la reunión de las especificaciones de descarga estrictas (Zewail & Yousef, 2015), más sin embargo en este proceso encontramos la presencia de calcio, sodio y magnesio lo cual disminuye su rendimiento debido a que pueden saturar la resina; los materiales orgánicos pueden envenenar la resina y las resinas no son muy tolerantes al cambio de pH; la solución contaminada debe ser previamente tratada para eliminar los materiales en suspensión; es posible que se presente la competencia entre metales pesados y otros cationes, lo cual representa desventajas considerables.

2.1.7. Adsorción (Convencional)

La adsorción es una técnica antigua que no ha perdido relevancia ya que, es comúnmente utilizada en el tratamiento de agua potable para remover sustancias orgánicas, tratamiento terciario de aguas residuales, remediación del agua subterránea y tratar el agua que se utiliza en acuarios y piscinas de natación.

La técnica presenta remoción de una amplia variedad de contaminantes, alta capacidad, cinética rápida y posiblemente selectiva dependiendo de adsorbente de lo cual también depende su rendimiento, básicamente por la estructura física del mismo (Liu & Lee, 2014). Por otro lado encontramos que algunos de los adsorbentes son los carbones activados, arcillas, biopolímeros, zeolitas, perlas de sílice y plantas o desechos lignocelulósicos son algunos de los adsorbentes, generalmente con procesos variados de modificación química (Wan Ngah, et al; 2011), comúnmente empleados para remover colorantes iónicos, metales pesados, materiales radioactivos entre otros contaminantes orgánicos e inorgánicos generados por diferentes tipos de industrias (Boamah, et al; 2015). Las ventajas principales en la adsorción son su alta efectividad a muy bajas concentraciones de metal; facilidad de operación; permite la fijación de metales en presencia de otros cationes y el adsorbente puede ser regenerado. Las desventajas para esta técnica es el alto costo del adsorbente y su regeneración; la capacidad de adsorción altamente dependiente del pH; y la necesidad de eliminar los materiales en suspensión antes de que el efluente sea tratado.

2.1.8. Carbón Activado

El primer uso que se conoce del carbón activado para el tratamiento de aguas residuales fue en el año de 1930 en Milford, New Jersey por la empresa Hackensack Water Co donde principalmente se utilizó para mejorar el sabor de agua y el control de olores.

En la obra “Fundamentos de los procesos de tratamiento de agua: físicos, químicos y biológicos” se estima que aproximadamente 1200 plantas de tratamiento de agua utilizaban carbón activado en polvo para este en el año 1943.

Este elemento a lo largo del tiempo viene demostrando su eficiencia para absorber de manera exitosa una gran variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el medio ambiente acuático, esto gracias a sus áreas superficiales porosas que van desde 500 hasta 1.500 m² / g, así como a la presencia de un amplio espectro de superficie funcional que la hace accesible a diferentes reactivos (Karnib, et al; 2014). Es

un elemento reconocido en el tratamiento por adsorción ya que, puede purificar, desodorizar y decolorar el agua; con los filtros de carbón activado es posible remover algunos metales pesados, taninos y compuestos orgánicos volátiles.

2.1.9 Nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono (NTC) son adsorbentes relativamente nuevos y han ido ganando interés por su tamaño extremadamente pequeño y su capacidad excepcional para la eliminación de diversos contaminantes como los clorobencenos, herbicidas, plomo y iones cadmio. Los NTC son materiales que requieren un método de preparación apropiado para la obtención de las estructuras; el método de preparación más utilizado debido a su mayor rendimiento es la deposición de vapor químico. Los NTC muestran actividades antimicrobianas superiores a los desinfectantes que se utilizan comúnmente dado que, permiten eliminar aquellos microorganismos no deseados presentes en las aguas residuales (Ren et al, 2011).

2.1.10. Precipitación química

Es la técnica más utilizada en los procesos industriales por su simplicidad de operación, el alto nivel de eliminación de metales pesados y su bajo costo de operación; los inconvenientes que se identifican es la generación de lodos con alto costo de mantenimiento y la utilización de agentes coagulantes y floculantes para separar los metales del efluente.

Alguno de los mejores rendimientos de tratamientos por precipitación, es el uso de hidróxido, adicionalmente es una técnica de bajo costo, fácil control del pH y eliminación por floculación y sedimentación (Huisman, et al; 2006). Igualmente se emplea la precipitación por sulfuros, aunque con solubilidades bajas y precipitados no anfóteros, por lo que puede lograr altos rendimientos; también se han empleado sustancias quelantes, aunque presentan desventajas considerables como la carencia de uniones necesarias y demasiados riesgos ambientales (Chen, et al; 2009)

2.1.11. Electrocoagulación

La electrocoagulación surge en 1906 con la primera patente que tiene lugar en los Estados Unidos y aunque se aplica ampliamente en la actualidad para el tratamiento de aguas en un principio presentaron problemas de tipo financiero para que la industria adoptara esta técnica; en 1888 se reportó el primer ensayo realizado en Londres por Webster posteriormente, se utiliza esta técnica en Brewster, NY para esterilizar aguas negras.

Es una técnica en la cual se combinan los principios de la coagulación y floculación en un reactor electrolítico., el cual se encuentra equipado con una fuente de corriente y varios electrodos encargados de aportar los iones desestabilizadores de partículas coloidales que reemplazan las funciones de los compuestos químicos que se emplean en los tratamientos convencionales, mediante un proceso en el cual se induce corriente eléctrica en el agua a través con la ayuda de placas metálicas paralelas de hierro o aluminio. Se ha demostrado la alta eficiencia en la remoción de metales pesados, minimizando la generación de residuos secundarios lo cual genera un impacto positivo para el medio ambiente; durante su proceso se pueden utilizar equipos pequeños lo cual permite tener costos razonables para su funcionamiento, también el proceso puede ser automatizado (Al-Shannag et al.,2015).

2.1.12. Coagulación-Floculación

Este proceso tiene como finalidad desestabilizar el coloide y aglomerar posteriormente, en la etapa inicial (coagulación) para posteriormente pasar al proceso floculación en el cual se da la aglomeración de dichos coloides, esto se da gracias a la atracción que se presenta entre las partículas. Por otro lado para llevar a cabo el proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales se suelen utilizar los siguientes productos químicos: cal, sulfato férrico, cloruro férrico, sulfato ferroso y alumbre; los criterios de selección para el mejor coagulante son: la mejor curva de sedimentación del precipitado generado y el nivel de remoción de metales. Los factores relevantes para

tener en cuenta en la técnica es la dosis química apropiada, el efecto energético y el tiempo de la mezcla (Bakar & Halim, 2013).

Este método es comúnmente utilizado en Estados Unidos de América ya que, no se requiere de un equipo sofisticado a nivel tecnológico, los reactivos requeridos no tienen un costo elevado y son de fácil acceso.

2.1.12. Electroflocculación

Es un proceso químico en el cual se hace uso de los procesos tanto de coagulación convencional y de tratamientos electroquímicos en los cuales se realiza la adición electrolítica de iones metálicos. Su eficiencia en la remoción de los contaminantes se debe a que son arrastrados por las burbujas de gas (H_2 y O_2) que se producen en el sistema por lo que salen a flote en la superficie, esto gracias a agentes desestabilizantes que neutralizan las cargas procediendo así que se eliminen los contaminantes de la disolución a través de electrodos

2.1.13. Flotación

“El proceso de flotación ion se basa en impartir las especies iónicas de metal en las aguas residuales hidrófobas mediante el uso de agentes activos de superficie (tensoactivos) y la posterior eliminación de estas especies hidrófobas por burbujas de aire” (Polat & Erdogan, 2007).

2.1.14. Fotocatálisis en la degradación de metales pesados

En este proceso se fundamenta en el intercambio de cargas a través de la interfaz que es suministrada por un elemento semiconductor y una solución acuosa la cual se encuentra contaminada, en la cual aumenta la conductividad a medida que la temperatura, lo cual genera un par de electrón-hueco, ocurriendo la adsorción de los

fotones y la distribución de diferentes estados electrónicos en la superficie, degradando moléculas orgánicas colorantes y metales pesados. (Páez & Taborda, 2006).

