

# UCUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

**“Estudio comparativo de las Tecnologías utilizadas en la Industria Minera para el Tratamiento de Aguas Residuales”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico

**Autor:**

Luis Douglas Quisirumbay Ruíz

CI: 1400891352

Correo electrónico: luisquisu1998@gmail.com

**Tutora:**

Dra. María Fernanda Uguña Rosas

CI: 0103782280

Cuenca-Ecuador

11 de junio de 2022

## Resumen

La industria minera es una de las principales fuentes para la economía del país, sin embargo, esto ha traído problemas medioambientales por la utilización de tecnologías obsoletas en el tratamiento de sus aguas.

La revisión Bibliográfica en este trabajo fue sobre las tecnologías más utilizadas en la industria minera aurífera en el tratamiento de agua residual y su comparación desde el punto de vista técnico, económico ambientales enfocados a la Economía Circular.

Según la revisión bibliográfica se encontró que las tecnologías más utilizadas para el tratamiento de aguas residuales con contenido de mercurio o cianuro, son: la tecnología de membranas con porcentaje de remoción >90% en mercurio o cianuro de 10 a 120 minutos de operación, tecnología de adsorción con porcentajes de remoción >60% de 80-1200 minutos de operación, la tecnología de intercambio iónico con porcentaje de remoción >70% en mercurio o cianuro y de 24 horas hasta 3 meses de operación, la tecnología de electrocoagulación con porcentaje de remoción >90% en cianuro o mercurio de 2 a 40 minutos de operación, tecnología de biosorción con porcentajes >10% y ≤95% de cianuro o mercurio con 15 a 120 días de operación limitando su uso para el mercurio con excepciones como la cáscara de mandarina (eficiencia= 450mg/g Hg), las tecnologías de biorremediación y fitorremediación con porcentaje de remoción >60% en cianuro o mercurio y de 3 a 48 días de operación, y la tecnología de procesos oxidativos avanzados con porcentaje de remoción >90% de cianuro y mercurio con 0,75 a 6 horas de operación.

Las tecnologías más recomendadas de acuerdo a este análisis son: adsorción, intercambio iónico, biorremediación y fitorremediación, estos permiten porcentajes de remoción >60%, económicamente resultan viables, y se relacionan con la Economía Circular como la reducción por la optimización y manejo de residuos, la reutilización y reciclaje por la disminución de descargas de agua o el uso del agua con la prevención de contaminantes, y la recuperación por la producción más limpia del recurso agua y construcción de ecoparques con intercambio de recursos, subproducto o desechos. Considerándose de esta manera tecnologías limpias, sostenibles y sustentable en el tratamiento de aguas residuales para su manejo de manera eficiente.

**Palabras claves:** Economía Circular. Minería aurífera. Tecnologías más limpias. Medidas sostenibles. Aguas residuales. Reutilización de residuo.

## Adstract

The mining industry is one of the main sources for the country's economy, however, this has brought environmental problems due to the use of obsolete technologies in the treatment of its waters.

The bibliographic review in this work was about the most used technologies in the gold mining industry in the treatment of residual water and its comparison from the technical, economic and environmental point of view focused on the Circular Economy.

According to the literature review, it was found that the most widely used technologies for the treatment of wastewater containing mercury or cyanide are: membrane technology with a removal percentage >90% of mercury or cyanide from 10 to 120 minutes of operation, technology adsorption with removal percentages >60% from 80-1200 minutes of operation, ion exchange technology with removal percentage >70% in mercury or cyanide and from 24 hours to 3 months of operation, electrocoagulation technology with percentage of >90% removal of cyanide or mercury from 2 to 40 minutes of operation, biosorption technology with percentages >10% and ≤95% of cyanide or mercury with 15 to 120 days of operation, limiting its use for mercury with exceptions such as shell tangerine (efficiency = 450mg/g Hg), bioremediation and phytoremediation technologies with removal percentage >60% in cyanide or mercury and from 3 to 48 days of operation, and process technology or advanced oxidative with removal percentage >90% of cyanide and mercury with 0.75 to 6 hours of operation.

The most recommended technologies according to this analysis are: adsorption, ion exchange, bioremediation and phytoremediation, these allow removal percentages >60%, are economically viable, and are related to the Circular Economy such as reduction by optimization and waste management, reuse and recycling due to the reduction of water discharges or the use of water with the prevention of contaminants, and recovery through the cleaner production of water resources and the construction of eco-parks with the exchange of resources, by-products or waste. Considering in this way clean, sustainable and sustainable technologies in the treatment of wastewater for its management in an efficient way.

**Keywords:** Circular Economy. Gold mining. Cleaner technologies. Sustainable measures. Wastewater. Waste reuse.

## ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN LA INDUSTRIA MINERA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUAL

### ÍNDICE DEL TRABAJO

Resumen .....	2
Adstract .....	3
ÍNDICE DEL TRABAJO .....	4
ÍNDICE DE TABLAS .....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	6
DEDICATORA.....	9
AGRADECIMIENTO.....	10
INTRODUCCIÓN .....	11
OBJETIVOS: .....	13
OBJETIVO GENERAL (OG): .....	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS (OE):.....	13
CAPITULO I: CONTENIDO TEÓRICO .....	14
1.1. Minería Aurífera .....	14
1.2. Conceptos técnicos.....	14
1.3. Flujograma del proceso de extracción minero aurífera.....	17
1.4. Proceso de amalgamación .....	19
1.5. Proceso de cianuración.....	20
1.6. Impactos Toxicológicos y Ecotoxicológicos por la extracción aurífera.....	21
1.7. Tecnologías aplicadas para el Tratamiento de Aguas Residuales (TAR) de la industria minera aurífera. ....	25
1.7.1. Tecnologías comunes para el Tratamiento de Aguas Residuales .....	25
1.7.1.1. Tecnología de membranas .....	26
1.7.1.2. Adsorción .....	30
1.7.1.3. Intercambio iónico .....	34
1.7.1.4. Biosorción.....	36
1.7.1.5. Biorremediación y Fitorremediación (Adsorción algal).....	38
1.7.1.6. Electrocoagulación.....	41
1.7.1.7. Procesos Oxidativos Avanzados (Oxidación con peróxido).....	42

1.8. Economía Circular .....	44
1.8.1. Características de una Economía Circular .....	48
<b>CAPÍTULO II: METODOLOGÍA .....</b>	<b>51</b>
2.1. Diseño y tipo de investigación .....	51
2.2. Recolección de datos.....	51
<b>CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>55</b>
3.1. Análisis: .....	55
3.1.1. Tecnología de membranas .....	57
3.1.1.1. Análisis .....	57
3.1.2. Adsorción.....	62
3.1.2.1. Análisis .....	62
3.1.3. Intercambio iónico y adsorción (zeolitas).....	66
3.1.3.1. Análisis .....	66
3.1.4. Biosorción.....	70
3.1.4.1. Análisis .....	70
3.1.5. Biorremediación y Fitorremediación .....	73
3.1.5.1. Análisis: .....	73
3.1.6. Electrocoagulación.....	78
3.1.6.1. Análisis .....	78
3.1.7. Procesos oxidativos (Oxidación con peróxido) .....	82
3.1.7.1. Análisis .....	82
3.2. Análisis comparativo.....	87
3.3. Relación de la Economía Circular .....	91
3.3.1. Conservación y eficiencia del agua.....	92
<b>CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES .....</b>	<b>97</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>102</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS .....</b>	<b>103</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. MENAS Y SUS TRATAMIENTOS PRINCIPALES .....	16
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS A CONSIDERAR EN EL PROCESO DE MEMBRANA .....	29
TABLA 3. APLICACIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE ADSORBENTES .....	33
TABLA 4. POTENCIAL OXIDANTE DE AGENTES OXIDANTES CONVENCIONALES .....	43
TABLA 5 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS OXIDATIVOS AVANZADOS.....	43
TABLA 6. LÍMITES DE DESCARGA EN BASE A NORMA NACIONAL Y AMERICANA .....	55
TABLA 7. INDICADORES PARA TECNOLOGÍAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA .....	56
TABLA 8. PARÁMETROS DE CONTROL EN LA TECNOLOGÍA MEMBRANA.....	57
TABLA 9. PARÁMETROS DE CONTROL .....	58
TABLA 10 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PARA MERCURIO SEGÚN EL LÍMITE PERMITIDO.....	58
TABLA 11 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PARA CIANURO SEGÚN EL LÍMITE PERMITIDO .....	59
TABLA 12. COMPARACIÓN DE CONCENTRACIÓN INICIAL Y FINAL.....	60
TABLA 13. PARÁMETROS DE CONTROL PARA LA TECNOLOGÍA DE ADSORCIÓN .....	62
TABLA 14. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL.....	63
TABLA 15 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PARA MERCURIO SEGÚN EL LÍMITE PERMITIDO.....	63
TABLA 16 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PARA CIANURO SEGÚN EL LÍMITE PERMITIDO .....	64
TABLA 17. PORCENTAJE DE ADSORCIÓN EN BASE A VARIABLES DE PROCESO .....	65
TABLA 18. PARÁMETROS DE CONTROL EN LA TECNOLOGÍA DE INTERCAMBIO IÓNICO .....	67
TABLA 19. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL.....	67
TABLA 20 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PARA MERCURIO SEGÚN EL LÍMITE PERMITIDO.....	67
TABLA 21 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PARA CIANURO SEGÚN EL LÍMITE PERMITIDO .....	67
TABLA 22. PARÁMETROS DE CONTROL DE LA TECNOLOGÍA DE BIOSORCIÓN .....	70
TABLA 23. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL.....	71
TABLA 24 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PARA MERCURIO SEGÚN EL LÍMITE PERMITIDO.....	71
TABLA 25 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PARA CIANURO SEGÚN EL LÍMITE PERMITIDO .....	71
TABLA 26. PARÁMETROS DE CONTROL PARA LA TECNOLOGÍA DE BIORREMEDIACIÓN.....	74
TABLA 27. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL.....	74
TABLA 28 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PARA MERCURIO SEGÚN EL LÍMITE PERMITIDO.....	75
TABLA 29 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PARA CIANURO SEGÚN EL LÍMITE PERMITIDO .....	75
TABLA 30. PORCENTAJES DE REMOCIÓN PARA DISTINTOS MICROORGANISMOS .....	76
TABLA 31. PARÁMETROS DE CONTROL PARA LA TECNOLOGÍA DE ELECTROCOAGULACIÓN ..	79
TABLA 32. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL.....	80
TABLA 33 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PARA MERCURIO SEGÚN EL LÍMITE PERMITIDO.....	80
TABLA 34 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PARA CIANURO SEGÚN EL LÍMITE PERMITIDO .....	80
TABLA 35. CONDICIONES DE REMOCIÓN PARA MERCURIO EN ELECTROCOAGULACIÓN. ....	81
TABLA 36. PARÁMETROS DE CONTROL PARA LA TECNOLOGÍA DE PROCESOS OXIDATIVOS ..	83
TABLA 37. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL.....	84
TABLA 38 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PARA MERCURIO SEGÚN EL LÍMITE PERMITIDO.....	84
TABLA 39 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PARA CIANURO SEGÚN EL LÍMITE PERMITIDO .....	85
TABLA 40. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TECNOLOGÍAS ESTUDIADAS .....	87
TABLA 41. MEDIDA DE EFICIENCIA VERSUS PORCENTAJE DE AHORRO.....	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

ILUSTRACIÓN 1. PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ORO .....	17
ILUSTRACIÓN 2. ESTRATEGIAS CON ENFOQUE HACIA EL PROCESO.....	93

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Luis Douglas Quisirumbay Ruiz, autor del trabajo de titulación "Estudio comparativo de las Tecnologías utilizadas en la Industria Minera para el Tratamiento de Aguas Residuales" certifico que todas las ideas, opiniones y contenido expuesto en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 11 de junio de 2022



---

Luis Douglas Quisirumbay Ruíz

C.I: 1400891352

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Luis Douglas Quisirumbay Ruiz en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Estudio comparativo de las Tecnologías utilizadas en la Industria Minera para el Tratamiento de Aguas Residuales", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 11 de junio de 2022



---

Luis Douglas Quisirumbay Ruiz

C.I: 1400891352



## DEDICATORA

A Dios, familia y amigos.

## AGRADECIMIENTO

A Dios por su compañía y guía. Por haber sido a lo largo de la carrera mi apoyo, camino y fortaleza que, a pesar de muchas veces alejarme de él, él nunca se alejó de mí. Porque aún creo y camino por fe.

A mi tutora, Doctora María Fernanda Uguña por su apoyo desinteresado, por sus virtudes y conocimientos, virtudes que me han permitido culminar este trabajo. Sus consejos y palabras de alientos forman parte importante de mi historia tanto profesional como humana.

A la Universidad de Cuenca, mi eterna alma máter, por los conocimientos brindados que me permitieron realizarme como profesional. Gracias a los profesores de la Carrera de Ingeniería Química por su paciencia y dedicación. Y a mis compañeros por todas las horas de trabajo juntos que permitieron nuestra formación.

A mis padres y hermano que, sin su apoyo no hubiera sido posible alcanzar mi sueño, fueron quienes me dieron las herramientas necesarias en mis horas de estudio. Han sido y serán la mejor guía para mi vida.

A mis amigos por su apoyo y fuerza, por acompañarme en los mejores y peores momentos.

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación está relacionada a la industria minera aurífera con el fin de identificar las actuales tecnologías para el tratamiento de aguas residuales y la relación que tienen con la Economía Circular dirigida a la sostenibilidad de los procesos y gestión de residuos para una producción más limpia.

Uno de los puntos importantes a considerar en este análisis es la aplicación de tecnologías que permiten una alta remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales afectadas por los procesos de extracción aurífera. Se puede nombrar los procesos de pretratamiento, procesos primarios, secundarios y terciarios; siendo los terciarios los que permiten una limpieza casi total o bajo estándares permitidos del agua residual. De esta manera se puede lograr la reutilización de agua en el proceso de extracción aurífera implementando así uno de los principios de la Economía Circular o pueden a su vez ser devuelta nuevamente a sus efluentes minimizando el riesgo de contaminación.

Se han encontrado estudios de tecnologías tales como membrana, adsorción, intercambio iónico, biorremediación, electrocoagulación y procesos oxidativos avanzados como alternativas novedosas, seguras y rentables en el tratamiento de efluentes contaminados por la industria aurífera. La contaminación de agua por la industria aurífera requiere nuevas posibilidades tecnológicas que ayuden con efectividad la remoción de contaminantes presentes en el agua. Por lo tanto, es necesario identificar cuáles son las tecnologías más adecuadas tomando en cuenta medidas sostenibles y amigables con el medio ambiente que permitan una correcta gestión de los residuos y poder reconocer la eficiencia de las mismas en el tratamiento de efluentes.

Ecuador es uno de los países de Centro y Sudamérica que posee niveles de extracción aurífera elevados, con 13,5 toneladas solamente en el primer semestre del último año (World Gold Council, 2020).

Se considera a la industria minera aurífera como un sector estratégico necesario para el desarrollo del país en el aspecto tecnológico, económico y social por lo que es necesario la implementación de tecnologías enfocadas en la protección de la naturaleza y el ser humano. Informes recientes de la OMS, mencionan que al menos dos mil millones de personas no poseen agua limpia en todo el mundo (OMS, 2019). El Desarrollo de Recursos Hídricos en el Mundo informa que para el 2050 más de seis mil millones de personas no tendrían acceso por escasez a agua dulce en todo el mundo (Boretti & Rosa, 2019).

En la actualidad la industria minera aurífera en Ecuador es una de las que más contamina por el impacto de los efluentes. En 2020 se dio una demanda internacional de Perú, donde los agricultores del Departamento de Tumbes reclaman la supuesta contaminación de la cuenca del río Puyango-Tumbes lo que ha puesto en riesgo la flora, fauna y a 200 000 personas (Primicias,2021). Así mismo, se identificó niveles elevados de mercurio hasta 500 veces los límites permitidos al norte del país de Ecuador en la provincia del Napo. (Mongabay, 2019) Y distintas investigaciones que aseveran la contaminación de los efluentes por cianuro y mercurio en la actividad aurífera en el Ecuador (Guaicha & Correa, 2017; Oviedo et al., 2017; Vilela, Espinosa & Bravo, 2020).

Esto pone en manifiesto la posibilidad por parte de las industrias mineras auríferas que las tecnologías utilizadas hoy en día para aguas residuales resultan obsoletas o simplemente no se desarrolle ningún tipo de tratamiento para las aguas residuales y que cada vez incrementen más por la aparición de nuevas fuentes de extracción de oro (OMS, 2018).

De la misma manera, una de las provincias más perjudicadas por la actividad minera aurífera en el Ecuador es la provincia del El Oro, generando los visibles impactos ambientales a nivel de suelo y agua como consecuencia de un mal manejo en la extracción aurífera y con su mayor implicación, su impacto ecotoxicológico a nivel del flora y fauna (Estudio de Gestión, 2020). Por lo que se vuelve necesario la implementación de tecnologías sostenibles y sustentables a favor de un ecosistema libre de contaminación por mercurio o cianuro.

## **OBJETIVOS:**

### **OBJETIVO GENERAL (OG):**

Realizar un estado del arte sobre las tecnologías utilizadas para el tratamiento de aguas residuales de la industria minera comparándolas desde el punto de vista técnico, económico ambiental y su relación con la economía circular.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS (OE):**

- ❖ Realizar una revisión bibliográfica sobre las tecnologías más utilizadas en la industria minera aurífera en el tratamiento de aguas residuales para la remoción de mercurio y cianuro.
- ❖ Definir cómo se relaciona la Economía Circular en la industria minera para su posible aplicación.

### **HIPÓTESIS:**

- ❖ En la actualidad existen tecnologías para la remoción de mercurio y cianuro de los efluentes provenientes de la minería aurífera, que permiten cumplir con los límites máximos de descarga a un cuerpo de agua dulce, establecidos en el TULSMA: cianuro 0,1mg/l y mercurio 0,005mg/l.

## CAPITULO I: CONTENIDO TEÓRICO

### 1.1. Minería Aurífera

La actividad minera es considerada en muchas regiones del mundo como la base del desarrollo económico. Generalmente se puede encontrar tres tipos de minería; energética (petróleo, gas, esquisto, carbón), no metálica (como grava, arcilla, sal, caliza, entre otros) y metálica (hierro, cobre, plomo, níquel, oro, entre otros) (Jakovljević, Randelović & Mišljenović, 2021).

La minería aurífera es una actividad económica que consta de fases importantes: prospección, exploración, explotación, extracción, fundición, refinación, comercialización y cierre de mina (Ley de Minería, 2020). Entre los minerales metálicos hay subclasificaciones como los metales preciosos, siderúrgicos, nucleares, especiales y ligeros. En los metales preciosos es donde se encuentra el mineral de interés que es el oro. Esta actividad económica se desarrollará en una mena que puede encontrarse en el suelo o subsuelo (B.C.E., 2016).

En Ecuador los principales minerales en extracción son: Oro, plata, arcilla, caliza, caolín, feldespato, sílice, pómez, zeolitas, bentonitas y mármol.

En cuanto a los yacimientos auríferos se puede encontrar en incrustaciones directamente en un mineral (minerales elementos constituidos directamente por el metal puro), mesotermales (relacionado a rocas ígneas de profundidad media por la formación de rocas ígneas), oro en cobre (oro nativo) y epitermales (depósitos de poca profundidad generado por fluidos hidrotermales). Y dependiendo la forma encontrada en los yacimientos dependerá la operación de extracción (Barriga, 2019).

### 1.2. Conceptos técnicos

**Toxicidad:** describe el grado en el cual una sustancia es venenosa o puede causar una lesión. La **toxicidad** depende de diferentes factores: dosis, duración y ruta de exposición, forma y estructura de la sustancia química y factores humanos individuales. Puede clasificarse como aguda y crónica. La aguda hace

referencia a un proceso rápido de daño y la crónica es dañina, pero en un determinado tiempo (Repetto & Repetto, 2009).

**Tóxico:** toda sustancia química con la capacidad de generar daño o efectos fatales al ser expuesta a personas, animales o plantas. Una forma de medirlo se basa en la evaluación de dosis y respuesta para identificar la cantidad en la cual puede llegarse a convertir en un tóxico (Repetto & Repetto, 2009).

**Ecotoxicidad:** Toxificación relacionada al ambiente, involucra ramas como la ecotoxicología, ecología y tecnología ambiental (Repetto & Repetto, 2009).

**Bioacumulación:** Criterio de caracterización referida a la acumulación a través del tiempo de sustancias en el organismo por medio de fuentes bióticas o abióticas (Repetto & Repetto, 2009).

**Oro:** El oro es un elemento químico inerte a temperatura ambiente con símbolo Au, se considera un metal precioso con color amarillento pálido en condiciones naturales. Entre sus propiedades físicas destacan su maleabilidad, ductilidad y alto peso específico ( $G=19,32$ ).

Es importante conocer la mineralogía del oro ya que de esta forma se puede predecir y resolver algún tipo de problema relacionado a su procesamiento (Barriga, 2019). En la siguiente tabla se especifica las principales menas de oro con su respectivo tratamiento.

*Tabla 1. Menas y sus tratamientos principales*

Tipos de mena	Tratamiento
Oro libre	Gravedad (material grueso) cianuración (material fino)
Asociado a sulfuros	Flotación, tostación, oxidación, presión, cianuración.
Oro con As o Sb	Flotación, tostación, oxidación, presión, cianuración.
Asociado a Teluros	Flotación, fundición, oxidación, cianuración.
Oro con Cobre	Electrorefinación, SART (Sulfitación, acidificación, reciclado y espesado)
Oro con Pb y Zn	Flotación, electrólisis
Oro de río	Intercambio iónico
Oro orgánico	Tostación, oxidación, cianuración.

*Fuente: Barriga, 2019*

**Tecnologías más limpias para la remoción de contaminantes:** Se trata del uso de tecnologías de alta eficacia en la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales aplicada a las descargas generadas por la actividad minera con la finalidad de minimizar el impacto generado a nivel del ecosistema, por ende, es necesario mejorar procesos, productos y servicios desde una producción más limpia ayudando de esta manera a un buen entorno ambiental disminuyendo la producción de desechos (Valera, 2003). Serán descritas más adelante.

**Medidas sostenibles:** Es un principio enfocado al desarrollo humano tomando en cuenta los recursos naturales y los distintos servicios que puede ofrecer el ecosistema sin que esto signifique dañar su integridad (León, 2012; Guerrero, 2003). Por lo que se trata de medidas de manejo ambiental.

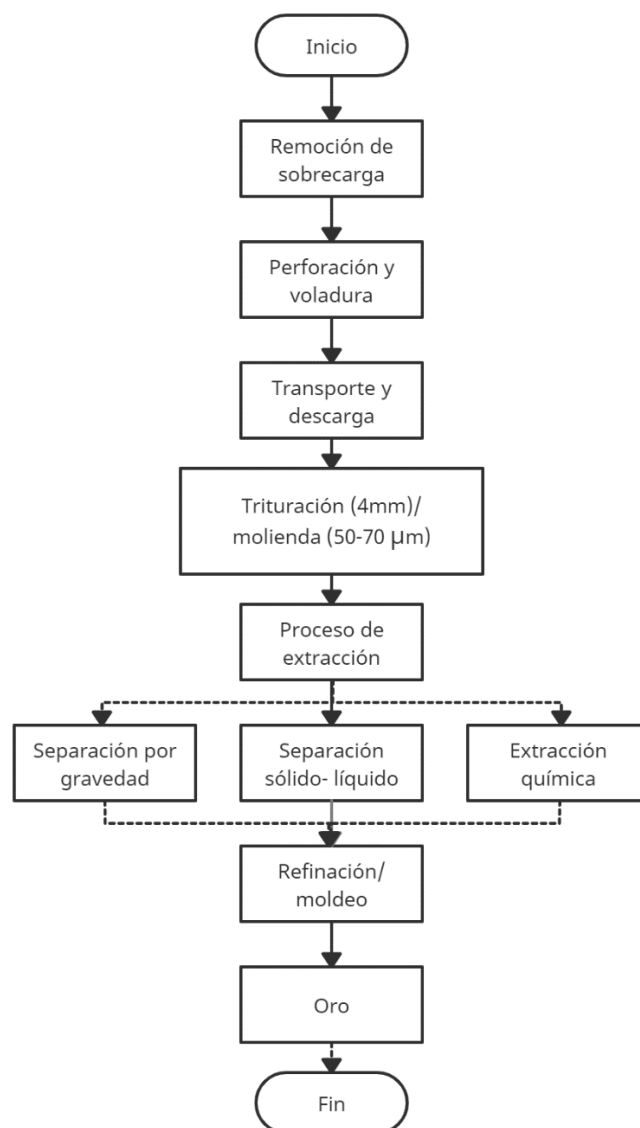


**Aguas residuales:** Es el agua procedente de agua natural o de cualquier uso realizado por el humano, pudiendo ser urbanas, domésticas e industriales (Robles & Rojo, 2011).

### 1.3. Flujograma del proceso de extracción minero aurífera

A continuación, se presenta un flujograma que forma parte del proceso de producción del oro, en este caso al encontrar al oro como mineral dentro de roca hasta obtener el oro puro:

*Ilustración 1. Proceso de extracción de oro*



*Fuente: Autor*

Existen variaciones en el proceso de extracción y refinación, pero fundamentalmente son la perforación, voladura, transporte, descarga, trituración, molienda, extracción, purificación y moldeo (Iyer & Gorain, 2019).

Otros autores determinar 3 etapas cruciales en la minería aurífera de acuerdo a la extracción, está formado por: exploración, explotación y la restauración (Bolenlen, 2015). o conminución, separación y procesamiento de mineral (Spitz & Trudinger, 2019).

De esta manera se entiende que los procesos de minería aurífera dependerán de varios factores como la naturaleza y caracterización del oro, lo cual conlleva a distintos tipos de tratamientos a nivel industrial.

Con respecto al flujograma, se empieza por los estudios necesarios para la identificación de zonas con presencia de mineral. Si se ha identificado la presencia de mineral empieza la etapa de explotación o minado por medio de perforaciones con detonaciones para la exposición de mineral a la superficie o recolecciones de muestra. La litología, composición mineralógica y características geológicas sobre el yacimiento de oro deben ser conocidas a detalle. Es posible tener muchas variaciones con respecto al oro, por lo que es necesario analizar muestras que permitan diseñar una industria óptima (Yannopoulos, 1991).

El material liberado es transportado hacia la etapa de trituración para conseguir un tamaño alrededor de 40mm aproximadamente.

El material triturado pasa por una etapa de molienda en donde se reduce a tamaños que están entre algunos 50 a 70 $\mu$ m, de esta manera se consigue liberar las partículas de oro. (Yannopoulos, 1991) Este material es transportado a la etapa de extracción que es la etapa crucial para la obtención del oro, en ellas están distintos tipos de procesos como la separación por gravedad y/o extracción química, siendo las más más utilizadas la de cianuración y amalgamación (Spitz & Trudinger, 2019).

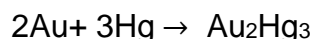
Posterior a su extracción y dependiendo el proceso químico aplicado se recupera el oro de su compuesto afín limpiándolo y purificándolo mediante distintas técnicas como la sedimentación, aglomeración, autoclave, entre otros. Una vez limpiado y purificado se lleva a cabo una etapa final de fundición a 1500°C. Luego de un tiempo determinado se enfría y moldea (Iyer & Gorain, 2019).

## 1.4. Proceso de amalgamación

El oro tiene la capacidad de formar aleaciones con distintos metales entre ellos el mercurio que puede formar amalgamas (solución sólida de mercurio y oro) indispensables para la extracción de oro superior a 0,074mm hasta 1,5mm permitiendo la selección y eliminación de otros tipos de minerales que están asociados al oro (Valderrama et al., 2012).

Todo oro libre y limpio es capaz de amalgamarse fácilmente, por lo que estudios para la evaluación de otro tipo de componente asociado al mineral como la presencia de sulfuros debe llevarse cuidadosamente puesto que puede producir pérdidas del mineral precioso.

Normalmente la reacción generada entre el oro y mercurio es la siguiente:



Pero se puede encontrar en distintas formas como  $\text{Au}_4\text{Hg}$ ,  $\text{Au}_3\text{Hg}$  y  $\text{Au}_2\text{Hg}$ , entre otros; considerando sistemas binarios Au-Hg (Chudnenko & Palyanova, 2013; Yannopoulos, 1991).

La amalgamación es un método para la recuperación del oro en sus distintas formas: oro aluvial, oro de superficie limpia, oro de superficie sucia y oro en solución sólida. (Alvarado & Ochoa, 2019) Se forma por el contacto entre el oro y mercurio en solución acuosa logrando la capturar del 70% de oro (Alvarado & Ochoa, 2019).

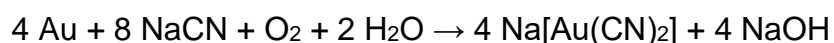
Este proceso de amalgamación es aplicado a todo el mineral en donde se generan relaves con contenido de mercurio alrededor del 70%. Para la separación del Au-Hg se utilizan dos técnicas: química y térmica, siendo la térmica la más utilizada, pero de extrema peligrosidad por la creación de vapores tóxicos, pero que pueden ser controlados por medio de tortas basada en un sistema de condensación (Alvarado & Ochoa, 2019).

## 1.5. Proceso de cianuración

Es un proceso convencional que utiliza dos elementos importantes que son el oxígeno obtenido del aire y el ion  $\text{CN}^-$ , que sirven como oxidante y medio complejante respectivamente. Esto permite que el oro se disuelva en una solución compuesta por agua y cianuro de sodio o potasio en presencia de oxígeno.

Uno de los procesos más utilizados para la recuperación del oro es la de Merrill-Crowe, el cual inicia con la trituración y aglomeración de la mena para posteriormente realizar la lixiviación con Cianuro, una vez lixiviado se procede a la precipitación de oro con el uso de polvo de zinc. Este precipitado puede someterse a fundición para la obtención del metal.

La base del **proceso de cianuración** se basa en el hecho que las soluciones de cianuro de potasio o sodio tienen una disolución preferencial por las partículas de oro metálico y plata que sobre la mayoría de otros materiales normalmente encontrado en minerales de oro.



Se trata de un proceso electroquímico en el que el oxígeno recoge electrones del oro en una zona catódica, los iones de oro, mientras son rápidamente acomplejados por el cianuro alrededor de la zona anódica para formar el complejo soluble dicianoaurato de sodio (Salinas, et. Al., 2004).

## 1.6. Impactos Toxicológicos y Ecotoxicológicos por la extracción aurífera.

En la parte medioambiental, en el proceso de extracción se puede señalar distintos problemas dados por la explotación minera y el uso de mercurio en ella, como la destrucción de flora y fauna (Zapata, 2020). Si se considera cada uno de los procesos de extracción aurífera se evidencia el daño medioambiental desde la voladura, ya que daña las fuentes hídricas, por temas de limpieza en el lugar de extracción la flora y fauna se ven afectadas. En cuanto a el agua como materia del proceso extractivista, este se encuentra presente en la separación por gravimetría y/o extracción química necesaria para recuperar el oro del material previamente molido (Díaz, 2014).

La contaminación generada por metales pesados provenientes de distintas industrias como la de fertilizantes, combustibles, energía, fundición y minería, es uno de los principales problemas ambientales (Leyte-Vidal et al., 2019).

Así mismo se generan problemas en tierras agrícolas, contaminación en aguas subterráneas y superficiales que se evidencian en sus valores de contenido de metales pesados, materia orgánica, conductividad, pH, entre otros (Lozada, 2017; García et al., 2020).

Se han encontrado distintos residuos altamente tóxicos provenientes de la minería que pueden contaminar aguas y biodiversidad, por lo que se le considera a la minería como una de las principales causas del daño al ecosistema acuático (Licona & Negrete, 2019; Mancilla et al., 2020).

Por lo general, en ríos cercanos a las industrias mineras se puede encontrar altos niveles de metales pesados en sedimentos afectando la biota acuática (Mora et al., 2016).

Un estudio desarrollado en la Universidad Técnica de Machala demostró la presencia de mercurio en sedimentos y raíces de mangle, y moluscos en la

Provincia del Oro proveniente del drenaje fluvial por la descarga de efluentes de minería, se desarrolló un análisis de riesgo ambiental y ecotoxicológico para la cuantificación del contaminante encontrando un nivel superior de mercurio en base a estándares de Canadá (0,49 mg/Kg).

De esta manera se establece una relación donde por cada gramo de oro producido, de 1,2 a 1,5 g Hg son emitidos al medio acuático y terrestre (Alvarado & Ochoa, 2019).

## **Mercurio**

El Mercurio es un elemento químico altamente tóxico presente en el proceso de extracción del oro que se lo considera como uno de los principales problemas ambientales (Leyte-Vidal et al., 2019).

Forma parte de los metales pesados y dentro de sus características generales se lo puede definir como bioacumulable, elevada toxicidad, y persistente en el medio.

Según el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente con respecto a la norma de "Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua" (TULSMA Libro VI anexo 1), la concentración máxima permitida para aguas de consumo humano y doméstico es de 0,002mg/l, para preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces es 0,0002mg/l de tal forma que no afecte la flora y fauna, pero los límites de descarga a cuerpos de agua se encuentran a 0,005mg/l (AME, 2017).

El Mercurio está presente en la corteza terrestre y puede liberarse de manera natural o antropológica. Se estima que alrededor de 1000 toneladas de Mercurio se liberan anualmente a nivel mundial (Medina, 2020). Puede transformarse a su forma más tóxica por presencia de microorganismo orgánicos lipofílicos a Metilmercurio el cual posee una característica de biomagnificación en la cadena alimentaria (Tabibian et al., 2020).

El efecto que posee el Mercurio se puede evidenciar a lo largo de toda la cadena trófica: microorganismos, plantas e invertebrados acuáticos, peces, y mamíferos incluyendo al hombre (Herrera Castillo, 2021). Puede ser aspirado por los trabajadores de la zona y aledañas generando el “Mal de Minamata” (Leyte-Vidal et al., 2019; Fernández Villalobos, 2019).

Uno de los casos de estudio más conocidos se da en la bahía de Minamata cuando se liberó Mercurio, lo que produjo intoxicaciones masivas relacionados a casos carcinogénicos, mutagénicos, teratogénicos y letales por el consumo de pescado contaminado con Metilmercurio (Medina, 2020). Estos contaminantes poseen un proceso de metilación que no permite su fácil eliminación del organismo, se estima un tiempo de permanencia de 39 a 70 días, lo suficiente para causar daño por toxicidad aguda (Licona & Negrete, 2019).

El mercurio, y sobre todo su derivado, el metil-mercurio por medio de las reacciones químicas y biológicas puede fácilmente terminar siendo parte de la cadena trófica al bioacumularse en la proteína de los peces (Panduro et al., 2020). El pescado, en su mayoría especies de bagre, forma parte para algunas localidades de la ingesta diaria, a nivel mundial se estima que un 20% del consumo de proteínas es de este origen animal, y para el caso de Colombia, representa un 90% de su ingesta (Licona & Negrete, 2019).

El problema con el pescado se da porque no es posible eliminar por métodos de limpieza o cocción los compuestos contaminantes (Panduro et al., 2020).

## **Cianuro**

El cianuro es un compuesto utilizado en la industria minera en el proceso de lixiviación, es considerado de gran peligrosidad y puede generar problemas ambientales. (Guerrero, 2015). La toxicidad dependerá de su forma, pudiendo ser gas, líquida o sólida. Puede presentarse como cianuro de hidrógeno (gas), cianuro de sodio (sólido) o cianuro de potasio (Guerrero, 2015).

En la industria minera se da el uso de cianuro de sodio, pero al disolverse en el agua puede convertirse nuevamente en cianuro de hidrógeno la cuál es la forma más peligrosa.

Según el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente con respecto a la norma de “Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua” TULSMA ( Libro VI anexo 1) la concentración de cianuro total, máxima permitida para aguas de consumo humano y doméstico es de 0,2mg/l, para preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces es 0,01mg/l de tal forma que no afecte la flora y fauna, pero los límites de descarga a cuerpos de agua se encuentran a 0,1mg/l (AME, 2017).

El cianuro puede encontrarse en la naturaleza por el excretado y degradado de plantas, insectos, animales, bacterias y hongos pudiendo llegar a ser parte de la cadena trófica sobre todo de las plantas que producen la muerte en animales e intoxicaciones para el ser humano. Como compuesto para la minería aparece a finales del siglo XIX, estipulando hoy en día que el 18% de cianuro de sodio se utiliza para el proceso de lixiviación de oro a nivel mundial.

Con respecto a los problemas de la salud humana, este puede ser absorbido por el torrente sanguíneo, puede inhibir sistemas enzimáticos teniendo entre los más importantes el bloqueo de oxígeno produciendo hipoxia celular. (Atehortúa & Mejía, 2019). Entre los problemas a considerar del cianuro esta su nocividad y letalidad. (Bardales et al., 2017).

En forma líquida puede ser absorbido por los tractos gastrointestinal y respiratorio. (Ordoñez et al., 2021). Entre los síntomas más comunes por intoxicación por cianuro en una concentración de 4-4,9 ug/l están los cambios en la piel, insomnio, vómito, confusión, pérdida de dientes, dolor de cabeza y pérdida de memoria. (López et al., 2019). Dependiendo de su dosis podrá presentar toxicidad aguda, crónica, subaguda o subcrónica.



En cuanto a los efectos ambientales por la presencia de cianuro en ríos, estos son muy parecidos al del mercurio pudiendo afectar cauces de ríos y su bioacumulación en animales o plantas, considerándose al ecosistema más vulnerable la fauna acuática en los diferentes eslabones de la cadena trófica produciéndose el proceso de biomagnificación (Guerrero, 2015).

Otro problema que puede suscitarse al momento de extracción de oro es cuando se está extrayendo algún mineral con presencia de azufre o compuesto afín, esto genera la presencia de ácido sulfúrico al momento de realizar la lixiviación dando la posibilidad de que desencadene una serie de problemas medioambiental por su peligrosidad (Martínez & Casallas, 2018).

## **1.7. Tecnologías aplicadas para el Tratamiento de Aguas Residuales (TAR) de la industria minera aurífera.**

### **1.7.1. Tecnologías comunes para el Tratamiento de Aguas Residuales**

La creación de industrias en distintas áreas ha traído consigo la aparición de procesos unitarios para el tratamiento de residuos sólidos, líquidos o gaseosos que si no cuentan con un buen procesamiento que se encuentren bajo estándares reglamentarios constituyen una potencial fuente de contaminación ambiental (Harja et al., 2013).

En Ecuador, se necesita de siete a ocho mil litros de agua para la obtención de una onza de oro (MPCEIP, 2021). El agua que ha sido utilizada por la industria se convierte en agua residual que necesita de una técnica para la reutilización o descarga al medio ambiente. Estas técnicas están enfocadas en el uso de tecnologías que ayuden a proteger la salud y el medio.

Los tratamientos dependerán del tipo de industria por lo que es necesario el estudio del efluente, requisitos y flexibilidad del proceso, y las posibles opciones para eliminar el contaminante (Jawadand & Randive, 2021).

Las distintas tecnologías aplicadas ya han sido discutidas, donde el diseño de los equipos y la operación aún son considerados un desafío, de esta manera se debe discurrir que todas las tecnologías tienen sus propios límites técnicos y económicos cuando se trata de la implementación en la vida real.

De manera general se puede nombrar a los tratamientos como: preliminar, primario, secundario y avanzado o terciario. Entre las tecnologías utilizadas convencionalmente se encuentra el cribado, decantación, sedimentación, coagulación, floculación, filtración, tratamientos químicos como la oxidación o precipitación (De Souza et al., 2021)

El uso de tecnologías más limpias se da con el objetivo de minimizar impactos ambientales y recuperación de recursos hídricos. Actualmente se cuenta con métodos que incluyen la electrocoagulación, cementación, tecnología de membranas, filtración, extracción, adsorción y biosorción las cuales permiten un correcto procesamiento a los contaminantes industriales que pueden producirse (Harja et al., 2013).

Con el desarrollo que se ha producido en el sector minero, se han generado más residuos perjudiciales para el medioambiente, produciendo así el avance de tecnologías que permitan una correcta tecnificación con alternativas para transformar un residuo en un nuevo producto y la obtención de una gestión sostenible (Jawadand & Randive, 2021). Las mismas que se enumeran a continuación:

### **1.7.1.1. Tecnología de membranas**

**Definición:** Son un grupo de técnicas físicas que actúan como barreras semipermeables permitiendo la separación de dos fases que tienen como objetivo permitir el movimiento de moléculas de forma selectiva (Gamarra, 2017). Este proceso puede ser utilizado para sustancias contaminantes.

Entre las principales características están:

- Permitir la separación de contaminantes de forma selectiva.
- Elimina contaminantes en bajas concentraciones de efluentes.
- Proceso llevado a temperatura ambiente.
- Proceso sencillo debido a que puede trabajar sin la intervención humana.
- Ensuciamiento de la membrana si no se le da un uso correcto con respecto a limpieza y compatibilidad de la membrana con el contaminante.

En los años 70 se desarrolla la membrana de ósmosis inversa (OI) a partir de un polímero de acetado de celulosa, esta membrana era capaz de retener la sal y dejar pasar el agua a una cierta presión y caudal de trabajo. Desde este punto se empezó a crear una gama de filtros de membranas con aplicaciones específicas (Drioli et al., 2011).

Los procesos principales en la tecnología de membrana son: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa y electrodiálisis.

**La microfiltración:** permite la separación de partículas de tamaños dadas entre 0,05 y 10 $\mu\text{m}$ , son usadas normalmente para la retención de sólidos suspendidos como en pretratamientos o etapa de limpieza (Solís, Vélez & Ramírez, 2017).

**La ultrafiltración:** los contaminantes que pueden ser retenidos son los sólidos suspendidos y compuestos de alto peso molecular, su rango de separación está de 0,001 a 0,1  $\mu\text{m}$  (Gamarra, 2017).

**El proceso de ósmosis:** se basa en la separación de una membrana semipermeable de una disolución sólida y otra de agua la cual provoca un gradiente de concentración y el movimiento de agua hacia la solución salina produciendo un equilibrio osmótico y aumento de presión la cual se conoce como presión osmótica (Mego, 2016).