Los componentes necesarios para el proceso de fotocátalisis son un fotocatalizador, oxidante, suministrador de electrones y radiación. Actualmente, una de las técnicas utilizadas para el tratamiento de aguas residuales es la fotocátalisis solar; es novedosa y prometedora por el potencial de su aplicación debido a la correlación que existe entre la energía solar y la conservación del medio ambiente; a diferencia de otras técnicas esta no es selectiva y se emplea para mezclas complejas de contaminantes.

2.2. Técnicas No Convencionales

2.2.1. Adsorbentes de Bajo Costo y Nuevos Adsorbentes

Las técnicas no convencionales tienen como fin desarrollar materiales que sean amigables con el medio ambiente y que tengan una adecuada capacidad de adsorción a partir de fuentes naturales que permitan eliminar y reducir los contaminantes en aguas residuales. Las ventajas de utilizar este tipo de técnicas son la utilización de materiales biodegradables de bajo costo, la degradabilidad, la regeneración y la minimización de productos químicos durante el proceso; sin embargo, no se ha implementado a nivel industrial.

La adsorción es un proceso de transferencia de masa por el cual una sustancia se transfiere desde la fase líquida a la superficie de un sólido. El proceso de sorción describe en realidad un grupo de procesos, que incluyen la adsorción y las reacciones de precipitación. Recientemente, la adsorción se ha convertido en una de las técnicas alternativas de tratamiento para las aguas residuales cargadas con metales pesados (Wan Ngah, et al; 2011). Se emplea un amplio espectro de materiales biológicos, especialmente las bacterias, algas, levaduras y hongos han recibido una atención creciente para la eliminación y recuperación de metales pesados, debido a su buen rendimiento, bajo coste y grandes cantidades disponibles (Wan & Chen, 2009; Anastopoulos & Kyzas, 2015).

2.2.2. Adsorción de metales pesados por materiales naturales agrícolas e industriales

Los procesos de adsorción están siendo ampliamente utilizados por varios investigadores para la eliminación de metales pesados. Los flujos de residuos y carbón activado se han usado con frecuencia como un adsorbente. A pesar de su amplio uso en las industrias de tratamiento de agua y aguas residuales, el carbón activado se mantiene como un material costoso. Por lo tanto, surge la necesidad de crear métodos más económicos y seguros para la eliminación de metales pesados en aguas residuales. Los métodos encontrados son los adsorbentes verdes o bioadsorbentes que surgen del aprovechamiento de desechos en la industria agrícola y alimentaria; estos desechos son frutas, vegetales y plantas, y en países como Colombia que son atractivos para la industria alimentaria y agroindustriales por su amplia biodiversidad en frutas, vegetales y plantas, se generan millones de residuos mensualmente. Lo que se busca con este tipo de métodos no convencionales es aprovechar estos residuos, principalmente las cáscaras de frutas para la eliminación de contaminantes en el agua, siendo una alternativa de gran potencial y aprovechamiento por los beneficios que agrega.

2.2.3. Fitorremediación.

Es el uso de las plantas y los microorganismos del suelo asociados para reducir las concentraciones o los efectos tóxicos de los contaminantes en el ambiente. Es una tecnología relativamente reciente y se percibe como rentable, eficiente, respetuoso del medio ambiente y con buena aceptación del público (Ali et al, 2013). Estas fitotecnologías tienen varias ventajas a diferencia de otros métodos ya que, es sustentable, no requiere de personal especializado, es de bajo costo, no requiere consumo de energía, sólo requiere de prácticas agronómicas convencionales, actúa de forma positiva sobre el suelo y mejora sus propiedades físicas y químicas debido a la formación de una cubierta vegetal; se puede emplear en agua, suelo, aire y sedimentos; no obstante las desventajas que se pueden presentar es que requiere de áreas relativamente grandes;

en sistemas acuáticos se podría favorecer la diseminación de plagas; no todas las plantas son tolerantes o acumuladoras y los contaminantes acumulados en maderas pueden liberarse por procesos de combustión.

2.2.4. Biopolímeros

Son industrialmente atractivos por su capacidad de reducir las concentraciones de iones metálicos de transición a concentraciones de partes por billón; son ampliamente disponibles y ambientalmente seguros (Barakat, 2011; Rubio et al., 2015). Poseen un número amplio de diferentes grupos funcionales, tales como hidroxilos y aminas, que aumentan la eficiencia de la absorción de iones metálicos. El principal biopolímero natural utilizado es la quitina que se extrae de las conchas de los crustáceos, como las cáscaras de camarón, mediante la desproteinización. Existen varias formas para la reticulación de la quitina con biomasa y una de ellas es mediante las reacciones de redox entre los grupos hidroxilos con los grupos principales de la biomasa. Para esta técnica se debe tener en cuenta que la adsorción de metales pesados por biopolímeros está influenciada por el pH del medio.

2.2.5. Hidrogeles.

Son polímeros hidrófilos reticulados capaces de ampliar sus volúmenes debido a su alta expansión en el agua. Se ha estudiado su comportamiento de adsorción en metales pesados y se evidencia que permiten purificar el agua y además son biodegradables (Rubio, 2015).

Biopolímeros como el colágeno, el alginato, el almidón, el quitosano y la celulosa son los más utilizados para la síntesis de hidrogeles biodegradables, donde el quitosano y la celulosa se han convertido en un material por excelencia cuando se trata de hidrogeles por su bajo costo y abundancia en la naturaleza; la celulosa se puede encontrar en la mayoría de plantas vasculares terrestres y se ha demostrado la capacidad que tiene para la eliminación de iones metálicos mediante el intercambio iónico y la asociación

electrostática entre el adsorbente y el adsorbato. El quitosano proviene de los artrópodos y conchas de crustáceos (camarones, langostas, cangrejos y sepias).

2.3.6. Ceniza Volante:

Las cenizas volantes, generadas durante la combustión de carbón para la producción de energía, son un subproducto industrial reconocido como un contaminante ambiental, debido a su enriquecimiento en elementos traza potencialmente tóxicos que se condensan del gas de combustión. Este material se ha reutilizado como un adsorbente de bajo costo para la eliminación de compuestos orgánicos, gases de combustión y metales pesados (Visa & Chelaru, 2014); luego de aumentar su capacidad de adsorción mediante de la activación química y física (Ahmaruzzaman, 2010).

Para el año 2016 la Comisión Europea aprobó el proyecto LIFE iCirBUS-4industries para una economía regional sostenible donde el principal objetivo fue contribuir a solucionar los problemas de gestión de los residuos procedentes de las plantas de Biomasa (Cenizas volantes) y de las plantas de tratamiento de agua, con un impacto en el medio ambiente. El proyecto puso en práctica el concepto de economía circular (Ken Webster, 2012) define la economía circular como “Aquella que se fundamenta en reducir, reusar y reciclar, a la vez que se promueve que el valor de los productos, los materiales y los recursos, se mantengan en la economía durante el mayor tiempo posible y se reduzca al mínimo la generación de residuos” y se obtuvo como resultado la utilización de cenizas volantes procedentes de plantas de biomasa como agentes absorbentes de metales pesados en aguas residuales locales y para segunda etapa se espera que las cenizas utilizadas como absorbentes se valorizaran como materiales de construcción reciclables.

3. PRINCIPIOS DE SOSTENIBILIDAD

Buscando generar los criterios de selección para las técnicas de tratamientos de agua residual con contenido elevado de metales pesados se hizo con base a 3 principios de sostenibilidad que hoy por hoy son los referentes en cuanto a sostenibilidad se habla.

3.1. Sustentabilidad

La agenda 2030 determinada por la Organización de Naciones Unidas (ONU) definieron 17 objetivos de desarrollo sostenible, generando una herramienta integral para entender lo que la sustentabilidad realmente abarca. Esta nueva idea busca dar una mayor importancia a la naturaleza, a los ecosistemas saludables y con tiempos adecuados para poder responder a la explotación de estos; con un entendimiento del cuidado humano y de la buena relación entre las sociedades; y por último el desarrollo económico que en los últimos 100 años ha sido el que ha prevalecido sobre los otros 2 factores. (Agirreazkuenaga, 2019).

Figura 1.

Representación sustentabilidad con ODS



Nota: La figura representa los objetivos de desarrollo sostenible con los pilares de la sustentabilidad (Ecosistema sano, bienestar humano y desarrollo económico) Tomado de: • Agirreazkuenaga, L. (2019). Embedding sustainable development goals in education. Teachers' perspective about education for sustainability in the Basque Autonomous Community. Sustainability, 11(5), 1496.

3.2. Economía circular

Este tipo de economía supone un gran reto en el cual se debe reestructurar todo el sistema de consumo, para iniciar la recirculación de los materiales tantas veces como sea posible, dándoles entonces una vida útil más larga con lo cual se reduce la producción de residuos y así mismo se cuidan estos recursos, pues se debe empezar a concientizar a la sociedad del impacto real que puede llegar a darse por la falta o escases de estos, ya que son no renovables (Sánchez, 2020).

3.3. Producción más limpia

Este aspecto de la sostenibilidad busca mediante una prevención ambiental integral permitiendo así el ahorro de materias primas, agua y recurso energético; la reducción, sustitución y en el mejor de los casos el uso de materias peligrosas o muy contaminantes; reducción en la generación de productos no deseados o también llamados residuos y de emisión de contaminantes (Navas, 2018). También es considerada una herramienta que integra el medio ambiente en la gestión global de los proyectos permitiendo a las compañías generar un valor agregado en sus procesos dando una mayor competitividad para el mercado global.

Algunos de las modalidades que se aplican en la producción más limpia son la minimización y la valoración; en la primera se busca generar la menor cantidad de residuos y mediante rediseños en procesos y en los productos requiriendo nuevas tecnologías pero que a su vez se considera como buenas prácticas; la segunda busca reciclaje externo de los procesos, es decir, dar un valor extra a los mal llamados residuos de producción (Navas, 2018).

3.4. Criterios ambientales

3.4.1. Generación de subproductos tóxicos

Estos elementos son los residuos producidos en diversas industrias, para el caso de la industria minera estos elementos se dan como resultado de la explotación de los diversos minerales, piedras preciosas y demás materiales no renovables, ya sea porque están presentes en el área del título y son liberados al momento de realizar la explotación del material o bien porque se requiere usar componentes nocivos para la extracción de este, en cualquiera de los dos casos estos productos secundarios que se obtienen a través del proceso de explotación que son dañinos para la salud y el ambiente deberán ser tratados de forma especial según sean sus características (Sánchez, 2020).

3.4.2. Manejo de residuos

Es el proceso mediante el cual se da no solo la recolección sino el tratamiento a los elementos que se generan tras el proceso de explotación, almacenamiento y procesamiento de los materiales extraídos. El tratamiento que se le debe dar a estos residuos de producción será determinado por el tipo de residuo que se haya generado, tanto sólidos como líquidos, pues en ambos casos se deberá garantizar que se entregue nuevamente al ambiente en condiciones óptimas que cumplan con la normativa nacional.

3.4.3. Reutilización de materias primas

Se presenta cuando se prolonga la vida útil de materiales dándoles otros posibles usos con lo cual se contribuye a la reducción de residuos producidos por la actividad minera, lo cual en la actualidad es un punto importante, pues la nación está intentando a través de sus entidades promover el mejor aprovechamiento posible a todos los recursos, especialmente a aquellos que son no renovables (Navas, 2018).

3.4.4. Generación de olores ofensivos

Estos olores pueden producirse gracias a la liberación de sustancias en el momento de desarrollar las operaciones de la explotación y extracción del material ya sea porque

se producen gases dentro de las minas, por la liberación al aire de sustancias presente en el subsuelo o por condiciones que se puedan generar en el agua presente dentro y fuera de los túneles y aunque si bien es cierto estos olores ofensivos no son dañinos ni generan afecciones más allá de una simple incomodidad pueden llegar a ser bastante desagradables y por supuesto indeseables (Navas, 2018).

3.5. Criterios administrativos

3.5.1. Habilidad de los operarios

Hace referencia a la capacidad que los operarios de las máquinas para manejar las maquinas que se encuentran dentro de la mina, es acá donde se debe garantizar que los operarios cuenten con la capacitación suficiente para el manejo de la maquinaria, lo ideal sería que periódicamente la administración de las entidades poseedoras de los títulos mineros garantizaran la actualización del personal en el manejo de los equipos, pues esto ayuda en gran medida a la seguridad en la mina y la eficiencia del trabajo dentro de esta(Sánchez, 2020).

3.5.2. Experiencia en la industria minera

De esta dependerá en muchas ocasiones la facilidad con que la persona, o personas, que se encuentren a cargo de los títulos o empresa minera se desempeñara y desenvolverá en los imprevistos y eventos fortuitos que puedan ocurrir dentro de las operaciones, así como de los percances económicos que se puedan presentar, por lo cual es indispensable contar con personal de alta experiencia en el desarrollo de actividades mineras y del funcionamiento de esta industria, pues de esto dependerá el buen funcionamiento de las labores que se requiera realizar en el proceso tanto legal, como de explotación y económico que se requiere (Sánchez, 2020).

3.6. Criterios técnicos

3.6.1. Madurez de tecnología

Hace referencia a la automatización y digitalización en los procesos que se realizan dentro de la producción de la mina, lo cual es de gran importancia actualmente pues al mejorar los procesos y tecnificarlos se hace más fácil la vida no solo de la parte administrativa sino también de los operarios y mineros, brindando procesos más rápidos, eficientes y ordenados, con lo cual la producción se ve altamente favorecida.

3.6.2. Tiempos de operación y caudales que se manejan

Son los tiempos que se demora la planta de tratamiento en realizar el proceso de purificación del agua que la mina le suministra, estos tiempos de operación variarán de acuerdo con el tipo de tratamiento que el agua requiera, teniendo en cuenta los factores tanto bióticos como abióticos que esta posea y el caudal a procesar. Estos caudales, a su vez, dependerán de las necesidades de la actividad minera.

3.6.3 Necesidades de reactivos

Los reactivos son sustancias que se encuentran diseñadas para producir reacciones químicas para el caso de la minería existe una amplia gama de estos, ya que cada tipo de material requiere de un producto diferente para reaccionar y conseguir el producto, análisis o ensayo, así como la desintoxicación del agua en algunos casos requiere de estos.

3.6.4. Eficiencia de remoción

Hace referencia a la efectividad de los procesos tanto físicos como químicos que se llevan a cabo en las plantas de tratamientos para eliminar los agentes nocivos del agua,

como lo son los metales pesados, los residuos orgánicos y los microorganismos antes de ser entregada de vuelta al afluente hídrico, garantizando siempre que los valores de estos sean iguales y de preferencia inferiores a los mínimos exigidos por la normatividad nacional.

3.7. Criterios económicos

3.7.1. Costo de equipos

Antes de empezar los trabajos, desde el momento de abrir la bocamina hasta el cierre y abandono de esta, se debe tener en cuenta el costo de los equipos requeridos en cada fase tanto de exploración como de explotación y se debe tener claro y organizado tanto la procedencia como el valor de estos, si serán comprados o alquilados, qué conviene más para el proceso y qué será más rentable.

3.7.2. Mantenimiento y operación

Garantizar que la maquinaria se encuentre en condiciones óptimas para su uso es fundamental pues esto da lugar a que las actividades se cumplan de acuerdo con los cronogramas establecidos y así cumplir con las metas que se tienen, es por esto por lo que constantemente se debe estar monitoreando el estado de la maquinaria, pues un daño en esta se vería reflejado directamente en la producción pues la retrasaría y podría generar desde pequeñas hasta grandes afectaciones en el proceso de explotación.