**La ósmosis inversa:** se da en un flujo contrario donde el agua que se encuentra en la solución salina pasa hacia el lado de la solución acuosa con mayor cantidad de agua. El tamaño de las partículas a separar es de  $0,0001 \mu\text{m}$  a  $0,001\mu\text{m}$  (Mego, 2016). La ósmosis inversa es útil para el tratamiento de efluentes municipales e industriales. Entre las aplicaciones que más destaca esta la desalinización de agua, sin embargo, se lo puede encontrar en otro tipo de industrias adaptándola a muchos procesos industriales como:

- Industria química
  - Industria de alimentos
  - Industria farmacéutica
  - Industria textil
  - Industria de Carbón
  - Industria electrónica
  - Industria de metales pesados
- (Zhang, Zhang & Mehdi, 2021)

Cabe recalcar que este proceso permite obtener valores residuales de contaminantes nulos o que lleguen a cumplir con los valores registrados en la legislación ambiental logrando una responsabilidad socio ambiental por parte de la industria.

La nanofiltración posee un poro menor a  $0,001\mu\text{m}$  permitiendo la retención de moléculas de mayor tamaño como la lactosa y dejando permear iones monovalentes (Solís, Vélez & Ramírez, 2017). Es un tipo de tecnología de membrana que se encuentra entre la ultrafiltración y la ósmosis inversa.

En la tabla se registra las principales características en los procesos de membrana para sus distintos tipos:

Tabla 2. Características a considerar en el proceso de membrana.

Característica	Ósmosis Inversa	Nanofiltración	Ultrafiltración	Microfiltración
Diámetro del poro (nm)	≤0,5	1	1-100	100-1000
Especies retenidas	Sales	Moléculas pequeñas	Macromoléculas	Partículas coloidales
Proceso de transferencia	Solución-difusión	Solución-difusión	Capilar	Capilar
Selectividad para sales	Nula	Considerable (20-95%)	Débil (10%)	Nula
Presión osmótica	Necesaria	Media	Débil	Despreciable
Presiones de operación (Pa)	$3 \cdot 10^6$ - $8 \cdot 10^6$	$10^6$ - $4 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^5$ - $10^6$	$2 \cdot 10^4$ - $2 \cdot 10^5$
Caudal de trabajo (l/hm <sup>3</sup> )	10-60	50-100	40-200	150-1500
Energía consumida (kWh/ m <sup>3</sup> )	2-10	0,5-2	≤1	-
Necesidad de pretratamientos	Necesaria	Necesaria	Limitada	Limitada

Autor: (Hidalgo, 2008)

Los beneficios otorgados por parte de la tecnología de membranas están estrechamente relacionado a sus propiedades, entre las que destaca las interacciones interfaciales entre los solutos, el ambiente circundante y la superficie de la membrana (Drioli et al., 2011). Son estas interacciones que tienen una relación directa con las características de la membrana como el transporte, ensuciamiento, compatibilidad y selectividad.

## 1.7.1.2. Adsorción

**Definición:** La adsorción es un proceso de transferencia de materia que se produce por la interacción de un gas o líquido con sólido o líquido denominado adsorbente. Es utilizado desde hace mucho tiempo para eliminar iones de metales pesados (adsorbato) (Medina et al., 2021). Este adsorbente será el encargado de capturar ya sea de forma química o física al componente de interés. O, dicho de otra manera, la adsorción es la tendencia de algunos componentes que se encuentran en una fase fluida a que se adhieran a la superficie de un material sólido, por lo que se le considera un fenómeno donde se relaciona la superficie adsorbente y moléculas de interés. Es importante considerar la capacidad de adsorción, la eficiencia y concentración de adsorbente.

Las ventajas que ofrece esta técnica es que resulta sencilla en el aspecto operacional. A comparación con otras técnicas como la precipitación química o filtración genera una menor cantidad de contaminantes y posee una alta eficiencia con respecto a los miligramos capturados en función de los gramos utilizados de adsorbente (Carbón activado= 25, 88 mg/g Hg) (Burciaga et al., 2020).

Entre los materiales adsorbentes más comunes se encuentra la bauxita, alúmina, carbón activo, zeolitas, gel de sílice, biomasas residuales (cascarilla de arroz, cáscara de coco) y los adsorbentes poliméricos (Torres & Chiliguano, 2019).

La capacidad de los materiales adsorbentes radica en su área superficial y su capacidad adsorbente. El área superficial se define como el área total que está presente en toda la superficie del material y la capacidad adsorbente se trata de los sitios activos útiles para que se produzca la adsorción (Burciaga et al., 2020).

## Absorción y adsorción

A la tecnología de adsorción se le suele confundir con la absorción, pero existe diferencias notables entre una y otra, las cuales se nombra a continuación:

- El absorbente se encuentra principalmente en estado sólido o líquido y absorbe moléculas, iones o átomos (adsorbato) en su estructura. El adsorbato puede encontrarse en estado sólido, líquido o gaseoso y se unen a la superficie del adsorbente que puede estar en fase sólida o líquida.
- La absorción: tiene una tasa de reacción uniforme, mientras que la adsorción se da en una velocidad lenta hasta poder alcanzar el equilibrio.
- Temperatura: En procesos de absorción no es una variable significativa, mientras que la adsorción, este puede inferir positiva o negativamente con reacciones exotérmicas.
- Aplicaciones: La absorción es utilizada generalmente para almacenamiento, enfriamiento y separación de gases. La adsorción es utilizada para tratamiento de agua, fármacos y purificación de aire (Ghaedi, 2021).

Según la IUPAC, los materiales adsorbentes se clasifican según su estructura o naturaleza:

- A. macroporosos: Adsorbentes con poros mayores a  $0,05\mu\text{m}$
  - A. mesoporosos: Adsorbentes entre  $0,025\mu\text{m}$  a  $0,05\mu\text{m}$
  - A. microporosos: Adsorbentes menores a  $0,02\mu\text{m}$
- (Mahmoodi & Taghizadeh, 2018)

Dos factores importantes a considerar en el proceso de adsorción son sus modelos cinéticos y las isothermas de adsorción. La cinética se enfoca en el cálculo matemático para encontrar la tasa de adsorción (mg de contaminante/ g de adsorbente) a un intervalo de tiempo determinado. Y la isoterma encuentra el

estado de equilibrio entre el adsorbente con la presión parcial del adsorbato posterior a la adsorción a una temperatura fija (Ghaedi, 2021).

## **Tipos de adsorbentes:**

El tipo de adsorbente debe ser útil para la eliminación de contaminantes peligrosos, poseer una eficiencia y capacidad de adsorción para el contaminante, deben ser ecológicos, biocompatibles, reutilizables y de fácil producción.

Existe varios adsorbentes de bajo costo como las zeolitas naturales, desechos agrícolas y biomásas (Ghaedi, 2021).

Entre los materiales naturales están:

- Naturales: zeolitas, madera, arcilla, quitosano, carbón.
- Desechos agrícolas: granos de fruta, aserrín, maíz, girasol, cáscaras, entre otros.
- Desechos industriales: ceniza, escoria de alto horno, bagazo de caña, cenizas de aceite, lodos, entre otros.

## **Carbón activado (CA)**

**Definición:** El carbón activado es considerado el material más prominente y antiguo (Sivaraj, Namasivayam & Kadirvelu, 2001). Es realizado a base de carbón y sus características dependerán de su materia prima del cual se produce. En su mayoría, el carbón procede de coco, plantas leñosas, residuo y maderas ordinarias.

Para que el carbón sea utilizado como adsorbente debe pasar un proceso de activación donde se crea espacios entre las grietas de la estructura porosa del carbón. El proceso para la activación puede ser químico como físico.

En el proceso físico, a la materia prima se somete de 500 a 600°C para descargar sus compuestos volátiles, luego se calienta de 800 a 1000°C, que es



donde se produce el desarrollo estructural en cuanto su porosidad y superficie específica.

En el proceso químico se utiliza compuestos químicos como ácido sulfúrico a temperaturas elevadas (200 a 400°C) (Boy, Adamson & Myers, 1947).

El uso del carbón como adsorbente remonta al 1500 AC con los egipcios los cuales utilizaban el carbón para la purificación de agua, hasta llegar a hoy en día con una aplicación de forma extensiva en la industria alimentaria, farmacéutica, química, petroquímica, minera, para la protección personal y colectiva, entre otras opciones (Ghaedi, 2021).

En la siguiente tabla se representan las aplicaciones del CA y distintos tipos de adsorbentes:

*Tabla 3. Aplicación de distintos tipos de adsorbentes*

<b>Adsorbente</b>	<b>Metales Pesados</b>	<b>Metaloides</b>	<b>Halógenos</b>	<b>Tinte</b>	<b>Farmacéuticos</b>	<b>Radioisótopos</b>
<b>Alúmina</b>	X	X	X	X	X	
<b>Carbón Activado</b>	X	X	X	X	X	X
<b>Material biológico</b>	X	X	X	X		
<b>Arcillas</b>	X	X	X	X	X	X
<b>Compósitos</b>	X	X	X	X	X	X
<b>Grafeno</b>	X	X	X	X	X	X
<b>Polímeros</b>	X	X	X	X	X	X

Autor: (Bonilla, Mendoza & Reynel, 2017)

La tecnología de adsorción es un método viable para el saneamiento de agua. Es utilizado en el tratamiento de aguas residuales, aguas subterráneas y efluentes industriales ayudando hasta en la producción de agua potable (Sivaraj, Namasivayam & Kadirvelu, 2001).

## 1.7.1.3. Intercambio iónico

**Definición:** El intercambio iónico es una tecnología usada ampliamente para la purificación de disoluciones por la eliminación de iones disueltos con el principio de sorción electrostática que presentan algunos materiales (Dardel, 2005). Estos iones disueltos son reemplazados por iones de cantidades equivalentes de otro ion con la misma carga.

Entre las aplicaciones generales se puede mencionar:

- Separación selectiva de iones.
- Purificación de agua
- Separación y extracción de sustancias como uranio
- Deionización del agua
- Ablandamiento de agua
- Extracción y recuperación de metales en procesos hidrometalúrgicos (Badawy, 2005).
- Industrias como petroquímica, alimentos bebidos, edulcorantes, agua residual y potable, semiconductores, suelos, industria de pulpa y papel.

Los materiales de intercambio iónico son el núcleo de la tecnología, se dividen en distintas categorías: catiónicos, aniónico, poliméricos, minerales, resinas y de membranas.

El fenómeno de intercambio data de 1850, en donde se estudió la capacidad de los abonos para retenerse durante largos periodos de tiempo y no ser afectado o arrastrado por la lluvia. De esta manera se entendió la reversibilidad de ciertos materiales minerales arcillosos (Nasef & Ujang, 2012).

### **Zeolitas**

Las zeolitas están constituidas por una familia de minerales aluminosilicatos, cristalinos e hidratados que está compuesto por cationes, grupos radicales y

aniones los cuales generan la capacidad de intercambio propios del mineral. La principal fuente de las zeolitas son las arcillas, las cuales son aluminosilicatos que abundan a nivel mundial (Medina et al., 2021).

El 1756, Cronstedt descubrió este material mineral de contextura porosa y las denominó “zeolitas” que significa piedra hirviendo. Ya en 1949 se desarrolló las primeras zeolitas artificiales Linde A y X, que se han convertido en las más utilizadas, destacando la de tipo A (Flanigen, Broach & Wilson, 2010).

Su estructura interna permite tener un sistema activo para interactuar con el medio por medio de la liberación de cationes o radicales sin producir ningún tipo de cambio a nivel estructural con lo que a su armazón se refiere. Su intercambio depende de la naturaleza del material, temperatura, concentración y tamaño de carga (Costafreda et al., 2018).

La estructura está constituida generalmente por cationes de  $Al^{+3}$  o  $Si^{+4}$  que se encuentran en el centro de los tetraedros.

Y por cargas negativas de  $O^{-2}$ , lo que crea las tensiones necesarias en la estructura para generar los intercambios de los cationes alcalinos y alcalinotérreos. Estos intercambios son posibles gracias a la microestructura y porosidad de las zeolitas pudiendo ser el tamaño de poro de  $3\text{Å}$  o hasta  $9\text{Å}$  (0,3-0,9 nm) con superficie interna que dependerá del material con cientos de  $m^2/g$ , capacidad de intercambio catiónico de 0 a 650 meq/100g y volumen menor de  $0.35\text{ cm}^3/g$  (Costafreda et al., 2018).

Entre las distintas características que se desea obtener de las zeolitas están:

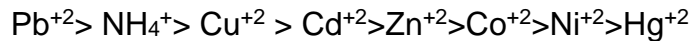
- Cinética rápida
- Buena estabilidad química
- Buen grado de entrecruzamientos
- Capacidad de intercambio efectiva y duradera
- Efectividad de área superficial en cuanto a su diseño.

## **Zeolitas para aplicaciones ambientales**

Las zeolitas poseen características importantes como material para tecnologías de intercambio iónico, adsorción, deshidratación, rehidratación y catálisis, generando una serie de aplicaciones en el aspecto ambiental, sobre todo para el tratamiento de aguas de distinto origen.

Entre las ventajas de presentan las zeolitas están: la versatilidad para su aplicación, bajo costo si se compara con tecnologías avanzadas, es de fácil acceso y poseen excelente estabilidad química y térmica (Valdés, Pérez & Díaz, 2006).

Se ha identificado la posibilidad de la remoción de metales pesados por el uso de zeolita como intercambiador de iones habiendo llevado un estudio de selectividad para la eliminación de cationes presentes en aguas residuales obteniendo los siguientes resultados por orden de afinidad (Zaide, 2012):



### **1.7.1.4. Biosorción**

Los métodos desarrollados para la remoción de metales pesados tienen la desventaja de tener un alto costo de inversión, operación y mantenimiento (Vena, 2019).

El proceso de biosorción en comparación con cualquier otro tipo de proceso posee una alta eficiencia para la remoción y no genera materiales secundarios contaminantes. (Sanchez et al., 2020). Uno de los objetivos del uso de la biosorción en las aguas residuales de la industria minera es la protección del medio ambiente ante la presencia de metales tóxicos (Vera et al., 2018).

**Definición:** La biosorción es un proceso en el cual se utilizan biomásas (muerta) para la adsorción o intercambio iónico de metales pesados mediante mecanismo fisicoquímicos (García et al., 2016).

Las biomásas más utilizadas son la cascarilla de arroz, avellana, nuez y la mazorca de maíz. El proceso de biosorción se da gracias a los grupos funcionales presentes en las biomásas que pueden ser hidroxilo, carboxilo, amino, tiol, entre otros (Sanchez et al., 2020).

Se han realizado varias investigaciones para el tratamiento de aguas residuales en metales pesados con el uso de una gran cantidad de biosorbentes, demostrando una gran capacidad de adsorción (Yu & Jiang, 2019; Malik et al. 2019).

Entre los parámetros a considerar para el proceso están: temperatura, pH, concentración del metal a adsorber y la posible presencia de otros metales en el medio (Sanchez et al., 2020).

Actualmente, una gran cantidad de productos orgánicos entre ellos fibras o cáscaras, son utilizadas para la captura de metales pesados debido a sus ventajas como la disponibilidad del material, son renovables, eco amigables y resultan ser de bajo costo (Malik et al., 2021).

Entre los principales biosorbentes están:

- Bagazo de caña: Se lo considera como uno de los mejores cultivos comerciales a nivel mundial. El bagazo de caña de azúcar se convierte en un desecho obtenido adecuadamente. Está constituido por celulosa (32-48%), hemicelulosa (19-24%) y lignina (23-32%). El bagazo es utilizado en mucho tipo de industrias como en la producción de papel, preparación de biometano y bioetanol, entre otros (Ghaedi, 2021).
- Serrín: El serrín se relación con la producción de muebles, por lo que en las últimas décadas ha sido directamente proporcional de manera

creciente. Esta industria produce grandes cantidades de serrín considerado como desperdicio. Actualmente se utiliza como fuente de combustible lo que desencadena la contaminación, por lo que se ha realizado investigaciones para alternativas de aplicación con un enfoque sostenible como la eliminación de contaminantes (Ghaedi, 2021).

- Mazorca de maíz: Al igual que el bagazo de caña y serrín, se genera en grandes cantidades como producto secundario, es la parte de desperdicio del maíz. La biosorción se da por medio de su tratamiento: primero se reduce su porcentaje de humedad y se corta en pequeños pedazos, una vez cortado se pasa por una procesadora eléctrica hasta obtener el tamaño deseado y permita la aplicación como biosorbente (Ghaedi, 2021).

Cabe recalcar, que a los biosorbentes se los puede modificar con procesos químicos o físicos, los cuales permiten de manera potencial mejorar sus capacidades de adsorción.

#### **1.7.1.5. Biorremediación y Fitorremediación (Adsorción algal)**

##### **Biorremediación**

La biorremediación es la tecnología que utiliza las características de los microorganismos para degradar, captar o absorber compuestos contaminantes, útil para la limpieza de efluentes industriales. En el caso de los metales pesados, estos pueden ser inmovilizados o precipitado (Castrillón & Navarro, 2016; Kumar & Gunasundari, 2018).

Para el caso de la biorremediación del cianuro, los microorganismos como *Pseudomonas* pueden degradar el compuesto para la conversión en un compuesto de menor toxicidad, esto es posible por la presencia de carbono y nitrógeno que posee el Cianuro que es fundamental para el desarrollo microbiológico (Ibáñez, 2019). En este proceso se debe tomar en cuenta como

variables de interés la temperatura, el pH, el oxígeno, la disponibilidad de nutrientes y concentración del contaminante.

La ventaja que presenta la biorremediación en comparación con otras tecnologías se da en el área económica y la desventaja está relacionada con el tiempo de procesamiento de los contaminantes (Apaza et al., 2021).

Para el caso del mercurio por medio de microorganismos es posible ya que estos presentan bioacumulación, por lo que se puede utilizar este proceso para la reducción de contaminantes de aguas residuales (Amabilis et al., 2016).

La biorremediación es una alternativa viable por su bajo costo, simple y eficiencia ante los tratamientos convencionales caros y defectuosos para la remoción de metales pesados. Y, es considerado como una de las mejores alternativas dentro del campo de investigación de tecnologías limpias (Kumar & Gunasundari, 2018).

En la biorremediación ocurren procesos de oxido- reducción, los cuales están gobernados por el oxígeno, lo que da entender que se opera en condiciones aerobias ya que en medios anaerobios los microorganismos se deteriorarían y serían ineficientes (Kumar & Gunasundari, 2018).

Las principales ventajas son:

- Uso de procesos biológicos para su tratamiento.
- Económicamente viable desde el punto operativo y operacional comparado con tecnologías físicas y químicas.

Dentro de la biorremediación existen 3 tipos de tratamiento: in situ, ex situ y la fitorremediación, que es otra tecnología de mucho potencial para el tratamiento de metales pesados (Saxena, Kumar & Shah, 2020).

## Fitorremediación

**Definición:** Esta tecnología utiliza plantas y sus distintas interacciones para la eliminación de contaminantes en suelo, agua, aire y lodos. Estas interacciones son de carácter químico, físico, bioquímico y distintas acciones enzimáticas para la posible eliminación, degradación o transformación del contaminante (Li et al., 2019).

Esta técnica, dentro de las tecnologías de biorremediación se considera la menos costosa, pero con distintas desventajas como la adaptabilidad, bioacumulación, supervivencia de las plantas, posibilidad de volatilización del mercurio, entre otros. Actualmente se realizan investigaciones para superar las distintas desventajas y obtener mejores beneficios (Sosa et al., 2022).

La fitorremediación utiliza en una amplia gama de contaminantes como metales pesados, hidrocarburos, contaminantes orgánicos y materiales radiactivos. Su mecanismo puede involucrar la fitoextracción, fitofiltración, fitoestabilización, fitovolatilización y fitodegradación. No obstante, el factor crucial para un buen proceso de fitorremediación es la especie vegetal seleccionada.

Entre las características que se buscan están: adaptabilidad a condiciones climáticas, alto rendimiento, alta tasa de crecimiento y supervivencia bajo presencia del contaminante y baja cantidad de nutrición (Li et al., 2019).

Por lo que en los últimos años se ha hecho hincapié a los procesos bioquímicos, físicos, químicos que son las responsables de la optimización de proceso (Selamat et al., 2018).

La propiedad de adsorción de metales pesados se da por la presencia de alginatos y fucoidanos dentro de los grupos funcionales presentes generalmente en algas. Los principales factores son: el tiempo, temperatura, pH y presencia de otros iones en el medio (Lazo & Mesías, 2019). La tecnología de microalgas



posee varias ventajas como los bajos costos, la fácil manipulación y tratamiento para su proceso y desechos secundarios (Vela et al., 2019).

## 1.7.1.6. Electrocoagulación

**Definición:** La electrocoagulación es un tratamiento electroquímico que consiste en la electrólisis de un sistema que permite la remoción de distintos tipos de partículas suspendidas, emulsificantes o disueltos, entre ellos los metales pesados (Ruiz, 2005; Tounsi et al., 2022).

Se basa en la inducción de corriente eléctrica en una solución acuosa por medio de placas metálicas compuestas por un ánodo y cátodo como hierro o aluminio (agentes de eliminación), en el ánodo se disolverá cualquier tipo de compuesto presente en la disolución, lo que permite la formación de sólidos suspendidos (Bermúdez & Salazar, 2019).