3.7.3. Área necesaria

Es el área de sesión que se otorga al título, es decir la extensión de tierra en la cual se realizará la actividad minera y esta dependerá de tanto de cómo se encuentre distribuido el material que se va a explotar, así como la capacidad económica de quien

lo solicita, por ende, esta es seleccionada por quien realiza la solicitud, preferiblemente acompañado de un profesional en minas que le indique de acuerdo con las características propias del lugar cual es la medida más conveniente. Ahora bien, es importante aclarar que el estado hace la concesión para la explotación del subsuelo, es decir la capa que se encuentra bajo la superficie terrestre, pero para poder hacer uso del suelo superficial se requiere negociar con quien sea el propietario de la tierra y llegar a un acuerdo. Dentro de esta área se debe incluir también el espacio para elementos como plantas de tratamientos de agua y vertederos (Sánchez, 2020).

4. MATRICES COMPARATIVAS

En el ámbito ambiental existen distintos tipos de metodologías para la valoración y cuantificación de las afectaciones o implicaciones que podría llegar a tener un proyecto, estas pueden ser favorables o desfavorables según la planificación o diseño que se le dé al mismo, algunas de estas son las mencionadas a continuación, que van desde calificar netamente la parte económica, a otras más complejas que buscan relacionar los factores alrededor de este como los análisis multicriterio.

4.1. Ejercicio de política

Involucra a científicos, académicos y hacedores de políticas en la construcción de “historias futuras” para el análisis de los escenarios, así como a las entidades gubernamentales tanto nacionales como regionales, ya que estas participan de forma directa en el desarrollo de la regulación de la normativa para la actividad minera y el impacto ambiental que esta puede llegar a tener (UPME,2018).

4.2. Análisis costo-beneficio

Analiza cada medida de adaptación identificando, cuantificando y monetizando sus costos y beneficios asociados. A menudo involucran un alto grado de incertidumbre cuando se deben cuantificar bienes o servicios no mercadeables, otro de los factores importantes es que en esta actividad económica el valor al cual se comercia el producto puede presentar cambios significativos en periodos de tiempo cortos. (Pulido, 2021).

4.3. Análisis costo – efectividad

Es generalmente aplicado en decisiones de proyectos individuales, cuando los beneficios no son monetizados, se compara su efectividad respecto a un objetivo. (Pulido, 2021)

4.4. Análisis multicriterio

Es un enfoque estructurado que determina preferencias respecto a alternativas respecto a ciertos atributos y objetivos que son deseables. Se usa especialmente cuando un solo criterio (como costo-beneficio) no es suficiente si se desean incluir otros criterios como lo ambiental o lo social, a los cuales no se les asignan valores monetizados (García, 2004).

4.5. Herramienta para la evaluación y gestión ambiental (TEAM)

Es un paquete de software que permite crear gráficos y tablas para comparar opciones de adaptación a partir de criterios cuantitativos y cualitativos, esta también tiene en cuenta aspectos del entorno donde se está realizando el proyecto a corto mediano y largo plazo (UPME, 2018).

4.6. Matriz de decisión para la adaptación (ADM)

Usa técnicas de evaluación multicriterio para evaluar la efectividad relativa y los costos de las opciones de adaptación. Se da una calificación a las alternativas respecto a qué tan bien responden a los criterios para un determinado escenario. Los puntajes son multiplicados por pesos y agregados para determinar las opciones que mejor responden a los criterios (UPME, 2018).

4.7. Screening de opciones de adaptación

Es una matriz para la toma de decisiones que mediante respuestas de “sí” y “no” permite identificar fortalezas y debilidades de un conjunto de opciones, a veces puede llegar a ser considerada una matriz previa a la realización de la matriz DOFA (UPME, 2018).

4.8. Estimación de riesgos relacionados con el clima como indicadores de la necesidad de las respuestas de adaptación.

Permite obtener una estimación cuantitativa de riesgos relacionados con el clima para objetivos y procesos específicos. El proceso se desarrolla en tres pasos: 1) estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos en un territorio, 2) evaluar los daños sociales como una correlación entre la población y la probabilidad de daños, 3) calcular el daño, expresado como unidades relativas o monetarias tomando en cuenta el producto interno bruto del territorio a estudiar (UPME, 2018).

4.9. Costeo de impactos del cambio climático.

Es una guía desarrollada para el Reino Unido que calcula el costo de los impactos climáticos y explica cómo compararlos con los costos de las medidas de adaptación. Los impactos físicos son convertidos en valores monetarios y luego, después de calcular los costos de las opciones de adaptación, se determinan costos y beneficios (UPME, 2018).

4.10. Identificación de opciones de adaptación

Es una guía para la identificación y selección de opciones de adaptación que podrían dar respuesta a riesgos climáticos, es una ayuda para la herramienta UKCIP (United Kingdom Climate Impacts Programme) la cual es una metodología que fue desarrollada en el Programa de Impactos Climáticos de Reino Unido (Willows, Reynard, Meadowcroft, & Connell, 2003).

4.11. Herramienta de evaluación del riesgo comunitario - Adaptación y medios de vida

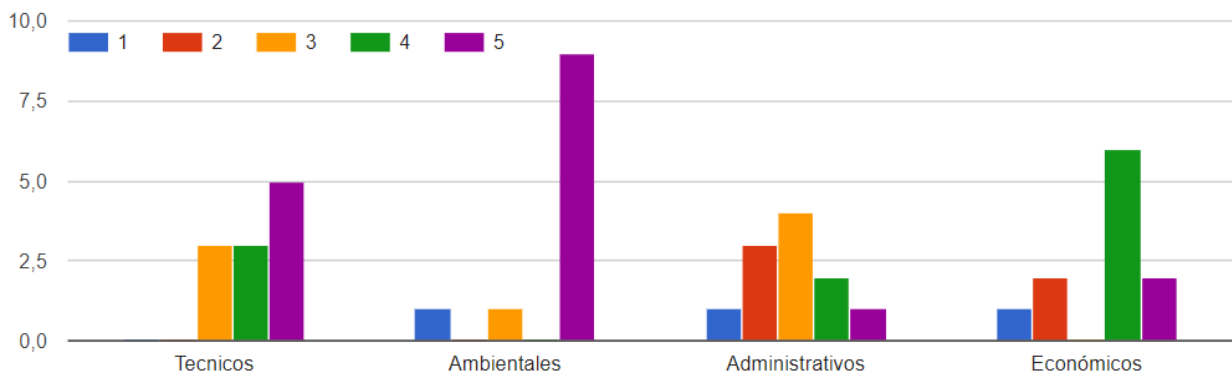
Es una herramienta que busca ayudar a integrar la reducción del riesgo y la adaptación al cambio climático en proyectos comunitarios. El resultado es una lista de actividades que protegen o mejoran el acceso y la disponibilidad de los recursos que se ven fuertemente afectados por amenazas climáticas (UPME, 2018).

Para el desarrollo de esta investigación se tomó la decisión de hacer un análisis multi criterio con los parámetros descritos en el capítulo anterior y con el fin de tener una mayor objetividad en la selección de las técnicas se realizó una encuesta (anexo A) a ingenieros ambientales, de minas, químicos y de petróleos con una gran experiencia y conocimiento en el tema de tratamiento de aguas residuales industriales, exactamente en explotación minera y de petróleo, con uso de volúmenes considerables de agua para sus procesos. Adicional a la información personal de cada uno de los encuestados, la encuesta preguntaba qué valor representaba para cada uno de los encuestados los criterios y subcriterios tenidos en cuenta en el estudio.

Los resultados obtenidos de la encuesta realizada a 11 ingenieros se muestran en las Figura 2 a 6:

Figura 2.

Resultados para criterios obtenidos en la encuesta aplicada



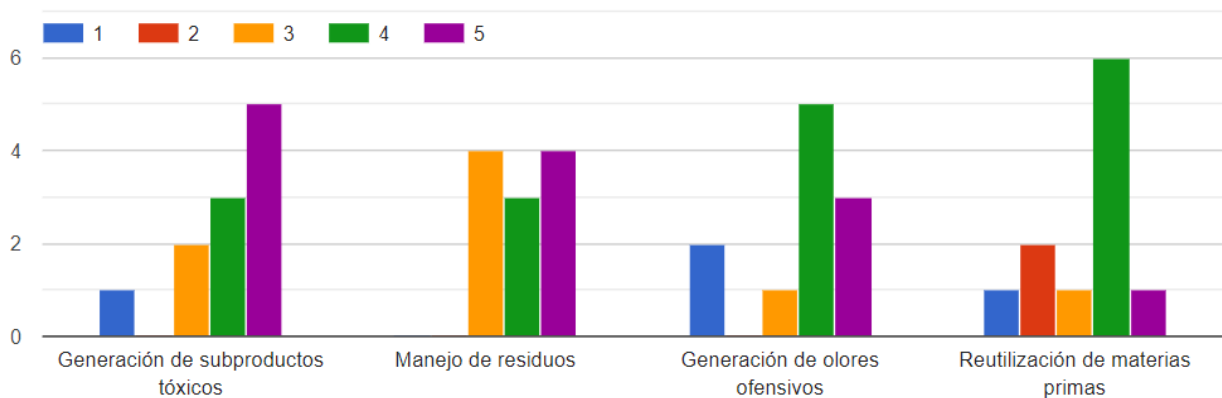
Nota: representación gráfica de la significancia de los criterios de selección tenidos en cuenta en la investigación.

Subcriterios ambientales

En la grafica se observa que el ítem ambiental es el que se considera más importante, seguido por el técnico, económico y administrativo, lo cual muestra que la protección de los ecosistemas cada día se vuelve un factor de mayor relevancia en el desarrollo de las practicas mineras.

Figura 3.

Resultados para subcriterios ambientales en la encuesta aplicada



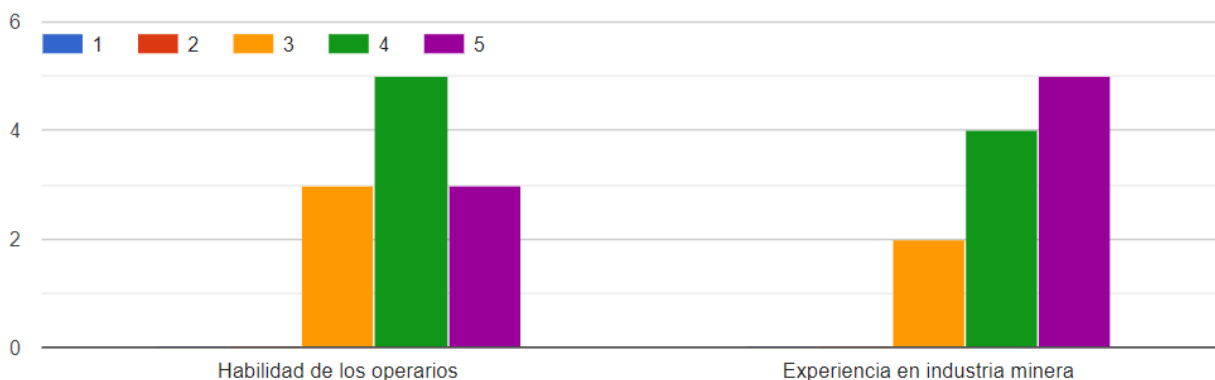
Nota: Representación gráfica de la significancia de los subcriterios ambientales tenidos en cuenta en la investigación.

De la gráfica anterior se puede concluir que de los 4 ítems la generación de subproductos tóxicos es una de las que más importancia posee, esto puede deberse a que es una de las más complejas para manejar y así mismo la más nociva para el medio ambiente.

Subcriterios administrativos

Figura 4.

Resultados para subcriterios administrativos en la encuesta aplicada



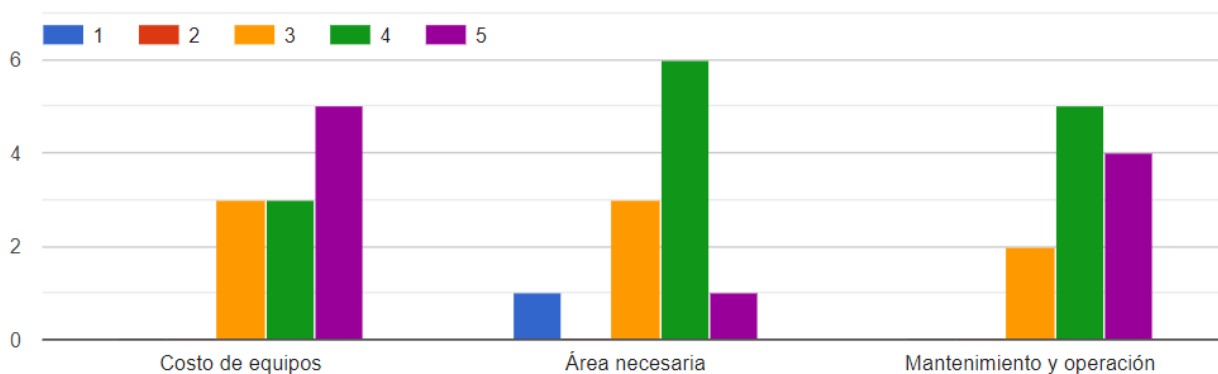
Nota: representación gráfica de la significancia de los subcriterios administrativos tenidos en cuenta en la investigación.

En el gráfico se evidencia que el subcriterio de mayor importancia en la industria minera es la experiencia dentro de esta, lo cual puede deberse a que de este dependerá la capacidad de los individuos para tomar decisiones asertivas en cuanto a su administración.

Subcriterios Económicos

Figura 5.

Resultados para subcriterios económicos en la encuesta aplicada



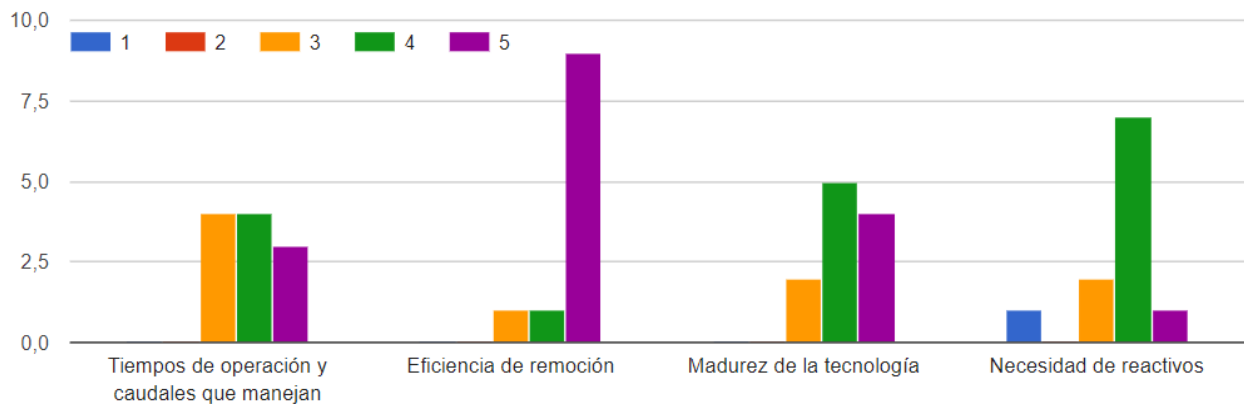
Nota: representación gráfica de la significancia de los subcriterios económicos tenidos en cuenta en la investigación.

La gráfica anterior representa la importancia que tiene para las entidades mineras el costo de equipo, el área necesaria y el mantenimiento y operación, según esto se puede decir que para más de la mitad de los encuestados el área necesaria es importante, mientras que tanto los costos como el mantenimiento y operación poseen una gran importancia para menos de la mitad del aforo encuestado.