Al aplicar corriente al medio se dan distintos tipos de reacciones químicas con la producción de iones, estos iones con cargas opuestas chocan y tienden a precipitar, por lo que son responsables de la coagulación de las partículas coloidales (Piedra & Zambrano, 2021; Sadeghi et al., 2022).

Los factores que afectan a la electrocoagulación son: el pH, densidad de corriente, temperatura, distancia entre electrodos, la conductividad eléctrica, la concentración inicial de contaminante y el tipo de reacción que se lleve a cabo (Sadeghi et al., 2022). El pH está relacionado con la solubilidad del metal, la densidad electrónica la producción de burbujas y el tamaño del flóculo, la temperatura para la eficiencia de los electrodos y la conductividad está estrechamente relacionada a la densidad electrónica (Durante, 2017).

La electrocoagulación se ha convertido en una tecnología sustentable para el tratamiento de aguas residuales en cuanto a remoción de contaminantes se refiere. Las ventajas que ofrece este proceso son las siguientes:

- Económicamente viable en comparación a procesos convencionales
- Útil para potabilizar agua
- La formación de lodos es menor en comparación con tratamientos convencionales
- Los flóculos formados son muy estables y posee un alto nivel de eficiencia.
- Fácil uso y mantenimiento
- Operación automática y continua
- No requiere aditivos químicos
- Rápida y eficiente (Bermúdez & Salazar, 2019; Sadeghi et al., 2022).

### 1.7.1.7. Procesos Oxidativos Avanzados (Oxidación con peróxido)

**Definición:** La oxidación con peróxido es un proceso químico para la degradación de Cianuro libre el cual puede estar presente en relaves por el proceso de minerales auríferos.

Existen varios métodos químicos entre los que resaltan los siguientes: el proceso INCO donde se da la conversión del Cianuro a un ácido débil con el uso de SO<sub>2</sub> y oxígeno, la cloración alcalina que es el proceso más antiguo conocido para el tratamiento de Cianuro y el proceso KASTONE el cuál utiliza peróxido de hidrógeno para conseguir la destrucción de cianuro tanto libre como en forma de complejo mediante la generación de oxidación (Hachire et al., 2020; Lima et al., 2019).

La importancia de la oxidación con peróxido de sodio se encuentra en su radical hidroxilo el cual, mediante el potencial eléctrico captura los compuestos del medio. Esto permite la transformación la sustancia capturada y así mismo la limpieza del medio a tratar.

Se presenta en la siguiente tabla los principales agentes oxidantes.

*Tabla 4. Potencial oxidante de agentes oxidantes convencionales*

<b>Agente oxidante</b>	<b>Potencial de oxidación electroquímico (V)</b>
Flúor	3,06
Radical hidróxido	2,8
Oxígeno	2,42
Ozono	2,08
Peróxido de hidrógeno	1,78
Hipoclorito	1,49
Cloruro	1,36
Dióxido de cloruro	1,27

Autor: (Zhang et al., 2021)

Puede darse la posibilidad que esta tecnología trabaje conjuntamente con otra para aumentar su eficiencia o la posibilidad de contar con un postratamiento como el uso de un filtro de CA el cual permita la remoción sobrante de cianuro en el medio en concentraciones menores a 1ppm (Hachire et al., 2020).

También se puede considerar otro tipo de modificación del proceso de oxidación convencional obteniendo mejores resultados como es el caso de los métodos POA (Procesos Oxidativos Avanzados) con respecto a los porcentajes de remoción (Llerena & López, 2018; Araújo et al., 2021).

En la siguiente tabla se presenta la clasificación general para los procesos oxidativos avanzados:

*Tabla 5 Clasificación de los Procesos Oxidativos Avanzados*

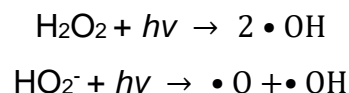
<b>Procesos no fotocatalíticos</b>	<b>Procesos fotoquímicos</b>
Ozono + medio alcalino	UV/ Peryodato
Ozono + peróxido de hidrógeno	Ferrioxalato
Proceso Fenton	UV al vacío
Oxidación electroquímica	UV/ Ozono
Radiólisis y tratamiento con electrones	Foto-Fenton
Plasma no térmico	Fotocatálisis heterogénea
Descarga electrohidráulica- ultrasonido	

**Definición de Proceso Oxidativos Avanzados.** - Reacciones químicas a las cuales se les agrega una fuente radioactiva, esto permite aumentar el porcentaje de remoción y por ende su efectividad. De esta manera, el proceso avanzado que se relaciona con el peróxido de hidrógeno y a su vez con la eliminación de materia orgánica y metales pesados es el acelerador de electrones y la fotocatalisis (Silva et al., 2018).

Y para el caso de la eliminación del cianuro se encuentra la oxidación electroquímica, oxidación con aire húmedo y el tratamiento ozono/ ultravioleta.

**Fotocatalisis UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.** Son reacciones que degradan sustancias por la presencia de luz debido a su irradiación UV con longitudes de onda de 200nm a 400nm. En estas reacciones se producen reactivos intermedios y radicales como hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), materia triplete ( $^3\text{OM}\bullet$ ), oxígeno singlet ( $^1\text{O}_2$ ), electrones hidratados ( $e^-_{\text{aq}}$ ), entre otros. Estos atacan y descomponen diferentes materiales recalcitrantes (Kim et al., 2022).

Las reacciones de oxido-reducción entre UV y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se mencionan a continuación:



## 1.8. Economía Circular

La economía circular es una filosofía centrada en los seres vivos (Balboa y Somonte, 2014), encaminando el desarrollo de productos sin crear desechos, a través de estímulos económicos que generen la creación de productos que sean fáciles de recoger, reutilizar y reparar (Caicedo, 2017).

Este desarrollo económico posee tres principios centrados en: a) Capital Natural, entendido como el uso equilibrado de los recursos renovables, (b) optimizar el uso de los recursos, utilizando los mismos la mayor cantidad de veces

maximizando su índice de utilidad y (c) Publicitar los exitosos resultados, patentando las iniciativas (Alier, 2013).

Desde el inicio de la era industrial ha permanecido hasta ahora como un modelo de producción y consumo, en el que se extraen los recursos para ser utilizados directamente o convertirse en materia prima para la fabricación de productos, estos son vendidos para ser utilizados en un período de tiempo determinado y, cuando llega el fin de su vida útil son, desechados, generando cantidades enormes de residuos.

La Economía Circular (EC) intenta sustituir el modelo lineal de usar y tirar por un modelo circular semejante al ciclo biológico de la naturaleza, nacer, crecer, reproducir y morir (Kowszyk & Maher, 2018).

A continuación, se muestran las definiciones explícitas de una EC por diversos autores independientes y organismos internacionales:

Comisión Europea (Plan de Acción de Economía Circular): Una economía donde el valor de los productos, materiales y recursos se mantienen en la economía durante el mayor tiempo posible y se minimizan la generación de residuos.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (Estrategia de biotecnología): La bioeconomía es una Economía Circular donde los recursos se pueden utilizar completamente en alta calidad a través del uso combinado o en cascada de la biomasa.

Alianza Europea de Bioeconomía: “[...] Una futura Economía circular, que consiste en el uso óptimo de los recursos y en la producción de materias primas primarias a partir de materias primas de origen [...] renovables. La productividad de los recursos aumenta y los residuos se eliminan prácticamente”.

“Un sistema regenerativo en el que la entrada y el desperdicio de recursos, las emisiones y las fugas de energía se minimizan al ralentizar, cerrar y reducir el material y los bucles de energía. Esto se puede lograr a través del diseño,

mantenimientos, reparación, reutilización, remanufactura, restauración y reciclaje de larga duración. En segundo lugar, definimos la sostenibilidad como la integración equilibrada del desempeño económico, la inclusión social y la resiliencia ambiental, en beneficio de las generaciones actuales futuras.” (Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Hultink, 2017).

Consortio de industrias bio-basadas: “[...] la economía circular se trata de usar los recursos del planeta de manera eficiente y sostenible para prevenir la degradación ambiental irreversible y el agotamiento de los recursos. La economía circular busca romper con la economía lineal caracterizar por “hacer, usar, disponer” en favor de un modelo más circular basado en la “reutilización, reciclaje o biodegradación”.

“La economía circular está definida por Charonis (2012), en línea con la visión de la Fundación Ellen Macarthur (2012), como un sistema diseñado para ser restaurado y regenerado” (Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2016).

“La economía circular busca estirar la vida económica de los bienes y materiales recuperándose de las frases de la postproducción del consumidor. Este enfoque también valora los lazos de cierre, pero lo hace imaginando los extremos de los diseños en su diseño y viendo los finales como inicios de los nuevos objetos.” (Gregson, Crang, Fuller, & Holmes, 2015).

“Significa la realización de un circuito cerrado de flujo de materiales en todo el sistema económico”. (...) “implica un circuito cerrado de materiales, energía y flujos de residuos.” (Geng & Doberstein, 2008).

La EC se refiere a un espacio de extracción, transformación de recursos, distribución, uso y recuperación de componentes y materiales.

Las industrias utilizan recursos de la naturaleza para convertirlos en productos y servicios, los comercializan en puntos de venta para que puedan ser utilizados por los clientes o consumidores. Para cerrar el círculo de flujo de recursos, la EC

propone hacerlo mediante la recuperación de bienes donde se destaca la importancia de la innovación para lograrlo y de esa manera, recuperar los materiales por medio de la naturaleza o procesos industriales en lugar de desecharlos (Stahel, 2016).

Bajo este preámbulo decimos que se caracteriza, más que definirse, por “una economía industrial restaurativa y regenerativa por intención y diseño”.

La Economía Circular es parte de las denominadas Economías verdes que tienen por objetivo el correcto desarrollo humano en respeto del ambiente.

Sus trascendentales beneficios se obtienen de la aplicación de estos modelos económicos que se centran en: (1) la reutilización de grandes cantidades de recursos naturales no renovables, (2) generación de productos con materiales biodegradables (como empaques verdes biodegradables para productos de consumo final), (3) energías renovables y (4) sistemas eficientes para reducir el uso de energía obteniendo los mismos resultados (Olórtegui; S.F.).

Ya existen ejemplos en los que los mercados de bienes de consumo tienen iniciativas de economía circular financiando investigaciones que han acreditado en muchos casos que la inversión en eco diseños y sostenibilidad se traduce en un aseguramiento de la disponibilidad de su materia prima.

Bajo este contexto la concepción de la EC se caracteriza porque las materias primas productos y elementos conservan su utilidad y máximo valor todo el tiempo, optimizando el rendimiento tanto como el uso de recursos y disminuyendo la cantidad de residuos (Fundación Ellen McArthur, 2015).

De la misma forma se la considera como un sistema económico que representa un cambio de prototipo en la forma en que la sociedad humana está interrelacionada con la naturaleza y tiene como objetivo prevenir el agotamiento de los recursos, cerrar lazos de energía y materiales, y facilitar el desarrollo sostenible a través de su implementación a nivel micro (empresas y

consumidores), meso (agentes económicos integrados en simbiosis) y macro (ciudad, regiones y gobiernos) (Prieto Sandoval, Jaca, & Ormazabal, 2017).

Sintetizando, el residuo o desecho se convierte en materia prima o es sometido a procesos de transformación para convertirse en un nuevo producto con mínimo gasto de energía. La EC dispone de sistemas regenerativos y restauradores, con el propósito de conservar el valor de los recursos tales como agua, suelo, minerales y energía, además de alargar la vida de los productos, minimizar el uso de materias primas e impulsar la innovación, eficiencia empresarial y la competitividad en beneficio de un desarrollo sostenible.

Para la transformación de una economía lineal (EL) a una EC, es necesario exponer las principales contribuciones teóricas que han establecido las bases y han definido las principales características de esta, si bien la mayoría de ellas tratan los mismos ideales es necesario analizar cada una debido a que sus autores son expertos en temas distintos (arquitectura, ingeniería, economía) cada uno tiene un aporte de acuerdo con su campo de estudio, siendo un complemento de cada una y aportando interesantes y diferentes puntos de vista que en retrospectiva persiguen un mismo fin.

Es decir, que por medio de este análisis se puede llegar a una EC de distintas formas, convirtiéndose en una “filosofía económica” que permite ser abordada desde diversos ámbitos. La EC se constituirá en un conjunto de teorías, sistemas y elementos con el propósito de transformar y revolucionar la economía actual (Belda Hériz, 2018).

### **1.8.1. Características de una Economía Circular**

Por su parte la Fundación Ellen McArthur propone un modelo para describir estrictamente una EC y aventurarse en la creación de actividades económicas inspiradas en el modelo económico circular se debe partir de las siguientes características fundamentales (Lehmann, 2019).



- a. Diseñar sin residuos: Dentro del modelo de una EC, el residuo se considera inexistente cuando los materiales de un producto se diseñan para actividades de desmontaje y la readaptación, con esto los materiales biológicos no llegan a ser tóxicos y pueden compostarse con mayor facilidad; los materiales técnicos (aleaciones, polímeros y otros artificiales) se diseñan para ser recuperados, renovados y mejorados mínimo gasto energético y máxima retención de valor.
- b. Aumento la resiliencia por medio de la biodiversidad: La EC valora la diversidad como manera de generar solidez y se convierte en un motor de versatilidad y resiliencia (Fundación Ellen McArthur, 2015). Los sistemas con muchas conexiones y escalas se adaptan con mayor facilidad a los impactos externos que los sistemas construidos simplemente para maximizar la eficiencia y el rendimiento (Lehmann, 2019), es decir, que cuanta mayor diversidad se crea, mayor riqueza se obtiene y mayor solidez se consigue (Belda Hériz, 2018).
- c. Trabajar hacia un uso de energía de fuentes renovables: La energía para impulsar la EC debe ser de fuentes renovables para reducir la dependencia de recursos e incrementar la resiliencia de los sistemas, lo que es posible por los valores de energía reducidos que promueve una EC restaurativa.
- d. Pensar en sistemas: En el entorno de una EC el pensamiento en sistemas se aplica en forma general en toda la cadena de suministro, la idea de entender como las partes interactúan entre sí dentro de un todo es fundamental (Fundación Ellen McArthur, 2015). Es decir, personas, empresas instituciones, plantas, animales, en concreto, todos los elementos que existen en el planeta forman parte de distintos sistemas, pero se interconectan entre sí y se alimentan los unos de otros, en otras palabras, si algo influye en uno también influirá en los otros desatando una reacción en cadena (Lehmann, 2019).
- e. Pensar en cascadas: En los materiales biológicos la creación de valor consiste en la oportunidad de extraer valor adicional de los productos mediante el paso en cascada en otras aplicaciones como en el paso por la tierra sirviendo como abono u otros usos.

- f. Esto es que un material puede servir para distintos fines desde que nace hasta que muere, un componente industrial debería actuar de la misma manera y crear valor en distintas fases de la vida útil siendo multifuncional y generar nuevas oportunidades de negocio una y otra vez por ejemplo, pasar del árbol al horno roba el valor que podría obtenerse mediante una descomposición en fases, mediante usos sucesivos como madera y productos de madera antes de su deterioro y eventual incineración (Lehmann, 2019).

## CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

### 2.1. Diseño y tipo de investigación

Se trata de una investigación documental a través de una revisión bibliográfica, usando una metodología cualitativa, con carácter exploratorio en el área de Toxicología Ambiental y Tecnología más Limpias.

### 2.2. Recolección de datos

Se realizó una búsqueda bibliográfica de artículos de investigación original, utilizando las palabras claves: Economía Circular, Minería aurífera, tecnologías más limpias, medidas sostenibles, aguas residuales, reutilización de residuos, obteniéndose un total de 207 artículos encontrados en las bases digitales, según la relevancia del título y el año de publicación.

La selección de los artículos se realizó en dos fases: la primera consistió en una lectura rápida del artículo completo, con el fin de verificar el cumplimiento de los criterios de inclusión y exclusión.

#### - **Criterios de inclusión.**

Artículos en español, portugués e inglés, la identificación de las tecnologías más utilizadas en la remoción de los contaminantes en aguas residuales, así como el papel de la Economía circular como vínculo de sostenibilidad del proceso de extracción aurífera desde una sostenibilidad medioambiental.

En las tecnologías más utilizadas para remoción se encontró que las que produjeron mayor porcentaje de remoción son: tecnología de membranas, adsorción con carbón activado, intercambio iónico con zeolitas, biosorción, biorremediación y fitorremediación, electrocoagulación y oxidación con peróxido identificando en cada una los recursos empleados y sus beneficios económicos, técnicos y medioambientales.

## - **Criterios de exclusión.**

Se excluyeron los artículos que contenían datos de tecnologías que no permitían de forma efectiva la remoción de contaminantes auríferos a nivel de las aguas residuales y también que no implicaban procesos de reutilización, tratamiento y gestión de residuos. Artículos que hayan empleado una información de técnicas consideradas por su capacidad de remoción e impacto ambiental de poca o nula efectividad en la cantidad de contaminantes auríferos desde una metodología poco clara, resultados y conclusiones incoherentes y no justificados.

Se estudió los contaminantes presentes en la minería aurífera con respecto al mercurio, cianuro y metabolitos como el metil-mercurio; cualquier otro contaminante presente y encontrado en distintas fuentes se excluyó por temas de extensión y complejidad del tema.

El concepto de “minería” se relacionó explícita e implícitamente hacia la minería aurífera y sus afines como minería metálica. De esta manera, se excluyeron áreas referidas a petróleo, gas, no metales, entre otros.

De acuerdo a los criterios anteriores, se encontraron alrededor de 450 documentos, que fueron descargados y que se refieren a: artículos, libros, trabajos de titulación, estos fueron almacenados en una carpeta de Google drive, en un computador personal (Ejemplo: Alvarado\_2019\_restauración de terrenos cianurados utilizando zeolitas naturales).

La segunda fase consistió en la lectura completa de los artículos, de forma crítica y analítica, con el fin de validar el diseño del estudio, la metodología empleada y la coherencia y claridad de los resultados y conclusiones, de esta manera se eliminaron 243 artículos por la ausencia de la metodología, muestra de estudio pequeña, minería de otro tipo y enfocados en otro tipo de elemento o compuesto.

De esta manera se obtuvieron un total de 207 documentos, entre artículos, libros y trabajos de titulación relacionados con la economía circular en la industria aurífera, las tecnologías de mayor efectividad en remoción de contaminantes, los procesos de extracción auríferos y los impactos toxicológicos en el agua por la contaminación de la minería aurífera.

Los artículos se clasificaron en tres grupos utilizando diferentes hojas de Microsoft Excel: Tecnologías más efectivas de remoción desde la producción Más Limpia, el papel de la economía circular en el proceso de extracción minera aurífera para reducción de los residuos en la industria y su recuperación, y el impacto ecotoxicológico de la contaminación aurífera a nivel del ecosistema acuático. Además, se registró el título, año, cita bibliográfica y país.

Los documentos seleccionados dentro de las bases digitales permitieron, la obtención de información cuantitativa de los temas a tratar, entre ellos la toxicidad al medio ambiente que causan los contaminantes de la minería de las aguas residuales. De igual manera se consiguió información sobre los tratamientos para estas aguas, enfocándose sobre todo en tratamientos terciarios y tecnologías como la filtración por membrana, adsorción, intercambio iónico, entre otros.

Una vez abordado estos temas, se consideró la relación con la Economía Circular para la reducción de residuos en la industria y su recuperación. Las listas de referencias de los artículos seleccionados se revisaron adicionalmente para determinar su relevancia, se eliminaron los artículos duplicados y aquellos que no cumplan con las variables de investigación. El tema de enfoque de la investigación fue sobre los límites de concentración de contaminantes (metales pesados, compuestos orgánicos, etc.), las enfermedades asociadas a los contaminantes, el mecanismo de acción de los contaminantes en el medio y el ser humano, los tratamientos primarios, secundarios y terciarios de aguas residuales y la economía circular que podrá ser implementada a nivel de la industria minera.

Para el procesamiento de información con respecto a la toxicidad se seleccionó, la base de datos Toxnet, artículos que permitan evidenciar una capacidad de remoción de tratamientos para mantener límites de descarga que no perjudiquen al medio ambiente y al ser humano. Así mismo, se tomó en cuenta la normativa nacional TULSMA y normativa internacional EPA para identificar el límite máximo permitido de los contaminantes.

En la validación y divulgación de resultado se analizó mediante la correlación existente descrita en el marco teórico, definición de los mejores procesos para el tratamiento de aguas residuales mineras por medio de un análisis comparativo de las ventajas y desventajas de los mismos, así como su desarrollo de la recopilación bibliográfica en el manuscrito final del informe a presentar.

## **Materiales**

Materiales: Se utilizaron un ordenador portátil para acceder a navegadores de internet, aplicaciones digitales como Google drive como medio virtual para tener un acceso compartido de los diferentes archivos. El programa de Excel para registrar y organizar las fuentes bibliográficas consultadas, y así, evitar la duplicidad de artículos.

## CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Análisis:

Debido a que cada tecnología consta de sus propias características es necesario una evaluación por separado para su identificación, ya que estas permiten el correcto funcionamiento para la reducción de contaminantes en los efluentes. Debido a que existe una inmensa diversidad y características con respecto a las aguas residuales industriales, que conlleva a que no haya un método genérico aplicable por lo que es necesario evaluar la calidad de agua tratada en base a los límites de descarga (Tabla 6) y el proceso específico que será aplicado al tratamiento (Figoli & Criscuoli, 2017).

*Tabla 6. Límites de descarga en base a norma nacional y americana*

<b>Libro VI –Anexo 1 (TULSMA)</b>			
Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce			
Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permitido
Cianuro total	CN <sup>-</sup>	mg/l	0,1
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
<b>Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)</b>			
Límites de descarga para sistemas asociados con la extracción de minerales			
Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permitido
Cianuro total	CN <sup>-</sup>	mg/l	0,2
Mercurio total	Hg	mg/l	0,002

Fuente: (TULSMA & EPA, s.f.)

## Indicadores para el tratamiento de agua de manera sostenible y sustentable

Es necesario contar con indicadores para la evaluación de las tecnologías, estos son factores que permiten el análisis desde distintas áreas como de energía, materiales, operación, contaminación, eficiencia en remoción, entre otros.

Tabla 7. Indicadores para tecnologías en el tratamiento de agua

<b>Indicador de agua</b>	<b>Observación</b>
Intensidad de costo económico	¿Cuánto cuesta el tratamiento de 1000 galones de agua residual?
Energía no renovable	Megajulios para el tratamiento de 1000gal.
Energía renovable	Megajulios para el tratamiento de 1000gal.
Emisiones de efecto invernadero	Kg de GEI para el tratamiento de 1000 gal.
Cantidad de residuos	Kg de desechos producidos por el tratamiento de 1000 gal.
Productos químicos	Costo por productos químicos para el tratamiento de 1000 gal.
Costo de inversión	Escala rentable
Tóxicos liberado tratados	Kg de tóxicos liberado por 1000 gal.
Valor de recuperación	Cantidad recuperada (\$) por 1000 gal.

Autor: (Figoli & Criscuoli, 2017)

Los factores más importantes que destacan en las distintas tecnologías desde el punto de vista de la sostenibilidad son:

- Costo y análisis de operación
- Uso de energía
- Eficiencia de separación
- Cantidad de residuos generados.



## 3.1.1. Tecnología de membranas

### 3.1.1.1. Análisis

Se ha determinado las características importantes que destacan en la tecnología de membranas:

*Tabla 8. Parámetros de control en la tecnología membrana*

<b>Estudio realizado</b>	<b>Parámetros de control</b>	<b>Referencia</b>
<i>Aplicación de la tecnología de membranas en el tratamiento de algunos residuos líquidos altamente tóxicos</i>	Pretratamiento, dosificación, parámetros físico químicos del residuo, presión de trabajo, costos.	(Calvo, Mora, Quesada & Quesada, 2019)
<i>Fabricación de una nueva membrana de adsorción porosa basada en PES impresa con iones altamente selectiva para la eliminación de mercurio (II) del agua.</i>	Tipo y modificación de membrana, capacidad de eliminación, flujo, pH, presión de trabajo, dosificaciones.	(Esmali et al., 2020)
<i>Eliminación rápida y eficiente de iones de mercurio utilizando membranas de filtro de marco orgánico de metal a base de zirconio</i>	Modificación, eficiencia, temperatura de operación, pH, dosificación.	(Yan et al., 2021)
<i>Mejora de la eficacia de la recuperación de cobre y cianuración en la cianuración de oro: un nuevo proceso de membrana integrada.</i>	Tipo de membrana, flujo, porcentaje de recuperación, tiempo de operación.	(Estay et al., 2021)
<i>Un proceso novedoso basado en la adsorción de membrana llena de gas para recuperar cianuro en la minería de oro</i>	Presión de trabajo, dosificación, porcentaje de remoción, modificación.	(Estay et al., 2013)

A continuación, se describe cada uno de los distintos parámetros:

*Tabla 9. Parámetros de control*

Tipo de membrana	Especie medida	Presión (Bar)	Tiempo de contacto (min)	pH	Concentración mg/l	Eficiencia %	Referencia
OI	Hg	5	120	11	4400	96	(Calvo et al., 2019)
Matriz mixta/ absorción	Hg (II)	0,19	NR	7,95	4	98,1	(Esmali et al., 2020)
Zr-MOF	Hg (II)	1	<i>Pocos minutos</i>	4,5	10	97,8	(Yan et al., 2021)
MF-UF	CN <sup>-</sup>	2	60	4,5	2,18	90	(Estay et al., 2021)
Matriz mixta/ absorción	CN <sup>-</sup>	4	10	11	2000	90	(Estay et al., 2013)

Nota: NR corresponde a “valor no registrado”, MOF corresponde a membranas mixtas formados por iones metálicos.

## Indicador de límite permitido

*Tabla 10 Criterio de aceptabilidad para mercurio según el límite permitido*

Límite máximo permitido de mercurio (mg/l)	Concentración de mercurio (mg/l)	Concentración del mercurio residual (mg/l)	Indicador	Fuente
0,005	4400	176	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Calvo et al., 2019)
0,005	4	0,076	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Esmali et al., 2020)
0,005	20	0,22	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Yan et al., 2021)

Tabla 11 Criterio de aceptabilidad para cianuro según el límite permitido

Límite máximo permitido de cianuro (mg/l)	Concentración del cianuro (mg/l)	Concentración del cianuro residual (mg/l)	Indicador	Fuente
0,1	2,18	0,218	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Estay et al., 2021)
0,1	2000	200	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Estay et al., 2013)

Se considera las características más relevantes para el funcionamiento de la membrana en la remoción de metales pesados:

**Porosidad:** La porosidad será la responsable que la tecnología de membrana sea funcional, ya que esta es la encargada de retener el contaminante.

**Afinidad:** La permeabilidad presente en la membrana permite selectivamente que cierto grupo de moléculas o componente logren pasar. Sin embargo, si se analiza solo la tecnología de membrana sin ningún tipo de modificación, uno de los problemas con el uso en mercurio es la imposibilidad de permitir la remoción en altos porcentajes o niveles permitidos. Esto se evidencia en altas o bajas concentraciones (Calvo, et al., 20 19).

**Porcentaje de remoción:** Con una concentración inicial de mercurio 4400 mg/l se obtuvo una concentración final de 135 mg/l, es decir un porcentaje de 96% tomando en cuenta que se realizó pretratamientos (eliminación de oxidantes fuertes, precipitación de hidroxilos, óxidos y sulfuros). No obstante, por medio de tratamientos convencionales que consta de reducción, precipitación, y filtración es posible lograr una mayor remoción como se evidencia en la tabla (Calvo, et al., 2019).

*Tabla 12. Comparación de concentración inicial y final*

Especie	C. inicial (mg/l)	C. Final con pretratamiento (mg/l)	C. Final (mg/l)	C. Final (mg/l). T. convencional
Hg	4400	135	0,03	0,01

Nota: C corresponde a "concentración" y T a "tratamiento".

Autor: (Calvo et al., 2019)

**Aspecto técnico-tecnológico:** Posee buenos resultados si se toma a los metales pesados, llegándose a obtener valores hasta del 100% de remoción. (Kurniawan, Chan & Babel, 2006) Sin embargo, no se considera viable la posibilidad el uso de la tecnología de membranas convencionales para la eliminación de mercurio. Y si se aplicase, sería necesario la implementación de varias tecnologías como pretratamientos o modificaciones de la membrana que permitan porcentajes de remoción altos.

El uso de membranas modificadas o híbridas abre la posibilidad de obtener mayores porcentajes de remoción, como es el uso de ZnO que mejora las propiedades de flujo, hidrofiliidad y permeabilidad (De Souza et al., 2021).

Por medio de estudios se demuestra el poco uso de las membranas para la remoción de mercurio. Se registraron datos de 2010 a 2019 para determinar el uso de tecnologías comparando la adsorción y las membranas, siendo la tecnología de adsorción la de mayor impacto en el campo de aplicación (Albatrni, Qiblawey & El-Naas, 2021).

**Aspecto ambiental:** Las membranas posee una vida útil de 5 a 10 años, dando la posibilidad de convertirse en residuo. La vida útil está relacionada al ensuciamiento del mismo, que a pesar de generar limpiezas químicas se van desgastando hasta perder su capacidad. (Vera et al., 2018) De esta manera se evidencia la posibilidad que las membranas utilizadas en nanofiltración y ósmosis inversa sean utilizadas en micro y ultrafiltración, dentro de pretratamientos u otro tipo de aplicación como desendurecimiento del agua. (Landaburo et al., 2016).

La innovación para los distintos procesos de separación son la clave para el desarrollo de procesos más eficientes con una perspectiva de mejora medioambiental, junto a procesos de captura es posible obtener tecnologías renovables que permitan menores rango de contaminación por la industria (Rodríguez et al., 2021).

**Aspecto económico:** El costo resulta elevado si se lo compara con otras técnicas como la biosorción debido a su complejidad, técnica y capacidad de remoción. Sin embargo, posee una vida útil más larga (Vera et al., 2018).

Tomando en cuenta las membranas convencionales, estas no permiten un amplio rango de eliminación del contaminante, lo que abre la posibilidad de utilizar pretratamientos o modificaciones lo que conllevaría a un gasto mayor de recursos económicos.

### **Aplicación en la economía circular:**

Con la implementación de membranas en la minería aurífera, se tiene la posibilidad de reutilizar el agua tratada para no generar descargas a ríos con posibles contaminaciones.

Otra forma de implementar la economía circular es por medio de la reutilización de las membranas. Es el caso de un proyecto europeo "*Life Transfomem*" el cual ha obtenido por medio de membranas usadas de osmosis inversa convertirlas en membranas para nano y ultrafiltración, así mismo se realizó el proyecto "*Remtavares*" con la misma finalidad obteniéndose buenos resultados para la eliminación de fármacos, pero permitiendo un abanico de posibilidades en cuanto a sus aplicaciones industriales (Landaburu et al., 2016; Lawler et al., 2012).

Todavía existe pocos estudios en cuanto al mecanismo de envejecimiento y degradación de los materiales usados en membranas después de un largo uso,

por lo que siempre se propone medidas de prevención y control como es la inhibición y polarización de la membrana (Han, 2021).

### 3.1.2. Adsorción

#### 3.1.2.1. Análisis

Se ha determinado los parámetros importantes que destacan en la tecnología de adsorción:

*Tabla 13. Parámetros de control para la tecnología de adsorción*

<b>Estudio realizado</b>	<b>Parámetros de control</b>	<b>Referencia</b>
<i>Compósito en estado hidrogel con aplicación en la adsorción de metales pesados presentes en aguas residuales</i>	Tipo de adsorbente, área superficial, concentración de adsorbente, capacidad de adsorción, eficiencia.	(Burciaga et al., 2020)
<i>Adsorción de cianuro contenido en solución acuosa usando carbón activado obtenido de residuo de café: eficiencia de absorción, modelado de equilibrio y cinética</i>	Caracterización de CA, pH, tiempo de contacto, dosificación, eficiencia de adsorción.	(Aranguri & Reyes, 2019)
<i>Remoción de mercurio empleando carbón activado preparado a partir de aguaje (Mauritia flexuosa)</i>	Tipo de CA, modificación, pH, área de poro, modelos cinéticos, concentración de trabajo, capacidad de adsorción	(Obregón et al., 2020)
<i>Adsorción de mercurio utilizando Carbones Activados Modificados con peróxido de hidrógeno y calentamiento</i>	Tipo de CA, caracterización de CA, capacidad de adsorción, modificaciones, área de poro, pH, tiempo de contacto	(Colpas et al., 2016)

A continuación, se describe cada uno de los distintos parámetros

*Tabla 14. Descripción de parámetros de control*

Tipo de adsorbente	Modificación	Especie de estudio	Porcentaje de Eficiencia	mg/l inicial	pH de trabajo	Tiempo de contacto (min)	Referencia
Compósito hidrogel	Refuerzo de matriz polimérica	Hg	86	1000	7-10	1200	(Burciaga et al., 2020)
CA-residuo de café	NG	CN <sup>-</sup>	55	30	9-12	90-180	(Aranguri & Reyes, 2019)
CA-Aguaje	Con óxido de manganeso	Hg	80	100	9	240	(Obregón et al., 2020)
CA- zuro de maíz	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Calentamiento	Hg <sup>+2</sup>	44	12,5	6	80	(Colpas et al., 2016)

Nota: CA corresponde a “carbón activado”

## Indicador de límite permitido

*Tabla 15 Criterio de aceptabilidad para mercurio según el límite permitido*

Límite máximo permitido de mercurio (mg/l)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración del mercurio residual (mg/l)	Indicador	Fuente
0,005	1000	140	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Burciaga et al., 2020)
0,005	1	20	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Obregón et al., 2020)
0,005	12,5	5,5	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Colpas et al., 2016)

Tabla 16 Criterio de aceptabilidad para cianuro según el límite permitido

Límite máximo permitido de cianuro (mg/l)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración del cianuro residual (mg/l)	Indicador	Fuente
0,1	30	13,5	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Aranguri & Reyes, 2019)

**Afinidad:** Los materiales tiene buena afinidad para generar la retención de metales pesados y cianuro, esto debido a su área superficial que permite la retención de sus iones siendo una buena alternativa para el uso en ecosistemas acuáticos (Burciaga et al., 2020).

Los materiales adsorbentes como carbón activado pueden ser utiliza en distintas fuentes como depósitos minerales, pesticidas, baterías e industria del papel (Ihsanullah et al., 2016). Las ventajas se evidencian en la operación simple, los bajos costos de operación y control, la tolerancia bajo distinto pH, su eficiencia y selectividad necesarias para aguas residuales de origen industrial como la minería (Xue, Chen, Shi, Ma & Zheng, 2017).

Entre los distintos materiales que puede generar la adsorción de metales pesados están: el carbón activado, zeolitas, grafeno y manganita. Pero si del mercurio se refiere el carbón activado y zeolitas resultan idóneas. Se ha encontrado valores para la remoción de mercurio con capacidad de retención de 26 mg/g (González, 2018).

Con el uso de hidrogeles compuestos también se permite la remoción de mercurio siendo de tipo colágeno/caucho/fenol-formaldehído y de celulosa/colágeno con eficiencia de 225 mg/g y 859 mg/g respectivamente (Mitra et al., 2019).

**Porcentaje de remoción:** El porcentaje de remoción tanto para metales pesados como cianuro dependerá de varios factores como la procedencia del carbón activado, las modificaciones realizadas, el pH, la dosificación de medio adsorbente y el tiempo de contacto (Aranguri & Reyes, 2019).



A continuación, se presenta los estudios realizados para la adsorción de cianuro con carbón activado (residuo de café):

*Tabla 17. Porcentaje de adsorción en base a variables de proceso*

Corrida	pH	Tiempo (min)	Dosif. (g/l)	Adsorción %
1	9	90	20	38,8
2	12	90	20	9,4
3	9	180	20	43,7
4	12	180	20	12,5
5	9	90	40	48,7
6	12	90	40	18,7
7	9	180	40	53,1
8	12	180	40	25

Fuente: (Aranguri & Reyes, 2019)

En cuanto al mercurio, sucede que a pH básicos (pH= 9) genera una mejor captura de especies catiónicas como Hg (II), lo que no se logra en pHs ácidos debido a la repulsión que sucede con el medio (H<sup>+</sup>) con capacidad de adsorción de 7-8 mg/g e incluso más con carbones modificado (Obregón et al., 2020).

**Aspecto técnico-tecnológico:** Uno de los beneficios que se identifica para la elaboración de carbón activado es su procedencia, ya que se lo puede fabricar de distintos materiales orgánicos (Carriazo, Saavedra & Molina, 2010). Así mismo su aplicabilidad en distintos tipos de industrias sobre todo para efluentes de origen industrial como textil, vinícola, mineral y farmacéutica (Rojas, Gutiérrez & De Jesús, 2016).

**Aspecto ambiental:** El carbón activado procedente generalmente de material orgánico como la cáscara de coco, da la posibilidad de su regeneración y reutilización en distintas industrias como la alimenticia (Condor & Maza, 2020).

Así mismo se ha evaluado la obtención de carbón activado por medio de lodos en planta de tratamientos de aguas residuales (Rojas, Gutiérrez & De Jesús, 2016).

**Aspecto económico:** En comparación con cualquier tipo de tecnología, resulta factible el uso de carbón activado, esto se evidencia en la simpleza de su tecnología para obtener la adsorción sin ningún otro tipo de complemento tecnológico avanzado. Resulta económicamente viable al momento de no contar con recursos elevados (Carriazo, Saavedra & Molina, 2010).

### **Aplicación en la economía circular:**

En la industria minera el uso de agua es indispensable, por lo que su reutilización es importante y esto se logra mediante tecnologías que permitan la remoción de contaminantes como es el uso de carbón activado. Estos poseen una vida útil los cuales dan la posibilidad de ser desechados y eliminados generando daños al medio ambiente. De esta manera se piensa en la reutilización de carbones activados mediante una reactivación, esto permitiría a la industria ahorrar un 40% de su material adsorbente y así mismo no ocasionar daños al medio ambiente ni a la salud (Carbotécnica, 2020).

El uso del carbón activado da la posibilidad que otras industrias apliquen la economía circular al momento de generar CA a partir de sus desechos como de llantas usadas, lodos residuales, palma de aceite, desechos forestales y agrícolas (Rashidi & Yusuf, 2017; Mohamed et al., 2022; Castrillon, Giraldo & Moreno, 2012; Tihamer & Carlos, 2022).

### **3.1.3. Intercambio iónico y adsorción (zeolitas)**

#### **3.1.3.1. Análisis**

Se ha determinado los parámetros importantes que destacan en la tecnología de intercambio iónico y adsorción:

*Tabla 18. Parámetros de control en la tecnología de intercambio iónico y adsorción*

Estudio realizado	Parámetros de control	Referencia
<i>Restauración de terrenos cianurados usando zeolita natural enriquecida con fertilizante NFK</i>	Tipo de zeolita, modificación, pH, tiempo de contacto, caracterización de suelo, dosis.	(Alvarado et al., 2019)
<i>Técnicas de tratamiento físico-químico de aguas residuales cargadas con metales pesados</i>	Tipo de zeolita, pH, dosis requerida, concentración del contaminante.	(Kurniawan, 2006)

A continuación, se describe cada uno de los distintos parámetros

*Tabla 19. Descripción de parámetros de control*

Tipo de zeolita	Modificación	Especie de estudio	pH de trabajo	Temperatura (°C)	Tiempo de contacto (h)	Referencia
Chabasita	17 NPK	CN <sup>-</sup>	6,75	25	77 días	(Alvarado et al., 2019)
Amberlita IR- 120	NG	Hg	2-6	25	24	(Kurniawan, 2006)

## Indicador de límite permitido

*Tabla 20 Criterio de aceptabilidad para mercurio según el límite permitido*

Límite máximo permitido de mercurio (mg/l)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración del mercurio residual (mg/l)	Indicador	Referencia
0,005	200	2	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Kurniawan, 2006)

*Tabla 21 Criterio de aceptabilidad para cianuro según el límite permitido*

Límite máximo permitido de cianuro (mg/l)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración del cianuro residual	Indicador	Referencia
0,1	350	1,4	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Alvarado et al., 2019)

**Afinidad:** Para que se dé un buen proceso de intercambio entre la zeolita y el medio contaminante es importante tomar en cuenta factores como el tipo de zeolita, la temperatura de trabajo, la densidad del medio, el tiempo de contacto y concentración del contaminante. A temperatura ambiente (25°C) genera buenos resultados, con tiempos de contactos que normalmente están horas de trabajo consiguiendo reducir las cantidades significativas de 350ppm a 1,4 ppm para un suelo de textura gruesa y arenosa (Alvarado et al., 2019).

Otra forma de conocer la efectividad del método es con la medición de la conductividad, esto debido al intercambio iónico que se producirá entre el radical libre de la zeolita y los iones presentes del contaminante (Alvarado et al., 2019; Burciaga et al., 2020).

Los experimentos aplicando zeolitas han demostrado una capacidad de adsorción para los metales pesados, sobre todo en el Mercurio y Plomo (Rigñack et al., 2020).

**Porcentaje de remoción:** Los porcentajes de remoción se encuentran en valores del 70 a 95% para el cianuro con cantidades de uso relativamente pequeñas de la zeolita (Hanela, Durán & Jacobo, 2014) En capacidades de adsorción para el mercurio, se encuentra 26 mg/g estimándose buenos rendimientos y la capacidad de encapsular los grupos activos (Colling, et al., 2020).

**Aspecto técnico-tecnológico:** Se puede considerar complejo por la presencia de distintas variables: puede ser colocado como lecho fijo dentro de pretratamiento para la limpieza de efluentes teniendo así el control de variables como flujo circulante, temperatura del medio, el pH a trabajar (por lo general son de medio básico), el diseño y dimensionamiento del lecho, tiempo de operación, carga superficial, número de Reynolds, entre otros (Hanela, Durán & Jacobo, 2014).

**Aspecto ambiental:** El uso de zeolitas no solo se evidencia en la industria minera para metales pesados y efluentes cianurados, también posee múltiples aplicaciones en otro tipo de áreas como las aguas residuales urbanas y domésticas permitiendo un correcto funcionamiento en el drenaje y alcantarillado (Cárdenas & Rocha, 2021).