Subcriterios técnicos

Figura 6.

Resultados para subcriterios técnicos en la encuesta aplicada



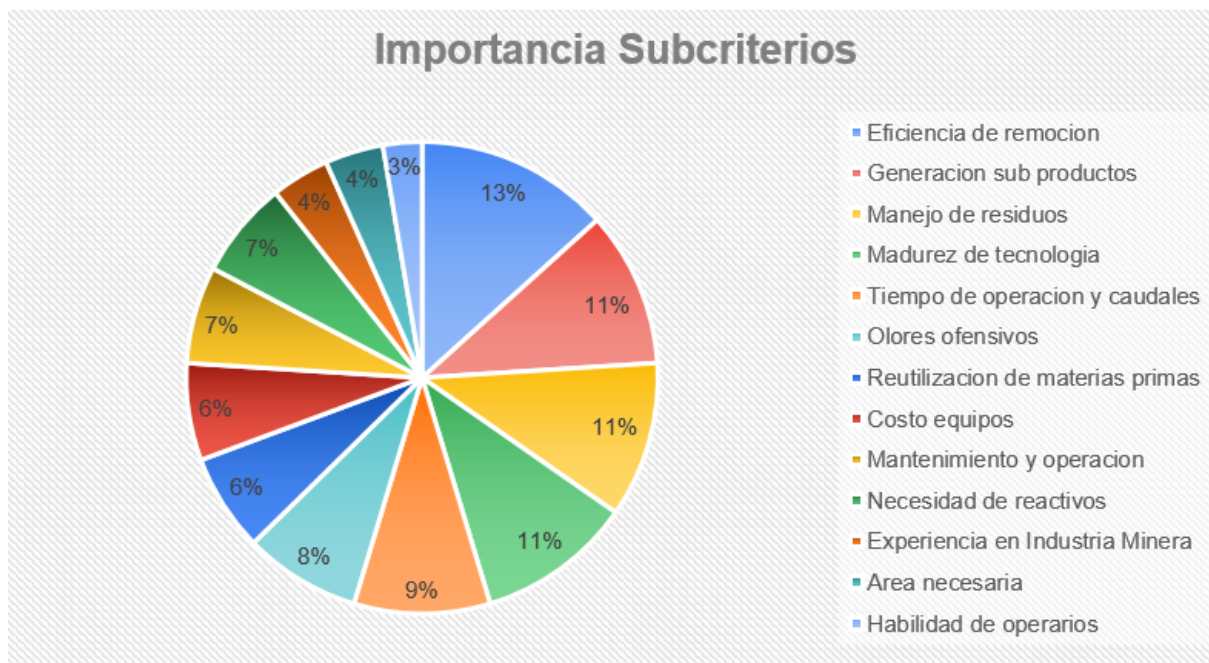
Nota: representación gráfica de la significancia de los subcriterios técnicos tenidos en cuenta en la investigación.

De la gráfica anterior es posible decir que el ítem que mayor importancia posee es la eficiencia en la remoción de masas, donde la mayoría de los encuestados le dio una puntuación de alta importancia.

Resumiendo, las gráficas anteriores, generadas con base en la encuesta aplicada a los 11 ingenieros de las distintas áreas, permitió obtener la siguiente gráfica (Figura 7) en la cual se puede ver la importancia de cada uno de los subcriterios desde el más relevante que es la eficiencia de remoción (13%) hasta habilidad de los operarios con un 3%.

Figura 7.

Diagrama de torta importancia de los subcriterios



Nota: la gráfica contiene cada uno de los criterios de selección con su respectiva relevancia.

Con el fin de generar una matriz, y con base en los resultados obtenidos en la encuesta, se generó la siguiente tabla con distintas ponderaciones para cada uno de los subcriterios según el comportamiento de este y la importancia que se haya dado cada uno de estos en la gráfica anterior. Adicionalmente, la ponderación se basó en los comportamientos que podía llegar a tomar cada una de las variables (criterios y subcriterios) para cada una de las técnicas de tratamiento de agua residual industrial minera.

Tabla 2.***Relación característica-ponderación basada en Subcriterios***

Subcriterio	Característica	Ponderación
Habilidad de operarios	Baja	2
	Alta	1
Experiencia en Industria minera	Existente	3
	no presente	1
Generación subproductos	No	8
	Si, fáciles de manejar	5
	Si, difíciles de manejar	1
Manejo de residuos	Fácil	8
	Difícil	1
Olores ofensivos	No	6
	Si	1
Reutilización de materias primas	Si	5
	No	1
Costo equipos	Bajo	5
	Medio	3
	Alto	1
Área necesaria	Baja	3
	Media	2
	Alta	1
Mantenimiento y operación	Fácil (económico)	5
	Difícil (costoso)	1
Tiempo de operación y caudales	Bajo	7
	Medio	4
	Alto	1

Eficiencia de remoción	Alta	10
	Media	8
	Baja	4
	Muy baja	1
madurez de tecnología	Alta	8
	Media	5
	Baja	1
necesidad de reactivos	No necesita	5
	Baja	3
	Alta	1

NOTA: esta tabla contiene las ponderaciones tenidas en cuenta para la elaboración de la matriz de selección desarrollada a continuación

Con la tabla desarrollada anteriormente, y la información que se maneja de cada una de las técnicas de tratamiento de agua residual, se realizó la matriz de selección propuesta, en la que las técnicas que mejor manejo tendrían en la industria minera podrían llegar a implementarse en el país, los puntajes más altos y con mayor posibilidad a llegar a usarse fueron: adsorción que residuos agrícolas o industriales y el uso de carbón activado como agente de remoción.

Tabla 3. Matriz de selección (parte 1)

		Alternativas								
Criterios	Sub criterios	Electrodialisis	Osmosis inversa	Nano filtración	Ultrafiltración	Intercambio iónico a través de resinas	Carbón activado	Nanotubos de carbón	Precipitación química	Electrocoagulación
Administrativos	Habilidad de operarios	2	2	2	2	1	2	2	1	1
	Experiencia en Industria minera	1	1	1	3	3	3	3	3	3
Ambientales	Generación subproductos	5	5	1	1	5	8	8	1	5
	Manejo de residuos	8	8	1	1	8	8	8	1	8
	Olores ofensivos	1	6	6	6	6	6	1	1	1
	Reutilización de MP	5	5	1	1	5	5	5	1	1
Económicos	Costo equipos	1	3	1	1	3	3	3	5	3
	Área necesaria	2	3	3	3	2	2	2	1	1
	mantenimiento y operación	1	5	1	1	5	5	1	5	1
Técnicos	Tiempo de operación y caudales	4	4	1	7	1	4	7	7	7
	Eficiencia de remoción	1	1	10	8	4	4	8	10	10
	madurez de tecnología	5	8	5	5	5	8	5	1	5
	necesidad de reactivos	5	5	5	5	5	3	3	1	3
	TOTAL	41	56	38	44	53	61	56	38	49

Tabla 4. *Matriz de selección (parte 2)*

		Alternativas								
Criterios	Sub criterios	Coagulación - flocculación	Electro flocculación	Flotación	Fotocatálisis	Adsorción con desechos industriales o agrícolas	Fitopláctones	Biopolímeros	Hidrogeles	Cenizas volantes
Administrativos	Habilidad de operarios	1	1	2	1	2	1	2	1	1
	Experiencia en Industria minera	3	3	3	1	3	1	3	1	1
Ambientales	Generación subproductos	5	5	1	5	5	8	5	5	8
	Manejo de residuos	8	8	1	8	8	8	8	8	8
	Olores ofensivos	1	1	1	6	6	1	6	6	6
	Reutilización de MP	1	5	1	5	5	5	1	1	5
Económicos	Costo equipos	5	3	3	1	5	3	3	3	1
	Área necesaria	1	1	1	2	2	2	3	3	2
	mantenimiento y operación	5	5	5	1	5	1	5	1	5
Técnicos	Tiempo de operación y caudales	7	7	7	7	7	1	1	1	1
	Eficiencia de remoción	4	8	4	4	10	8	8	8	1
	madurez de tecnología	8	5	1	5	8	1	5	1	5
	necesidad de reactivos	1	3	1	3	3	1	3	3	5
	TOTAL	50	55	31	49	69	41	53	42	49

Las matrices que se muestran anteriormente están basadas en los criterios y sub criterios de selección de la encuesta, a cada uno de estos ítems se les dio un valor de acuerdo con sus características individuales para cada una de la técnicas de tratamiento de agua residual con el fin de determinar la viabilidad de cada una de ellas y que tan posible sería su implementación en el proceso del tratamiento de las aguas desecho que salen de la mina con contaminantes después de ser usadas en los diversos procesos que se requieren para la extracción de los materiales.