Las zeolitas pueden ser aplicadas directamente a fuentes de contaminación permitiendo la purificación de aguas residuales logrando una reducción notable y produciendo la mejora de propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del agua (Alcivar & Pérez, 2018).

**Aspecto económico:** A nivel de laboratorio resulta más económico que la tecnología de membranas o tratamiento químicos, pero con mayores costes si se lo compara con otra técnica de adsorción como es el carbón activado. (Ápaez et al., 2019). Pero también resalta su costo bajo por la abundancia del material procedente de minerales aluminosilicatos que se los puede encontrar en todo el mundo.

Ecuador posee yacimientos de zeolitas naturales de mordenita, estilbita cálcica, clinoptilolita, heulandita, laumontita, mordenita, entre otros; lo que abriría más aún el panorama de aplicación (Morante, 2004).

### **Aplicación en la economía circular:**

Se ha identificado a las zeolitas como un potencial para la implementación de economía circular no solo en la industria minera, pudiendo trabajar de manera sostenible evitando la contaminación de agua y manteniéndose por debajo de los límites máximos permisibles de los estándares de calidad ambiental.

En el caso de zeolita desgastadas se logra obtener otro tipo de beneficios en otras áreas industriales como la agricultura o en la construcción por el encapsulamiento y formación de concretos. Es el caso de la Fundación General del Consejo Superior de Investigaciones Científicas que ha dado apertura un

proyecto enfocado en la purificación de agua en zonas perjudicadas por la industria, en este se puede identificar el uso de zeolitas para la retención de flúor de efluentes. Además, esto permitirá el posterior uso de las zeolitas gastadas para la remediación de suelos para su acondicionamiento (ADS, 2020; Méndez & Lira, 2019).

En el caso de la relación de economía circular para otras áreas industriales, se lo evidencia por su producción misma en distintos ejemplos como: la formación de zeolitas a partir de ladrillos, a partir de residuos provenientes de centrales termoeléctricas, de cenizas volantes, de residuos electrolíticos de manganeso, entre otros (Pumacajia & Huamán, 2018; González et al., 2017; Sommerville et al., 2013; Li et al., 2015).

### 3.1.4. Biosorción

#### 3.1.4.1. Análisis

Se ha determinado los parámetros importantes que destacan en la tecnología biosorción:

*Tabla 22. Parámetros de control de la tecnología de biosorción*

<b>Estudio realizado</b>	<b>Parámetros de control</b>	<b>Referencia</b>
<i>Biorremediación de efluentes de la industria minera contaminado con cianuro</i>	Tipos de biosorbente, dosificación, tiempo de contacto, temperatura, pH	(Rivera et al., 2020)
<i>Utilización de subproducto agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados</i>	Tipo de biosorbente, pH, temperatura, dosificación, temperatura, caracterización de biosorbente.	(Sanchez et al., 2020)
<i>Bioadsorción de mercurio (II) en aguas residuales generados por el centro minero informal de Lunar de Oro con biomasas de Waraqqo</i>	Tipo de biomasa, especie de estudio, condiciones ambientales, dosificación, pH, tiempo de contacto, capacidad de adsorción, modelos cinéticos.	(León et al., 2017)

A continuación, se describe cada uno de los distintos parámetros:

*Tabla 23. Descripción de parámetros de control*

Tipo de biosorbente	Especie estudiada	Temperatura (°C)	pH	Tiempo de contacto (min)	Porcentaje de eficiencia	Referencia
Malva sylvestris y Cecropia l.	CN <sup>-</sup>	25	10	5 días	20 %	(Rivera et al., 2020)
Subproductos agroindustriales (frutas)	Metales pesados	25-35	5,5	NR	95	(Sanchez et al., 2020)
Waraqo (Especie de cactus)	Hg (II)	25	10	120	98	(León et al., 2017)

## Indicador de límite permitido

*Tabla 24 Criterio de aceptabilidad para mercurio según el límite permitido*

Límite máximo permitido de mercurio (mg/l)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración del mercurio residual (mg/l)	Indicador	Referencia
0,005	100	5	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Sanchez et al., 2020)
0,005	17,125	0,29	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(León et al., 2017)

*Tabla 25 Criterio de aceptabilidad para cianuro según el límite permitido*

Límite máximo permitido de cianuro (mg/l)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración del cianuro residual	Indicador	Referencia
0,1	1	0,8	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Rivera et al., 2020)

**Afinidad:** Al tratarse de un método de adsorción, pero con el uso de medios orgánicos, las características son similares a las evaluadas en la tecnología de adsorción. En este caso se da énfasis a la influencia del pH en el medio debido a que este afecta en medios muy ácidos o muy alcalino al rendimiento del biosorbente. (Salazar et al., 2021). Otros aspectos a considerar es la dosis del biosorbente y la concentración del contaminante.

**Porcentaje de remoción:** Normalmente se encuentra la remoción mayor a 90%. Este valor puede variar dependiendo el biosorbente como se especifica en la tabla 23.

En el caso de cianuro se puede encontrar porcentajes de retención superiores a 90% con el uso de cáscara de pistacho y estropajo en medio básico (pH= 9) con tiempo de contacto de 10 minutos siendo una posible aplicación para la minería aurífera (Arana & González, 2014).

En el caso del mercurio, los biosorbentes tienen una buena aplicación para los metales pesados como el cadmio y plomo, sin embargo, su aplicación con el mercurio se encuentra limitada, pero con ciertas posibilidades, como es el caso del uso de cáscara de mandarina (capacidad de adsorción= 20-450mg/g para metales pesados), bagazo de caña (capacidad de adsorción=37,7 mg/g) y la paja de arroz (capacidad de adsorción=22mg/g) (Husein, 2013; Khoramzadeh, Nasernejad & Halladj, 2013; Rocha et al., 2009).

**Aspecto económico:** La base estructural que posee los biosorbentes permiten su posible aplicación directa sin ningún pretratamiento para activarlo como es el caso de carbón. Esto limita costos de adquisición. Existe una amplia fuente para la obtención de los materiales biosorbentes, aumentando las posibilidades de encontrar materiales de bajo costo (Vera, 2018).



## **Aplicación en la economía circular:**

El uso de biosorbente y la aplicación de la economía circular queda en manifiesto debido a que estos pueden proceder como subproductos de industrias agrícolas o agroindustriales, en ellas se generan millones de toneladas como subproducto entre las cuales se puede encontrar: Paja de cebada, lenteja, haba, arroz, trigo maíz, sorgo, tabaco, caña de azúcar, cáscara de café, bagazo de caña, agave, maní, entre otros (Sanchez et al., 2020).

Estos materiales biosorbentes posee la capacidad de generar desadsorción, lo cual permite eliminar el contaminante del medio y el uso del material nuevamente tanto del contaminante como el biosorbente. Una vez cumplido su vida útil puede convertirse en compost y reinsertado en el suelo. (Aguilar, 2020; Sanchez et al., 2020) Mediate procesos ecotecnológicos se logra implementar los residuos orgánicos para la restauración ecológica y fertilización del suelo. (Villegas & Laines, 2017).

La producción de biogás también es una opción luego de la cumplir la vida útil como adsorbente debido a la generación de reacciones fermentativas con la ayuda de biorreactores (Padilla & Rivero, 2016).

Se ha evaluado también su uso dentro de la construcción como en la adicción de ceniza para cementos, sustitución de áridos naturales ya sea para la fabricación de moteros u hormigón (Otero, 2017).

### **3.1.5. Biorremediación y Fitorremediación**

#### **3.1.5.1. Análisis:**

Se ha determinado los parámetros importantes que destacan en la tecnología de intercambio iónico y adsorción:

*Tabla 26. Parámetros de control para la tecnología de biorremediación*

<b>Estudio realizado</b>	<b>Parámetros de control</b>	<b>Referencia</b>
<i>Biorremediación eficiente de efluentes metalúrgicos mediante el uso de microalgas de la Amazonía y los andes del Ecuador</i>	Especie de estudio, eficiencia, temperatura, pH, dosificación.	(Vela et al., 2018)
Biorremediación de residuos industriales cianurados de la joyería por la bacteria alcalófila <i>Pseudomonas P. CECT5344</i>	pH, especie de estudio, caracterización, dosificación y biomasa inicial, tiempo de contacto, biodegradación.	(Ibáñez, 2018)
Uso de las algas <i>Macrocystis P.</i> y <i>Lessonia N.</i> para el tratamiento de efluentes mineros.	Especie de estudio, dosificación, capacidad de adsorción, pH, temperatura	(Lazo & Sanchez, 2019)

A continuación, se describe cada uno de los distintos parámetros

*Tabla 27. Descripción de parámetros de control*

<b>Tipo de biorremediante</b>	<b>Especie de estudio</b>	<b>Concentración mg/L</b>	<b>Remoción (%)</b>	<b>pH de trabajo</b>	<b>Tiempo de contacto (días)</b>	<b>Referencia</b>
Pleurococcus, Chlorella, Scenedesmus sp. (Microalgas)	Hg (II)	0,007	64	5-7	20	(Vela et al., 2018)
		0,007	86,8			
		0,007	81			
<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i> (Bacteria)	CN <sup>-</sup>	10	60	9	3	(Ibáñez, 2018)
<b>Macrocystis P., Lessonia N.</b> Bory (Algas)	Hg (II) Hg (II)	Capacidad de adsorción mg/g 94% 321,2		4-6	NR	(Lazo & Sanchez, 2019)

**Nota:** NR corresponde a "valor no registrado"

## Indicador de límite permitido

*Tabla 28 Criterio de aceptabilidad para mercurio según el límite permitido*

Límite máximo permitido de mercurio (mg/l)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración del mercurio residual (mg/l)	Indicador	Fuente
0,005	0,007	0,00252	Cumple con el Límite Máximo Permitido	(Vela et al., 2018)
0,005	0,007	0,00092	Cumple con el Límite Máximo Permitido	(Vela et al., 2018)
0,005	0,007	0,00133	Cumple con el Límite Máximo Permitido	(Vela et al., 2018)
0,005	10	0,6	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Lazo & Sanchez, 2019)
0,005	1000	321,2	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Lazo & Sanchez, 2019)

*Tabla 29 Criterio de aceptabilidad para cianuro según el límite permitido*

Límite máximo permitido de cianuro (mg/l)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración del cianuro residual	Indicador	Fuente
0,1	10	4	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Ibáñez, 2018)

**Afinidad:** Por parte de la fitorremediación, es importante la identificación de especies que tengan la tolerancia para metales pesados como la *Miscanthus Floridulus* o lechuga de agua (Bohan et al., 2022; Gavrilescu, 2022). Sin embargo, como se trata de un material bioacumulante puede alterar el estado del mercurio como generar la presencia de compuestos organometálicos o producir volatilización en el mismo, pero con las debidas investigaciones puede llegarse a tener grandes ventajas para la captura de metales pesado (Amabilis et al., 2016).

De esta manera, se considera que es más confiable el uso de cianuro en procesos de biorremediación para efluente mineros debido a que el cianuro puede degradarse y convertirse en especies menos tóxicas.

En el caso de la biorremediación, las especies más conocidas para la remoción de cianuro son *Streptococcus* sp., *Pseudomonas* alcalólicas, *fluorecens* y *pseudoalcaligenes*, y *Klebsiella* sp. (Cartagena, 2019; Gordillo, 2020).

El pH es un factor importante, puesto de que se trata de organismo vivos que un medio ácido o alcalino puede afectar su rendimiento, normalmente se prefiere ambientes casi neutros (Ibáñez, 2019).

La temperatura de trabajo también se considera un factor predominante, siendo las condiciones óptimas de 25°C en fitorremediación y 25±15°C para biorremediación.

Entre otros factores importantes a considerar están los nutrientes, el tipo de sistema anaerobio o aerobio, concentración de la biomasa y cantidad de cianuro a tratar (Apaza et al., 2021).

Uno de los problemas que se identifica es la optimización de proceso ya que es lento, sobre todo si se estudia a gran escala, puede demorarse días o hasta semanas (Srivastava, 2021).

**Porcentaje de remoción:** En la siguiente tabla se puede apreciar distintas especies de bacterias que pueden generar la remoción de cianuro.

*Tabla 30. Porcentajes de remoción para distintos microorganismos*

N°	Bacteria	Tolerancia (mg/l)	Remoción CN <sup>-</sup> (%)	Tiempo (h)	Referencia
1	<i>Pseudomonas putida</i>	340	81	48	(Singh et al., 2018)
2	<i>P. Aeruginosa</i>	50	87	15 días	(Agudelo et al., 2010)
3	<i>P. Fluorescens</i>	500	98	236	(Restrepo et al., 2006)
4	<i>Serratia</i> sp.	450	99,9	7 días	(Metuko et al., 2017)
5	<i>Bacillus</i> sp.	179	90	8 días	(Metuko et al., 2013)

En el caso de la fitorremediación se obtiene valores similares de remoción con la posibilidad de mejorar su eficiencia con el uso de microorganismos o con la implementación de materiales auxiliares. Un ejemplo se da en el uso de *Solanum nigrum* L. que con el uso de biocarbón es capaz de aumentar su remoción en el mercurio 100 veces más, o el Eucalipto *globulus* que en presencia de campos magnéticos estáticos aumenta su remoción unas 50 veces más (Shen et al., 2021).

**Aspecto técnico-tecnológico:** La configuración del biorreactor resulta importante para el control de los distintos factores a controlar. (Jaibiba et al., 2020) Entre ellos están: el tipo de reactor (aerobio, anaerobio, flujo pistón, lecho fijo, entre otros), dimensionamiento del reactor, pH, temperatura, tiempo, oxígeno, tipo de biosorbente (Apaza, 2021).

**Aspecto ambiental:** Una de las características importantes en el uso de la biorremediación es su capacidad de transformar el cianuro y convertirlo en otras especies menos tóxicas y sobre todo que se encuentren a niveles aceptables y amigable con el medio ambiente (Lovasoa et al., 2017).

En el caso de la fitorremediación, se debe considerar especies hiperacumuladoras, esto con el fin de que el proceso cumpla con sus expectativas, caso contrario, por una mala selección de especie vegetal puede generar efectos adversos como la volatilización del contaminante.

**Aspecto económico:** No se registran datos exactos sobre el aspecto económico, pero en comparación con gastos producidos en otro tipo de tecnología resulta rentable debido a que se trata de un proceso natural en el medio lo que conlleva a la limitación de gastos operativos como en otras tecnologías (Botz et al., 2016).

## **Aplicación en la economía circular:**

Se considera a la tecnología de biorremediación como un proceso de desarrollo sostenible debido a que se trata de una técnica que utiliza los recursos biológicos para generar procesos de transformación que estén encaminados hacia el consumo y producción de bienes y servicios de manera responsable minimizando el impacto ambiental producido por la contaminación de la minería y teniendo un efecto sobre el aspecto económico y social (Riascos, 2020).

Es por ello que la fitorremediación es considerada con una de las tecnologías más rentables y respetuosas con el medio ambiente (Jakovljević, Randelović & Mišljenović, 2021).

Los contaminantes que han sido captados pueden ser reintegrados a los procesos industriales. Mientras que el biosorbente que han cumplido su vida útil y se convierte en biomasa o residuo puede tener distintas aplicaciones, entre ellos destaca la posibilidad de convertir en compost para la industria agroindustrial, la generación de procesos fermentativos en la generación de combustibles para transporte como el etanol o la generación de gas hidrógeno, en la industria farmacéutica, de cosméticos, entre otros (Van, Harmsen & Bos, 2020; Saldarriaga et al., 2020).

### **3.1.6. Electrocoagulación**

#### **3.1.6.1. Análisis**

Se ha determinado los parámetros importantes que destacan en la tecnología de electrocoagulación:

Tabla 31. *Parámetros de control para la tecnología de electrocoagulación*

<b>Estudio realizado</b>	<b>Parámetros de control</b>	<b>Referencia</b>
<i>Proceso integrado de electrocoagulación asistida por ozonización para la eliminación de cianuro de las aguas residuales de la industria minera siderúrgica</i>	Tiempo de trabajo, voltaje, intensidad de corriente, eficiencia de remoción, concentración de contaminante, tipo de electrodos, costo operativo	(Das et al., 2020)
<i>La influencia de los parámetros operativos en la eliminación del cianuro de las aguas residuales mediante el proceso de electrocoagulación</i>	Tipo de operación, caracterización de efluente, densidad de corriente, tiempo de trabajo, porcentaje de remoción.	(Moussavi, Majidi & Farzadkia, 2011)
<i>Eliminación simultánea de plomo y cianuro de las soluciones sintéticas y efluentes de plantas procesadoras de oro mediante método electroquímico</i>	Especie estudiada, pH, intensidad de corriente, tiempo de trabajo, eficiencia de eliminación,	(Chegeni et al., 2021)
<i>Eliminación de mercurio (II) del agua mediante electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro</i>	Tipo de electrodos y especie de estudio, eficiencia de remoción, densidad de corriente, pH, tiempo de trabajo.	(Nanseu et al., 2009)

A continuación, se describe cada uno de los distintos parámetros

*Tabla 32. Descripción de parámetros de control*

Especie Estudiada	T. electrodo	Inten-sidad (A)	Concentración (mg/l).	Remoción %	pH de trabajo	Tiempo de cont. (min)	Referencia
CN <sup>-</sup>	Al, Al	100	150	98	3	30	(Das et al., 2020)
CN <sup>-</sup>	Fe, Al	15	300	92	11,5	20	(Moussavi, Majidi & Farzadkia, 2011)
Pb (II) CN <sup>-</sup>	Fe, Al	300 mA	198 168	97 81	9	40	(Chegeni et al., 2021)
Hg (II)	Al, Fe	2,5	4	99,9	3-7	15	(Nanseau et al., 2009)

## Indicador de límite permitido

*Tabla 33 Criterio de aceptabilidad para mercurio según el límite permitido*

Límite máximo permitido de mercurio (mg/l)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración del mercurio residual (mg/l)	Indicador	Fuente
0,005	4	0,004	Cumple con el Límite Máximo Permitido	(Nanseau et al., 2009)

*Tabla 34 Criterio de aceptabilidad para cianuro según el límite permitido*

Límite máximo permitido de cianuro (mg/l)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración del cianuro residual	Indicador	Fuente
0,1	150	3	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Das et al., 2020)
0,1	300	24	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Moussavi, et al., 2011)
0,1	168	31,92	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Chegeni et al., 2021)



**Afinidad:** La capacidad de formación de flóculos dependerá del ánodo, cátodo y las cargas libres en el medio, puesto que si existe metales en el medio con mayor carga electrostática no será posible la remoción del mercurio (Piedra & Zambrano, 2021).

Es necesario la aplicación de una corriente eléctrica desde al cátodo al ánodo, lo que provocará las reacciones químicas en el medio. Las variables a considerar en este proceso electroquímicos son: densidad de corriente, concentración del medio, tiempo de contacto y potencial eléctrico (Niño, Barrera & Lumbaque, 2013).

**Porcentaje de remoción:** Se obtienen porcentajes de remoción superiores al 90% partiendo de concentraciones 0,5 mg/L con electrodos Fe-Al con tiempos de aproximadamente 1 hora (Quispe, 2015; Peña, 2016; Niño, 2013).

*Tabla 35. Condiciones de remoción para mercurio en electrocoagulación.*

Densidad de corriente	Potencial eléctrico	Tiempo	pH	Remoción (%)	Referencia
2,5 A/dm <sup>2</sup>	0,3-0,9 V	1h	3-7	99	(Nanseu et al., 2009)
2 A/dm <sup>2</sup>	9V	50min	4,5	98,5	(Chaturvedi, 2013)

Autor: (Niño, 2013)

**Aspecto técnico-tecnológico:** Al producirse reacciones químicas en el sistema se puede entender que se trata de un reactor que permite la electrocoagulación. Este reactor ingresará el agua residual a tratar previo a sus análisis fisicoquímicos. En cuanto a los electrodos, en el lado positivo se dan reacciones anódicas y en el lado negativo reacciones de tipo catódico, son los encargados de aportar iones al medio, lo que permite la neutralización y por ende la coagulación de los contaminantes (Ruiz, 2005).

**Aspecto ambiental:** Se considera a la electrocoagulación como una técnica de protección, conservación y recuperación de los recursos hídricos dando grandes beneficios al medio ambiente. Si se considera otro tipo de tratamiento químico

para la remoción de contaminantes, la electrocoagulación tiene la ventaja de no utilizar compuestos químicos en su tecnología (Perozo & Abreu, 2017).

**Aspecto económico:** Resulta más costoso que métodos convencionales o procesos de adsorción y biorremediación, más aún si se utilizan electrodos de aluminio. Se debe tomar en cuenta la electricidad, productos químicos, eliminación de lodos, costos de electros y costos fijos (Das et al., 2021).

### **Aplicación en la economía circular:**

El tratamiento de aguas residuales de origen minero, abre la posibilidad de encontrar un reúso en la industria para el agua utilizada en los procesos de extracción aurífera. (Mata et al., 2019). La electrocoagulación es considerada como un modelo de remediación que permite la degradación de contaminante como el mercurio, con la producción de menor cantidad de lodo en comparación a otras técnicas de coagulación (Castoldi, Martínez & Guzmán, 2019).

Como se ha mencionado, la electrocoagulación utiliza electrodos para hacer posible sus reacciones químicas, de esta manera se ha visto la posibilidad del uso de electrodos de aluminio obtenidos de latas recicladas. Los resultados en los estudios realizados arrojan valores de remoción superiores al 90%. (Idusuyi et al., 2021)

### **3.1.7. Procesos oxidativos (Oxidación con peróxido)**

#### **3.1.7.1. Análisis**

Se ha determinado los parámetros importantes que destacan en la tecnología de Procesos Oxidativos:

Tabla 36. *Parámetros de control para la tecnología de procesos oxidativos*

<b>Estudio realizado</b>	<b>Parámetros de control</b>	<b>Referencia</b>
Análisis de alternativas para la degradación de cianuro del municipio de Segovia (...)	Proceso, especie estudiada, dosificaciones, tiempo de contacto, pH	(Gaviria & Meza, 2006)
Influencia de la dosificación de cloro y peróxido de hidrógeno sobre el contenido final de cianuro total en el tratamiento de aguas en miera y Yanacocha.	Dosificación, especie d estudio, tiempo de trabajo, porcentaje de remoción,	(Carranza & Zambrano, 2014)
Aplicación del método de oxidación química con peróxido de hidrógeno para la reducción del cianuro presente en los efluentes de la planta Sotrami S.A.	Tiempo de contacto, temperatura, eficiencia, dosificación, pH	(Quispe & Villanueva, 2015)
Reducción de cianuro y mercurio mediante micro-nanoburbujas de aire en peróxido de hidrógeno por mineral artesanal en el Centro Poblado La Molina.	Tiempo de contacto, parámetros físico químicos, temperatura, porcentaje de eficiencia.	(Mallqui, 2018)
Adsorbentes de melamina-plata dopados con nitruro de carbono con catálisis similar a la peroxidasa y fotocatalisis de luz visible: Detección colorimétrica y eliminación por desintoxicación del mercurio total.	Especie estudiada, concentración, tiempo de trabajo, dosificación.	(Yin et al., 2021)

A continuación, se describe cada uno de los distintos parámetros:

*Tabla 37. Descripción de parámetros de control*

Tipo de tratamiento	Especie estudiada	Tiempo de trabajo (h)	Concentración inicial mg/l	Remoción %	Cambio de pH	Referencia
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	CN <sup>-</sup>	2,5	3969,61	93	11,5 a 8,5	(Gaviria & Meza, 2006)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +Cl <sub>2</sub>	CN <sup>-</sup>	1	7	90	10-8	(Carranza & Zambrano, 2014)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	CN <sup>-</sup>	6	500	95	10-9	(Quispe & Villanueva, 2015)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +mB	CN <sup>-</sup> Hg (II)	45min	35 0,03	97 99,9	10-6,75	(Mallqui, 2018)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +LV	Hg <sup>+0</sup> , Hg <sup>+2</sup>	NR	0,05 18,3	89,5 96,2	NR	(Yin et al., 2021)

Nota: "NR" significa valor no registrado

## Indicador de límite permitido

*Tabla 38 Criterio de aceptabilidad para mercurio según el límite permitido*

Límite máximo permitido de mercurio (mg/l)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración del mercurio residual (mg/l)	Indicador	Fuente
0,005	0,03	0,00003	Cumple con el Límite Máximo Permitido	(Mallqui, 2018)
0,005	0,05	0,005	Cumple con el Límite Máximo Permitido	(Yin et al., 2021)

Tabla 39 Criterio de aceptabilidad para cianuro según el límite permitido

Límite máximo permitido de cianuro (mg/l)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración del cianuro residual	Indicador	Fuente
0,1	3970	277,9	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Gaviria & Meza, 2006)
0,1	7	0,7	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Carranza & Zambrano, 2014)
0,1	500	25	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Quispe & Villanueva, 2015)
0,1	35	1,05	Sobrepasa el Límite Máximo Permitido	(Mallqui, 2018)

**Afinidad:** Existe una gran relación entre el pH, tiempo de trabajo y el tipo de tratamiento empleado con cualquier modificación realizada. La capacidad de capturar las especies estudiadas dependerá en gran medida al oxidante utilizado en el proceso, esto a su vez registra normalmente una reducción de pH.

El pH, juega un papel importante en el medio, si es muy bajo la concentración de  $H^+$  es muy alta lo que provoca un desplazamiento redox reduciendo la estabilidad química, tampoco es bueno un elevado pH básico debido a que las reacciones pueden debilitarse. (Zhou et al., 2015).

Con respecto a la temperatura, los resultados sugieren que, con un aumento de temperatura, la eliminación de Hg mejoraría (Zhou et al., 2015). Sin embargo, se debe tomar en cuenta la solución a tratar porque también afectaría a la eliminación.

Con respecto al efecto que posee la concentración inicial del contaminante, se deduce que, a una mayor cantidad de contaminante a tratar, los porcentajes de remoción pueden reducirse, esto debido a que aumenta la transferencia de masa de átomos de mercurio por unidad de tiempo y genera una reducción en la relación que existe con los grupos  $OH^-$ . (Zhou et al., 2015).

De manera general, se puede decir que los procesos oxidativos avanzados son uno de los más sensibles de controlar por las distintas condiciones ya sea en el aspecto químico o físico como la influencia de otro compuesto en el medio o las temperaturas de trabajo respectivamente. (Li & Adewuyi, 2016)

**Porcentaje de remoción:** Se determinan porcentajes de remoción mayores a 90 % en la mayoría de casos de estudio. Normalmente se prefieren ambientes básicos para la remoción del contaminante, esto debido a los iones hidroxilo presentes en el oxidante, lo que genera mayores capacidades de remoción oxidando y eliminando el Hg (Zhou et al., 2015).

**Aspecto técnico-tecnológico:** Necesariamente su aplicación está enfocada en el diseño de reactores para su correcto funcionamiento y optimización. Por lo que se puede encontrar limitada por el aspecto técnico como los productos químicos, catalizador (en caso de ser necesario), generación de lodos, penetración de los fotones UV y energía consumida. Aun así, la tecnología promete mucho por su capacidad de reaccionar para mezcla de especies por lo que se realizan investigaciones para la creación de nuevos reactores (Allabakshi et al., 2022).

**Aspecto ambiental:** En comparación a la tecnología de membranas o adsorción, produce menores cantidades de lodos, esto debido a la presencia de radicales libres que actúan en el agua ligada e intracelular de los lodos (Allabakshi et al., 2022; Lin et al., 2022).

### **Aplicación en la economía circular:**

Se considera a los Procesos Oxidativos Avanzados como una tecnología enfocada a la protección limpia con ventajas en comparación a los tratamientos primarios o secundarios que no se consideran lo suficientemente efectivos para eliminar metales pesados de un medio residual o concentraciones elevadas de contaminantes, no están diseñadas para el tratamiento de contaminantes altamente peligrosos como lo son los metales pesados. Los procesos oxidativos

avanzados permiten por medio de transformaciones químicas y sin generar gran cantidad de lodos el tratamiento del mercurio (Lin et al., 2022; Pinos, 2020).

Esta implementación de tratamientos avanzados para aguas residuales posee un desarrollo enfocado en la gestión de recursos hídricos (Ortega & Sánchez, 2021).

### 3.2. Análisis comparativo

*Tabla 40. Ventajas y desventajas de las tecnologías estudiadas*

<b>Métodos de remoción</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Referencia</b>
Por membrana	Eficiencias altas de remoción Baja generación de residuos Espacio pequeño de operación Selectividad Bajo consumo de químicos	Necesario el control de pH Elevado costo de capital Elevado costo de mantenimiento Requiere fuente de energía, producción de incrustaciones, complejidad alta. Residuos: concentrados por retrolavados.	(Burciaga et al., 2020; Albatrni et al., 2021)
Adsorción	Flexible en diseño y condiciones de funcionamiento. Rentable a largo plazo. Respetuoso con el medio ambiente. Requiere poco o nula energía Puede modificarse Alta selectividad	Generación de residuos. Altos tiempo de retención. Se requiere adición de químico para regeneración. Residuos: adsorbente desgastado.	(Albatrni et al., 2021)
Intercambio iónico (Zeolita)	Consumo de energía bajo. Selectividad alta Buena regeneración Tolerancia a pH	Uso limitado para materiales de intercambio Costo de inversión y operación alto. Inestable en soluciones acuosas y térmicamente excepto una matriz de Si/Al	(Burciaga et al., 2020; El-Eswad, 2019)
Biosorción	No tiene limitaciones por toxicidad. No necesita nutrientes para funcionar. Rápidos y eficientes para la remoción de metales. Fácil almacenamiento. Puede ser mejorado con modificaciones químicas.	Rápida saturación Sensible al pH Susceptible a degradación por formación de compuestos organometálicos.	(Lazo & Sánchez, 2019; Beni & Esmaeili, 2020)
Biorremediación	Degradación completa Interrupciones mínimas Puede saturarse, pero reestablecerse por el crecimiento	Proceso lento. Para contaminantes biodegradables Produce subproductos	(Yaashikaa et al., 2022; Lazo & Sánchez, 2019; Beni &

	Poco sensible a la desorción.	Necesita una activación biológica. Posibilidad de intoxicación. Posible formación de complejos	Esmaeili, 2020)
Fitorremediación	Eficiencia alta de eliminación. Enfoque ecológico. Fácil de implementar.	Proceso lento Trabaja selectivamente Procesos eficientes por estaciones Depende de la raíz y microflora. Posible formación de complejo.	(Yaashikaa et al., 2022; (Lazo & Sánchez, 2019; Beni & Esmaeili, 2020)
Electrocoagulación	Equipos simples y de fácil control. Flóculos de mayor tamaño que con el uso de químicos. Genera lodos concentrados. Alta eficiencia con un gran número de contaminantes.	Alto costo energético Incrustaciones y pérdida de la eficiencia Restauración y mantenimiento de electrodos	(Ruíz, 2014)
Procesos de oxidación Avanzado	Cambio de fase y transforma químicamente al contaminante. Poca generación de sustratos a ser controlados. Consumo mínimo de energía. Genera productos simples fácil de tratar Insumos y equipos accesibles. Costos menores en comparación al uso de polímeros.	Costos operacionales elevados. No muy efectivo para mezclas de sustancias. Es necesario concentraciones altas del oxidante.	(Martínez et al. 2014)

## Indicador de límite permitido

El análisis sobre el límite permitido tanto de cianuro como de mercurio marca una tendencia para las tecnologías que no cumplen el criterio de aceptabilidad. Sin embargo, existe la posibilidad de generar tratamiento en serie para las aguas residuales mediante estas tecnologías, lo que permitiría llegar a los límites de descarga.

Si se considera inevitable implementar un sistema en serie, esto conllevaría a mayores costos de equipamiento y mantenimiento. Por lo que, el análisis de los límites máximos permitidos es necesario.



## COSTOS

### **Tecnología de membrana:**

El costo dependerá de 3 factores importantes: nivel de pureza deseado, el caudal de agua a tratar y el material de construcción. El valor de los equipos de tratamientos varía dependiendo el diseño, generalmente para un caudal bajo de 5 galones por minuto (GPM) se requiere mínimo \$45 000 pero para un tratamiento sofisticado de operación puede superar los millones de dólares. Un caudal de tratamiento entre 100 a 200 GPM sus valores pueden variar de \$ 150 000 a \$ 450 000 (Albatrni et al., 2021).

### **Adsorción**

Se toma en cuenta dos costos generales, el de capital y operacional. Los costos principalmente estarán asociados el tipo de adsorbente, el caudal de tratamiento, precio unitario y frecuencia en el remplazo de piezas para mantenimiento. Si se tratase de 100 galones, sería necesario contar con un capital entre valores de \$2 000 a \$48 000 (Albatrni et al., 2021).

### **Intercambio iónico**

Considerando el caudal a tratar de 16 GPM con zeolita como adsorbente, se necesitaría un total de \$ 50 000 para cubrir los costos de inversión. A parte, se debe considerar los costos por mano de obra, los costos energéticos y por insumos, los cuales vienen hacer costos fijos. En las mismas circunstancias, sin el cálculo de los costos fijos, sería necesario un total de \$ 25 000 para la inversión de un equipo de carbón activado que, en porcentaje de remoción ofrece generalmente de 5 a 10 unidades porcentuales menos que la zeolita (Gualteros & Piñeros, 2021).

## **Biosorción**

No existe datos con exactitud de valores experimentales, pero se la considera de bajo costo ya que la mayoría de biosorbente fabricados provienen de desechos industriales manteniendo de esta manera costos bajos para la remoción de metales pesados. (Saha et al., 2017; Witek et al., 2011).

## **Biorremediación y Fitorremediación**

Según bibliografía, algunos los consideran de bajo costo en comparación a tecnología de membrana, procesos oxidativos avanzando y cualquier otro tipo de método convencional (Khurshid, et al., 2022; Azubuike et al., 2016).

Otros lo consideran de costos elevados debido al mantenimiento continuo de las condiciones adecuadas de los organismos por lo que limita su aplicación (Beni & Esmaeili, 2020; De Souza, et al., 2022).

En relación a la biorremediación y fitorremediación es más factible llevar una fitorremediación debido su tratamiento especies utilizadas, estos logran resistir más en comparación a los organismos de biorremediación.

## **Electrocoagulación**

El precio por tratamiento varia, pero normalmente se encuentra entre valores mínimos y máximos de \$ 12 a \$ 44 por cada metro cúbico de agua residual tratada. De esta manera si se tratase 300 m<sup>3</sup> diarios de agua el costo mínimo sería de \$ 3 600 aproximadamente. Para una relación entre costos, es necesario contar con estudios similares en cada caso o tecnología. A esto se debe agregar el costo operativo total donde intervienen las caracterizaciones del material y tipos de electrodos utilizados (Signorelli, Costa & Almeida, 2021).

Existe la posibilidad de abaratar precios por medio del reciclaje de materiales metálicos, específicamente de aluminio (Idusuyi et al., 2021).

## **Procesos oxidativos avanzados**

Se consideró solamente los costos de inversión para un sistema fotovoltaico con pilas y 2 días de autonomía que da un total de aproximadamente \$ 4 000 tomando en cuenta el módulo, la batería, controlador de carga solar y el inversor (Rubio, Chica & Peñuela, 2018).

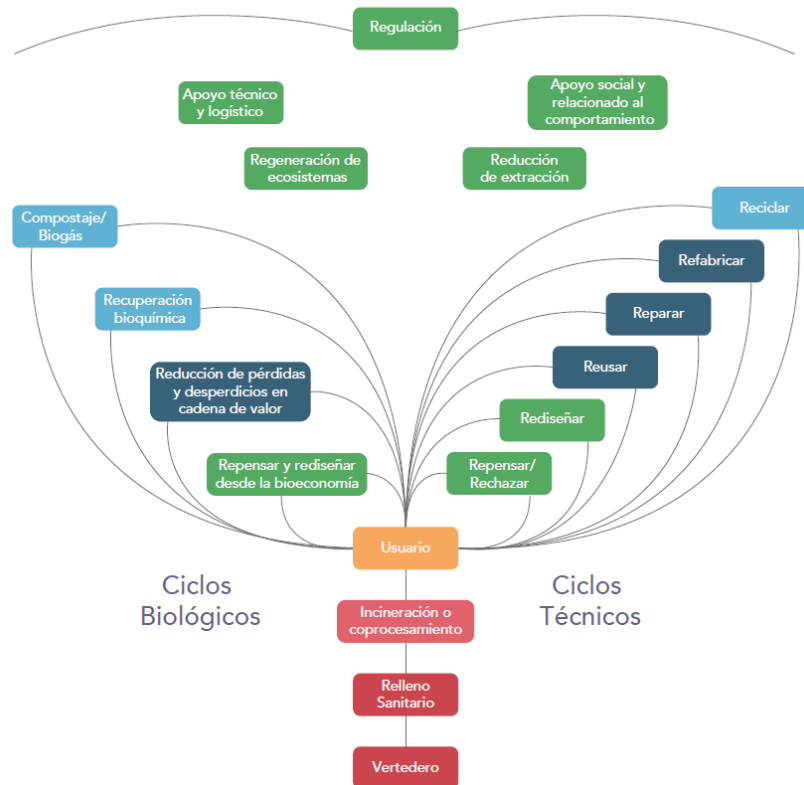
Además, debemos considerar el costo de energía, costos operativos y los costos fijos como la compra de piezas deteriorado por el tiempo. Otro dato a tomar en cuenta mencionando para la industria textil es que, por cada metro cúbico de agua residual a tratar se necesitaría de 4,60 a 21 dólares (Rodrigues, Madeira & Boaventura, 2014).

### **3.3. Relación de la Economía Circular**

Como se ha podido identificar con respecto a las tecnologías estudiadas todas estas están relacionadas explícita e implícitamente con la Economía Circular con claros beneficios hacia la industria, la economía, el medioambiente y la sociedad.

El estudio de la Economía Circular se encuentra en auge para varios sectores industriales. Ellen Macarthur Foundation (EMF) ha introducido temas relevantes para su implementación que van desde el diseño de productos y servicios hasta el trabajo colectivo.

En la figura se resume las estrategias consideradas para la Economía Circular según Ellen Macarthur Foundation la cual también se encuentra mencionada en el LibroBlanco de Economía Circular de Ecuador.



Autor: (Ellen Macarthur Foundation, 2015)

En verde se encuentran los métodos para la prevención y priorización de recursos, el color azul se relaciona con el mantenimiento de objetos, el color celeste abarca todo lo que respecta a cierre de ciclos y en el rojo están los procesos que deben tener un cuidado especial con un enfoque a la minimización (MPCEIP, 2021).

La estrategia tiene una relación directa con las acciones y los indicadores que permiten identificar el resultado de las actividades. También pueden existir los actores responsables la cual consta de una entidad que se encargara de dar seguimiento a las estrategias y acciones (MPCEIP, 2021).

### 3.3.1. Conservación y eficiencia del agua

Con respecto a la minería las estrategias implementadas en la Economía circular se basan en 3 puntos: reducción de agua, uso de los equipos

# UCUENCA

relacionados a la extensión de vida útil, y la optimización para el manejo de residuos (MPCEIP, 2021).

En el siguiente diagrama consta de estrategias orientadas al proceso productivo.

*Ilustración 2. Estrategias con enfoque hacia el proceso de extracción aurífero.*



Autor: (MPCEIP, 2021)

Si se analiza las tecnologías estudiadas para las remediaciones contaminantes en los efluentes, se puede identificar estrategias claras de donde radican sus beneficios que ya han sido mencionadas. Entre las más importantes se puede identificar:

**Reducir:** La reducción se logra por medio de medidas de conservación y eficiencia. La conservación está enfocada en el uso mínimo de agua en las operaciones que se encuentren presentes. La eficiencia hace referencia a la utilización de nuevo equipo o tecnologías orientadas a la gestión de este recurso minimizando gastos, pero obteniendo los mismos beneficios (Brears, 2019).

Las acciones que pueden tomarse por parte de la reducción son:

- Capacitación para implementar técnicas de recirculación en efluentes.
- Utilizar fuentes alternativas de agua como la proveniente de mar.
- Incentivar económicamente por el desarrollo producido hacia la Economía Circular
- Instalar tecnologías que permitan la remoción de los contaminantes presentes en los efluentes y estos a su vez estén acompañados al control y medición de consumo de agua en los procesos mineros.

(MPCEIP, 2021)

Entre los beneficios que se obtiene están: menores costos en las facturas de agua y energía, reducción de costos en la parte operativa y mantenimiento debido a que se trata menor cantidad de agua y, direccionamiento de flujos de agua hacia hábitats naturales (Brears, 2019).

Las industrias que han adoptado medidas de eficiencia para los recursos hídricos han logrado reducir de una 20 a 90% su consumo. En la siguiente tabla se enumera algunas de las opciones para su reducción:

*Tabla 41. Medida de eficiencia versus porcentaje de ahorro*

<b>Medida de eficiencia</b>	<b>Ahorro producido (%)</b>
Circuito cerrado (Reutilización)	90
Circuito cerrado (Reciclaje)	60
Válvulas automáticas	15
Reutilización de agua de lavado	50

Autor: (Brears, 2019)

**Reutilizar y reciclar:** La reutilización nos permite el uso de agua dentro de un proceso, pero sin contar con un tratamiento, mientras que el reciclaje consta del tratamiento de agua usada con la finalidad de cumplir otra aplicación. Con esto se logra tener un impacto en el aspecto económico y ambiental (Brears, 2019).

Beneficios:

- Disminución en el desvío de agua dulce
- Disminución de descargas de agua residual
- Ahorro de energía
- Prevención de contaminación

Puede darse la reutilización desde otro tipo de entorno como es la minería aurífera, que consta de la extracción de oro por medio de residuos eléctricos y electrónicos. (MPCEIP, 2021).

Así mismo, otro tipo de acción puede estar relacionada hacia el uso de equipos de segunda mano en la minería aurífera tomando como acciones para implementación de incentivos y la creación de un marco legal.

**Recuperación:** Por medio de la Economía Circular se trata de tener instalaciones que permitan la recuperación de recursos con la producción de agua limpia, permitiendo la posibilidad de generar energías renovables o la implementación de aplicaciones en otras áreas industriales como la producción de ladrillos con lodos tratados (Brears, 2019).