5. CONCLUSIONES

- La contaminación por metales pesados genera afecciones a todas las formas de vida y trae complicaciones en el desarrollo económico y social del país.
- La remoción de los metales pesados del agua resultante de los procesos de minería es fundamental para que la vida y la biodiversidad no se vea afectada por el desarrollo de esta industria.
- Si bien el tema ambiental es importante este debe ir estrechamente ligado con el económico, por lo cual se deben buscar soluciones a la problemática que brinden una relación costo-beneficio que no genere pérdidas a la entidad o persona poseedora de los títulos y así sea más fácil que estas quieran implementarlas.
- La encuesta realizada a personas afines al área de la minería indicó que para un alto porcentaje de estas es importante la parte del manejo ambiental y su cuidado.
- Bajo los criterios y subcriterios de selección que se plantearon en este documento se encontró que la mejor técnica para la remoción de metales pesados es la adsorción con desechos industriales o agrícolas.

BIBLIOGRAFIA

- Agencia Nacional de Minería (s.f.) obtenido de https://www.anm.gov.co/?q=Empresas_Mineras_en_el_Especial_de_las_100_empresas_mas_grandes_Colombia_Revista_Semana
- Agencia Nacional de Minería (s.f.) obtenido de <https://www.anm.gov.co/?q=distribucion-mineria-Colombia#:~:text=De%20los%209.602%20t%C3%ADtulos%20mineros,del%20total%20de%20los%20t%C3%ADtulos.>
- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in energy and combustion science*, 36(3), 327-363.
- Agirreazkuenaga, L. (2019). Embedding sustainable development goals in education. Teachers' perspective about education for sustainability in the Basque Autonomous Community. *Sustainability*, 11(5), 1496.
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881.
- Alka, M; Kulkarni, S; Mungray, A; 2012. Removal of heavy metals from wastewater using micellar enhanced ultrafiltration technique: a review. *Central European Journal of Chemistry*, 10 (1), 27-46
- Al-Shannag, M; Al-Qodah, Z; Bani-Melhem, K; Rasool, M; Alkasrawi, M; 2015. Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance, *Chemical Engineering Journal*. 260, 749-756
- Anastopoulos, I., & Kyzas, G. Z. (2015). Progress in batch biosorption of heavy metals onto algae. *Journal of Molecular Liquids*, 209, 77-86.
- Bakar, A; Halim, A; 2013. Treatment of automotive wastewater by coagulation-flocculation using polyaluminum chloride (PAC), ferric chloride (FeCl₃) and aluminum sulfate (alum). *AIP Conference Proceedings*, p. 14.
- Barakat, M. A. (2011). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian journal of chemistry*, 4(4), 361-377.

- Beltrán-Pineda, M. E., & Gómez-Rodríguez, A. M. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172-197.
- Boamah, P. O., Huang, Y., Hua, M., Zhang, Q., Wu, J., Onumah, J., ... & Boamah, P. O. (2015). Sorption of heavy metal ions onto carboxylate chitosan derivatives—a mini-review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 116, 113-120.
- Bonecco, M. B., Martínez Sáenz, M. G., & Buffa, L. M. (2017). Chitosan, from residue to industry. *Advances in physicochemical properties of biopolymers*. Bentham e-books. Bentham Science Publishers, Sharjah, 224-256.
- Chen, Q., Luo, Z., Hills, C., Xue, G., & Tyrer, M. (2009). Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: sequent additions of fly ash, lime, and carbon dioxide. *Water research*, 43(10), 2605-2614.
- Chen, Y. et al., 2013. Accumulation and health risk of heavy metals in vegetables from harmless and organic vegetable production systems of China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.09.037>
- Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Diagnóstico Nacional de Salud Ambiental. Recuperado de: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.pdf>
- Colombia, ministerio de salud y protección social (2018), Evaluación del grado de contaminación por mercurio y otras sustancias tóxicas, y su afectación en la salud humana en la población de la cuenca del río Atrato, como consecuencia de las actividades de minería. Instituto nacional de salud. Recuperado de: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/protocolo-sentencia-t622-vcolciencias.pdf>
- Cornelis, R., M. Nordberg. 2007. General Chemistry, Sampling, Analytical Methods, and Speciation. *Handbook on the toxicology of metals*. pp 29-35
- DE, C. A. L. C., & LA, U. P. E. R. P. (2012). Sinopsis Nacional De La Minería Aurífera Artesanal Y De Pequeña Escala. Bogotá. Obtenido de

https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/mercurio/Sinopsis_Nacional_de_la_ASGM.pdf

- Espigares García, M., & Pérez López, J. A. (1990). Aguas residuales. composición. Universidad de Granada. Servicio de publicaciones, España.
- Gordillo González, M. C. (2019). Biodegradación de cianuro en aguas y suelos contaminados por la minería de oro (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).
- García Leyton, L. A. (2004). Aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impactos ambientales. Universitat Politècnica de Catalunya.
- González Prieto, N. (2019). Evaluación de la remoción de mercurio en aguas residuales, mediante la adsorción con cápsulas de borra de café gelificadas en alginato de sodio (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).
- Guzmán, G. I. G. I. (2013). Efecto del plomo sobre la imbibición, germinación y crecimiento de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L. *Biotecnología Vegetal*, 13(3).
- IDEAM, Estudio Nacional del Agua. (2014). Recuperado de: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf
- IDEAM (2014). Informe batimetría Lago de Tota. Grupo de Modelación, Subdirección de Hidrología.40p
- Huisman, J. L., Schouten, G., & Schultz, C. (2006). Biologically produced sulphide for purification of process streams, effluent treatment, and recovery of metals in the metal and mining industry. *Hydrometallurgy*, 83(1-4), 106-113.
- Ji, Y. (2015). Membrane technologies for water treatment and reuse in the gas and petrochemical industries. In *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment* (pp. 519-536). Woodhead Publishing.
- Karnib, M., Kabbani, A., Holail, H., & Olama, Z. (2014). Heavy metals removal using activated carbon, silica and silica activated carbon composite. *Energy Procedia*, 50, 113-120.
- Liu, X., & Lee, D. J. (2014). Thermodynamic parameters for adsorption equilibrium of heavy metals and dyes from wastewaters. *Bioresource technology*, 160, 24-31.

- Martínez, Zoraya & González, María. (2017). Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados, zona minera El Alacrán, Colombia. *Temas Agrarios*, 22. 21. 10.21897/rta.v22i2.941.
- Miranda, D., Carranza, C., Rojas, C. A., Jerez, C. M., Fischer, G., & Zurita, J. (2011). Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 180-191. DOI: <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2008v2i2.1186>
- Moreno García, M. A. (2017). Revisión documental sobre la presencia de metales pesados en las fuentes hídricas derivado de la actividad minera en Colombia 2010-2016. Universidad La Gran Colombia, Bogotá. Obtenido <https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5554/REVISI%C3%93N%20DOCUMENTAL%20SOBRE%20LA%20PRESENCIA%20DE%20METALES%20PESADOS%20EN%20LAS%20FUENTES%20HIDRICAS%20DERIVADO%20DE%20LA%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Navas Leiva, M. A. (2018). Análisis y propuesta para la optimización de la gestión de desechos líquidos aplicando técnicas de producción más limpia y principios de sustentabilidad. Caso de estudio: planta de faenamiento de mataderos y carnes frías Macafri CÍA. LTDA (Master's thesis, PUCE).
- Nemerow, N., & Dasgupta, A. (1988). Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos. 1998. *Ediciones Díaz de Santos*, 3.
- Ngah, W. W., Teong, L. C., & Hanafiah, M. M. (2011). Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composites: A review. *Carbohydrate polymers*, 83(4), 1446-1456.
- OMS. Efectos de la exposición al mercurio en la salud de las personas que viven en comunidades donde se practica la minería aurífera artesanal y en pequeña escala [Internet]. 2013. Disponible en: http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/mercury_asgm_es.pdf
- Paez, C., & Taborda, G. (2006). La fotocatalisis: Aspectos fundamentales para una buena remoción de contaminantes. *Revista Universidad de Caldas*, 7, 71-88.
- Polat, H., & Erdogan, D. (2007). Heavy metal removal from waste waters by ion flotation. *Journal of Hazardous Materials*, 148(1-2), 267-273.

- Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., & Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera: Heavy metals pollution in soils damaged by mining industry. *Ecología aplicada*, 5(1-2), 149-155.
- Red ALFA TECSPAR. Manual de tecnologías sostenibles de tratamientos de aguas. ISBN: 978-958-44-5307-5
- Ren, X; Chen, C; Nagatsu, M; Wang, X; 2011. Carbon nanotubes as adsorbents in environmental pollution management: A review, *Chemical Engineering Journal*. 170, 395-410
- Reyes Navarrete, M. G., Alvarado De La Peña, A. I., Antuna, D. M., García Vargas, A., González Valdez, L. S., & Vázquez Alarcón, E. D. C. (2012). Metales pesados: importancia y analisis.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz-Lagos, M., & González-Jimenez, E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación Y Desarrollo*, 16(2), 66 - 77. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5447>
- Roberto, P. D., Paredes, H., & BENDAYÁN-ACOSTA, N. Y. (1992). Determinación de metales pesados bioacumulables en especies ícticas de consumo humano en la Amazonía peruana. *Folia amazónica*, 4(2), 171-181.
- Rubio, F, D. I. C., Calderón, R. A. M., Gualtero, A. P., Acosta, D. R., & Sandoval, J. (2015). Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una revisión. *Ingeniería y Región*, (13), 73-90.
- Sánchez, A. F. A. (2020). La minería inversa en el ordenamiento jurídico en cuba. una apuesta al desarrollo sostenible desde la economía circular. *Revista Innova ITFIP*, 6(1), 71-92.
- Sarria-Villa, R. A., Gallo-Corredor, J. A., & Benitez-Benitez, R. (2020). Tecnologías para remover metales pesados presentes en aguas. Caso Cromo y Mercurio. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 12(1), 94-109.
- Singh, P. K., & Tewari, R. K. (2003). Cadmium toxicity induced changes in plant water relations and oxidative metabolism of *Brassica juncea* L. plants. *Journal of Environmental Biology*, 24(1), 107- 112

- Solano, M. (2011). Impacto ambiental por aguas residuales y residuos sólidos en la calidad del agua de la parte media-alta de la microcuenca del río Damas y propuesta de manejo. Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia, Costa Rica.
- Taylor, J. S., & Wieser, M. (2002). Membranas. In *Calidad y tratamiento del agua: manual de suministros de agua comunitaria* (pp. 707-780). McGraw-Hill Interamericana de España.
- Unidad de planeación minero energética (UPME) (2018), herramienta para la valoración y priorización de medidas de adaptación al cambio climático en el sector minero energético colombiano.
https://www1.upme.gov.co/simco/Documents/INFORME_TECNICO.pdf
- Visa, M., & Chelaru, A. M. (2014). Hydrothermally modified fly ash for heavy metals and dyes removal in advanced wastewater treatment. *Applied Surface Science*, 303, 14-22.
- Wang, J., & Chen, C. (2009). Biosorbents for heavy metals removal and their future. *Biotechnology advances*, 27(2), 195-226.
- Webster, K., & Vare, P. (2012). Balancing the whole: a dialogue around a frameworks-based education programme. *Learning for sustainability*, 395.
- Willows, R., Reynard, N., Meadowcroft, I., & Connell, R. (2003). Climate adaptation: Risk, uncertainty and decision-making. UKCIP Technical Report. UK Climate Impacts Programme.
- Zewail, T. M., & Yousef, N. S. (2015). Kinetic study of heavy metal ions removal by ion exchange in batch conical air spouted bed. *Alexandria Engineering Journal*, 54(1), 83-90.

ANEXOS

ANEXO A

Formulario Monografía Selección de técnicas de tratamiento de aguas mineras

Buen día.

El consumo excesivo y mal uso del agua han sido las principales problemáticas que generan la mayoría de las actividades humanas. A ciencia cierta no se ha cuantificado el daño que estas generan al medio ambiente, pero cada vez son más notables las consecuencias. La contaminación por metales pesados se genera principalmente por vertimientos puntuales generados por industrias, sector minero y lixiviados de vertederos. Aún con bajas concentraciones de estos contaminantes, los perjuicios para la biota son casi irreparables teniendo en cuenta que es muy difícil de tratar. Buscando resarcir las pérdidas ocasionadas, se estudian las técnicas con mayor enfoque a la sostenibilidad que se estén usando en países industrializados y con mayor experiencia en el tratamiento de aguas residuales industriales para brindar a la industria minera colombiana una oportunidad de mejora, dando calidad de vida a las comunidades que usan y viven de estos cuerpos de agua, sin dejar a un lado la eficiencia, la técnica y parte la económica.

Para esto se han tenido en cuenta 4 grupos principales de criterios para la evaluación de las técnicas, los cuales se encuentran divididos en subcriterios de la siguiente manera:

1.Ambientales

- Generación de subproductos tóxicos
- Manejo de residuos
- Generación de olores ofensivos
- Reutilización de materias primas

2.Administrativos

- Habilidad de los operarios
- Experiencia en industria minera

3.Económicos

- Costo de equipos
- Área necesaria
- Mantenimiento y operación

4.Técnicos

- Tiempos de operación y caudales que manejan
- Eficiencia de remoción
- Madurez de la tecnología
- Necesidad de reactivos

Con el fin de hacer una selección más objetiva, le pido el favor de llenar este formulario para así tabular los valores obtenidos y usando el software superdecisions, realizando un análisis multivariable, obtener las técnicas más eficientes y con mayor enfoque a la sostenibilidad, estos resultados serán utilizados para el desarrollo de mi monografía para optar por el título a especialista en gestión ambiental.

***Obligatorio**

Nombre *

Tu respuesta

Correo electrónico *

Tu respuesta

Cargo y empresa

Tu respuesta

Con la información anterior, ¿Cuál considera usted debe ser el valor que se debe tener en cuenta en cada uno de los grupos de criterios, para la selección de técnicas de tratamiento de agua residual con alto contenido de metales pesados en la industria minera? (siendo 1 lo mínimo y 5 lo máximo) *

1 2 3 4 5

Criterios ambientales

Criterios económicos

Criterios técnicos

Criterios administrativos

Sub criterios

Teniendo en cuenta los criterios de la pregunta anterior, los subcriterios de cada uno de estos que ponderación debería tener:

1. Subcriterios ambientales *

1 2 3 4 5

-Generación de subproductos tóxicos

-Manejo de residuos

-Reutilización de materias primas

-Generación de olores ofensivos

2. Subcriterios administrativos *

1 2 3 4 5

-Habilidad de los operarios

-Experiencia en industria minera

3. Subcriterios económicos *

1 2 3 4 5

-Costo de equipos

-Mantenimiento y operación

Área necesaria

4. Subcriterios técnicos *

1 2 3 4 5

-Madurez de la tecnología

-Tiempos de operación y caudales que manejan

-Necesidad de reactivos

-Eficiencia de remoción

Comentarios o recomendaciones *

Tu respuesta