Otra forma de recuperar recursos es por medio de la construcción de parques ecológicos donde diferentes empresas se conectan para el intercambio de recursos, subproductos o desechos, lo que permitirá la creación de nuevas materias primas con un circuito cerrado de procesos con cantidades mínimas de residuos ambientales (Mao et al., 2018).

Un modelo claro de parque ecológico es el Parque ecoindustrial de Kalundbord ubicada en Dinamarca que ha alcanzado una simbiosis industrial con la implementación de una central eléctrica a base de carbón, una industria de calefacción, ventilación y aire acondicionado, una industria de alimentos enfocada en la crianza de peces, una industria química para la producción de

# UCUENCA

fertilizantes provenientes de lodos, una industria farmacéutica, una refinería de petróleo e industrias enfocadas a la construcción.



## CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

Por medio de la presente revisión bibliográfica se logró identificar distintos tipos de investigaciones enfocadas al tratamiento de aguas residuales para la industria minera aurífera con tecnologías más limpias o que han sido modificadas para proporcionar un eficiente manejo de contaminantes. Entre las tecnologías encontradas están: el tratamiento por membranas, adsorción, biosorción, biorremediación, fitorremediación, electrocoagulación y procesos oxidativos avanzados.

Cada una de estas tecnologías proporciona excelentes porcentajes de remoción con respecto al cianuro y mercurio que ha sido el objeto de la investigación. Sin embargo, la mayoría no llegan a estar bajo estándares permitidos de la normativa TULSMA. Aun así, se abre la posibilidad de generar tratamientos en serie que permitan a las tecnologías llegar a valores aceptables de concentración de los contaminantes.

Tanto el mercurio como el cianuro contaminan fuentes hídricas debido a su toxicidad, en caso del mercurio no es biodegradable y pueden permanecer largo tiempo generando daño a la salud y al medioambiente entendiendo que la solubilidad en el agua permite este tipo de comportamiento.

Con respecto a los tratamientos, sus conclusiones se detallan a continuación considerando los porcentajes de remoción para el mercurio y cianuro:

- La tecnología de membranas pese a ser un tratamiento eficiente y de múltiples aplicaciones, han tenido que realizarse modificaciones que le proporcione la selectividad hacia las especies estudiadas con remociones >90%. No obstante, si se genera nuevas modificaciones y tipos de membranas con otros grupos funcionales, esto puede aumentar los costos por lo que se limitaría su uso a una escala industrial. Así mismo, requiere de alta energía en comparación a otros tratamientos y su capacidad de ensuciamiento lo vuelve ineficiente.

- La adsorción, en distintas investigaciones promete ser más viable si se lo compara con la tecnología de membrana. Al igual que la anterior, es necesario generar modificaciones que ayuden a una mayor selectividad de los contaminantes por lo que siguen realizándose estudios al respecto. Aun así, sigue siendo de mayor accesibilidad, con bajos costos de operación y control, y tolerancia a distintos pH, pero posee menores porcentajes de remoción desde 10% hasta llegar a 90-95%. Un problema que presenta la adsorción es la generación de residuos, lo cual habría que investigar el uso de los mismos desde una producción más limpia.
- El intercambio iónico permite porcentajes de remoción de mayor eficiencia >70 % si se compara con la adsorción por su mayor selectividad por los iones presentes en el medio, pero posee costos más elevados. Por la abundancia que existe en Ecuador de los minerales aluminosilicatos, se considera una opción viable de aplicación ya que sería un proceso natural.
- La biosorción promete mucho en cuanto a sus porcentajes >10% y ≤95% para la mayoría de casos, y su materia prima para la formación de los biosorbente que prácticamente puede originarse de desechos agroindustriales. Uno de los materiales que resalta es la cáscara de mandarina, por su eficiencia (450mg/g) para los metales pesados como mercurio. Un aspecto importante a resaltar para biosorción es la procedencia de sus materiales, así mismo su capacidad de adsorción y su biodegradabilidad.
- La biorremediación es una de las tecnologías más prometedoras para el futuro con porcentajes >60%. Los dos puntos débiles a considerar es el tiempo de trabajo y la necesidad de nutrición para el funcionamiento de los organismos vivos. Dentro de la biorremediación se puede encontrar a la fitorremediación, considerada por expertos hasta de mayor efectividad que la biorremediación. Se evalúa a la fitorremediación como una posible opción a ser aplicada en las industrias por considerarse una tecnología

limpia y de bajos costos, puesto que se trata de una tecnología biodegradable o verde que minimizan el impacto medioambiental.

- La electrocoagulación, se puede considera de igual capacidad de remoción que la tecnología de membranas >90% para los contaminantes estudiados, sin embargo, su desventaja radica en el precio de los tratamientos para los efluentes con gastos elevados. Existe la posibilidad de generar una Economía Circular basada en el tratamiento de desechos metálicos para minimizar los precios, sin embargo, aún sigue en vías de desarrollo.
- Los procesos oxidativos avanzados prometen mucho en el futuro, posee excelentes resultados para la remoción de contaminantes. Solamente como proceso oxidativo se generan buenos resultados, pero añadiendo una fuente radiactiva posee porcentajes de remoción >90%. Sin embargo, su precio es hasta más elevado que la electrocoagulación, lo cual no lo hace económicamente viable para escalas industriales.

De manera general, se recalca la importancia de ciertos parámetros de las tecnologías, entre ellas están el pH, temperatura, dosificaciones y tiempo de trabajo. Las mismas influenciarán la eficiencia del tratamiento.

Las modificaciones juegan un papel importante en cada tecnología, debido a que ofrece una mayor eficiencia de remoción. Actualmente los procesos fisicoquímicos como la filtración de membranas, procesos electroquímicos, intercambio iónico, adsorción ya son utilizados para la remoción de metales pesados, sin embargo, se puede identificar varias desventajas como la gran cantidad de lodos, elevado uso de productos químicos, dificultades técnicas, dificultad para eliminación y reutilización, entre otros, que pueden ser evitadas con hibridaciones o modificaciones de las tecnologías que han sido probadas a nivel de laboratorio.

Así mismo, se puede explorar combinaciones de distintas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales como la de adsorción con electrocoagulación.

Se ha identificado 3 técnicas básicas para el tratamiento de aguas residuales de origen minero aurífero: tratamientos químicos, físicos, y biológicos. Los cuales abren un espectro de posibilidades para el control de contaminantes en las fuentes hídricas y a su vez del suelo. Actualmente se analiza nuevas rutas de investigación como la nanotecnología y biotecnología enfocadas en la adsorción y biorremediación respectivamente logrando obtener un mayor impacto técnico, económico, y ambiental.

Con respecto a la relación que poseen con la Economía Circular, todas estas tecnologías están encaminadas a un modelo de Economía Circular, siguiendo los principios básicos de la misma:

1. Tecnología diseñada para la eliminación de desechos y/o contaminantes
2. Mantenimiento de materiales en uso (Ciclo cerrado)
3. Regenerar y velar por los sistemas naturales
4. Tratamientos efectivos con estrategias de gestión y respeto hacia el medioambiente.

Se puede considerar la creación de ecoparques como una implementación de la Economía Circular, logrando de esta manera un impacto mayor en el medio ambiente, porque los residuos o desechos son casi nulos en la industria. No se ha evidenciado la participación de la industria minera aurífera con respecto a sus residuos con otras industrias, pero hay posibilidades en el área de construcción, industria química, de combustibles, fertilizantes, industria agroindustrial, entre otros. La sociedad científica es consciente que los recursos naturales no estarán para siempre, por lo que el cero desperdicio con la implantación de las 4R (reducir, reutilizar, reciclar y recuperar) son trascendentales.

Antiguamente hablar de una sostenibilidad ambiental y empresarial era una utopía, debido a que no existía ningún tipo de equilibrio entre el medioambiente y la minería, se anteponían las necesidades humanas a la seguridad y protección del medioambiente.

Actualmente hay una apertura inmensa de aplicaciones que dan la posibilidad de lograr la denominada *sostenibilidad ambiental*. Esta sostenibilidad se puede lograr mediante tecnologías innovadoras que ya han sido propuestas y siguen en vías de desarrollo, una nueva modalidad de gestión minera enfocada en el diseño y producto mitigando los peligros para la salud humana y medioambiente.

## RECOMENDACIONES

Una de las observaciones encontradas en la mayoría de estudios, es que los contaminantes analizados no se encuentran solos en las aguas residuales. En la vida real se podría provocar la aparición de nuevas especies derivadas de los contaminantes como metabolitos.

- ❖ Considerar el estudio de las tecnologías y sistemas multicomponentes, que es la manera en cómo habitualmente se encuentran las aguas residuales, puesto que otros compuestos pueden generar efectos en la eficiencia de remoción y en la aplicabilidad de la tecnología, por lo que se considera necesario estudiarlo.
- ❖ Dar mayor realce a la creación de técnicas biodegradables con los mínimos impactos ambientales, sin olvidarnos del modelo para fomentar la Economía Circular, como ejemplo de esto se encuentra la biorremediación.
- ❖ Realizar una comparación similar para todos los procesos, como por ejemplo en los parámetros fisicoquímicos o dosificaciones. Esto permitiría obtener datos de mayor exactitud y precisión para determinar las eficiencias generadas en cada tecnología.
- ❖ Tomar en cuenta los límites máximos permitidos de los contaminantes para determinar la efectividad de la tecnología empleada, normalmente los estudios no toman en cuenta dicho criterio.

***No podemos detener el desarrollo en nombre del medio ambiente, ni tampoco podemos ignorar al medio ambiente en nombre del desarrollo.***

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

1. ADS. (2020). Acción de Desarrollo Sostenible. Zeolitas, un proyecto de economía circular para proveer agua. Recuperado de: <https://www.adsong.org/zeolitas-un-proyecto-de-economia-circular/>
2. AGUDELO, R., BETANCUR, J., JARAMILLO, C. (2010). Biotratamiento de residuo cianurado y su relación con la salud pública. Revista Facultad Nacional de Salud Pública. Vol. 28, p. 7-20.
3. AGUILAR, A. (2020) Aprovechamiento de los desechos orgánicos en la elaboración de compost mediante la implementación de un sistema mecánico amigable con el medio ambiente. [Tesis Doctoral]. Ecuador.
4. Albatrni, H., Qiblawey, H., & El-Naas, M. H. (2021). Comparative study between adsorption and membrane technologies for the removal of mercury. Separation and Purification Technology. Vol 257, p. 117833.
5. ALCÍVAR, M., PÉREZ, A., (2018). La zeolita en la descontaminación de aguas residuales. Ecuador. Vol. 2, p. 9.
6. ALLABAKSHI, S., SRIKAR, P., GANGWAR, R., MALIYEKKAL, S. (2022). Application of Plasma-Assisted Advanced Oxidation Processes for Removal of Emerging Contaminants in Water. In: P. Singh, S., Agarwal, A.K., Gupta, T., Maliyekkal, S.M. (eds) New Trends in Emerging Environmental Contaminants. Energy, Environment, and Sustainability. Springer, Singapore.
7. ALVARADO, J., ZAMUDIO, L., SERVÍN, J., ÁLVAREZ, C., ESQUER, J., & FLORES, R. (2019), Restauración de terreros cianurados usando zeolita natural enriquecida con fertilizante NPK. INVURNUS, México, p. 5. <https://doi.org/10.46588/invurnus.v14i3.8>
8. ALVARADO, M., & OCHOA, J. (2019). Uso de mercurio en la rinconada. Revista de Medio Ambiente Minero y Minería, Bolivia, p. 28.
9. AMABILIS, L., SIEBE, C., MOELLER, G., & DURÁN, M. (2016). Remoción de mercurio por *Phragmites australis* empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes a metales pesados. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, México. Vol. 32, p. 47-53.

10. ANCULLE, F., PUMA, S. (2015) Aplicación del método de oxidación química con peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) para la reducción del cianuro presente en los efluentes de la planta de beneficio Sotrami SA.
11. APAEZ, P., LARA, M., APAEZ, P., RAYA, Y. (2019). Producción y rentabilidad de calabacita con aplicación de zeolita y fertilizante químico.
12. APAZA, H., ROJAS, Y., MAMANI, E., & CHURA, V. (2021). Microorganismos empleados para la biorremediación de efluentes mineros con cianuro. Revista Aporte Santiaguino de la UNSAM, Perú, p. 120-13. <https://doi.org/10.32911/as.2021.v14.n1.711>
13. ARANA, J., GONZÁLES, J. (2014). Prevención y control de la contaminación bioadsorción de cianuro proveniente de la industria minera aurífera.
14. ARANGURI, G., & REYES, W. (2019). Adsorción del cianuro contenido en solución acuosa usando carbón activo obtenido de residuo de café: Eficiencia de absorción, modelado de equilibrio y cinética. Scientia Agropecuaria, Perú, pág. 1-14. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.03.01>
15. ARAÚJO, B., DE SOUZA, J., SARMENTO, K., REBOUÇAS, L., DE MEDEIROS, K., & DE LIMA, C. (2021). Processos oxidativos avançados aplicados no tratamento de efluentes da produção de membranas. Revisão de literatura. Research, Society and Development, Brasil, p. 13,1,15. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14253>
16. ATEHORTÚA, A., & MEJÍA, M. (2019). Intoxicación por cianuro, perspectiva desde urgencias: Reporte de dos casos y revisión de la literatura. Medicina UPB, Bolivia, p. 6,7,8 <https://doi.org/10.18566/medupb.v38n2.a09>
17. AZUBUIKE, C., CHIKERE, C., OKPOKWASILI, G. (2016) Bioremediation techniques-classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. Word Journal of Microbiology and Biotechnology. Vol. 32. Scopus.



18. B.C.E. (2016). Banco Central del Ecuador. Sector Minero. Dirección Nacional De Síntesis Macroeconómica, Ecuador.
19. BADAUWY S. (2003) Uranium isotope enrichment by complexation with chelating polymer adsorbent. *Radiat Phys Chem*. Vol. 66, p. 67–71
20. BARDALES, J., ABANTO, L., & CERDÁN, W. (2017). Citotoxicidad y genotoxicidad causada por la contaminación con cianuro, en personas del caserío de Shiracmaca, Huamachuco, La Libertad, 2016-2017. *Revista Scientia Agropecuaria*, Perú, pág. 9-12. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.03.03>
21. BARRIGA, A. (2019). Estudio de la Extracción de Oro de Concentrados Refractarios mediante el Proceso Albion. [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional de San Agustín. Escuela Profesional De Ingeniería Metalúrgica. Perú.
22. Belda Hériz, I. (2018). Economía Circular: Un nuevo modelo de producción y consumo sostenible, Tebár Flores. Madrid, pág. 13- 17.
23. BENI, A., & ESMAEILI, A. (2020). Biosorption, an efficient method for removing heavy metals from industrial effluents: a review. *Environmental Technology & Innovation*. Vol 17.
24. BERMUDEZ, M., SALAZAR, S. (2019). Aplicación de fotocatalisis heterogénea y electrocoagulación en depuración de cromo y cadmio en agua residual proveniente de una industria metalmetálica. 2019. Ecuador. Universidad de Guayaquil.
25. BONILLA. A., MENDOZA, D., REYNEL, H. (2017) Introduction. In: Bonilla-Petriciolet A., Mendoza-Castillo D., Reynel-Ávila H. (eds) *Adsorption Processes for Water Treatment and Purification*. Springer, Cham.
26. BORETTI A, ROSA L (2019) Reassessing the projections of the world water development report. *Npj Clean Water*. Vol 21, p. 1–6.
27. BOTZ, M., MUDDER, T., AKCIL, A. (2016). Cyanide treatment: physical chemical and biological processes. *Gold ore processing*. Elsevier. Vol 2, p. 619-645.

28. BOYD, G., ADAMSON, A., MYERS, L. (1947) The exchange adsorption of ions from aqueous solutions by organic zeolites. II. Kinetics, J. Am. Chem.
29. BREARS, R. (2020). Developing the Circular Water Economy: Reduce. In: Developing the Circular Water Economy. Palgrave Studies in Climate Resilient Societies. Palgrave Pivot, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-32575-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32575-6_5)
30. BURCIAGA, N., CLAUDIO, J., CANO, L., MARTÍNEZ, A., & VEGA, P. (2020). Compósitos en estado hidrogel con aplicación en la adsorción de metales pesados presentes en aguas residuales. TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas. Revista Especializadas en Ciencia Químico-Biológica. México, p. 9-11. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.211>
31. CALVO, G., MORA, J., QUESADA, J., & QUESADA, H. (2009). Aplicación de la tecnología de membranas en el tratamiento de algunos residuos líquidos altamente peligrosos. Instituto Tecnológico de Costa Rica, p. 16.
32. CARBOTÉCNIA. (2020). Reactivación de carbón activado granular. Recuperado de: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/reactivacion-de-carbon-activado-granular/>
33. CÁRDENAS, Z., ROCHA, J., Evaluación sistemática de la tecnología de tratamiento fisicoquímico a base de zeolitas de las aguas residuales generadas por el rastro TIF del Villahermosa tabasco. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica. Vol. 14, p. 1350-1367.
34. CARRANZA, J.; ZAMBRANO, F. (2016) Influencia de la dosificación de cloro y peróxido de hidrógeno sobre el contenido final de cianuro total en el tratamiento de aguas en minera Yanacocha SRL.
35. CARRIAZO, J., SAAVEDRA, M., MOLINA, M. (2010) Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo. Educación Química. Vol 21, p. 224-229.

36. CARTAGENA, M. (2019) Biorremediación en aguas residuales contaminadas con cianuro y mercurio generadas en el proceso de la minería aurífera en Colombia, a partir de una revisión bibliográfica entre los años 2008-2018. [Tesis de Grado] Colombia.
37. CASTOLDI, L., MATINEZ, I., GUZMÁN, L. (2019). Implementación de las bases de la economía circular en el cinturón verde hortícola del conglomerado Villa María. Congreso de Ciencia y Tecnología Ambiental. Argentina.
38. CASTRILLON, M., GIRALDO, L., MORENO., J. (2012). Carbones activado obtenidos a partir de residuos de llantas con diferente tamaño de partícula. *Afinidad*. Vol. 69.
39. CHEGENI, M., SHAHEDI, A., DARBAN, A., JAMSHIDI, A. & HOMAEI, M. (2021) Simultaneous removal of lead and cyanide from the synthetic solution and effluents of gold processing plants using electrochemical method. *Journal of Water Process Engineering*, vol. 43, p. 102284.
40. CHUDNENKO, K., & PAL'YANOVA, G. (2013). Thermodynamic properties of Ag–Au–Hg solid solutions. *Thermochimica Acta*. Vol. 572, p. 65-70.
41. COLLINS, F., ROZHKOVSKAYA, A., OUTRAM, J., MILLAR, G. (2020). A critical review of waste resources, synthesis, and application for Zeolite LTA. *Microporous and mesoporous Material*. Vol 291.
42. COLPAS, F., TARÓN, A., & FON, W. (2016). Adsorción de mercurio utilizando carbones activados modificados con peróxido de hidrógeno y calentamiento. *Información tecnológica*. Universidad de Cartagena, p. 70.
43. CONDOR, J., MAZA, D. (2020) Remoción de plomo para mejorar el agua de Mórrope utilizando carbón activado del endocarpio de aceituna y cáscara de coco. Perú.
44. COSTAFREDA, J., DOMINGO, A., COSTAFREDA, J., PRADO, R., TOBÓN, J., ÁLVAREZ, Y., BELLO, L., VATTUONE, M., GARGIULO, M., & CROSTA, S. (2018). *Las zeolitas naturales de Iberoamérica*. Editorial Fundación Gómez-Pardo. Editorial Gómez-Pardo. España.

45. DARDEL F, Arden TV (2005) Ion exchangers. In: Ullmann F, Gerhartz W, Yamamoto YS, Campbell FT, Pfefferkorn R, Rounsaville JF (eds) Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Wiley-VCH/GmbH & Co. KGaA, Weinheim
46. DAS, P., MONDAL, P., SINHA, A., BISWAS, P. & PURKAIT, M. (2021). Integrated ozonation assisted electrocoagulation process for the removal of cyanide from steel industry wastewater. *Chemosphere*, vol. 263, p. 128370.
47. DE SOUZA, J., ARAÚJO, B., SARMIENTO, K., REBOUÇAS, L., DE MEDEIROS, K., & DE LIMA, C. (2021). Membranas de nanocompósitos poliméricos com óxido de zinco para o tratamento de efluentes: Revisão de literatura. *Research, Society and Development*. Brasil.
48. De Souza, P., Junior, L., Valladares, K., Karp, S., Siqueira, J., Rodrigues, C., & Soccol, C. (2022). Enzymatic bioremediation: current status, challenges, future prospects, and applications. In *Development in Wastewater Treatment Research and Processes* (pp. 355-381). Elsevier.
49. DÍAZ, F. (2014). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista de salud pública*. Vol. 16, p. 947-957.
50. DRIOLI, E., CRISCUOLI, A., CURCIO, E. (2011) Membrane contactors: fundamentals, applications and potentialities. Elsevier, Vol 11, pag 1-20.
51. DURANTE, E. (2017). Tratamiento por electrocoagulación de aguas de cianuración generadas en el beneficio del oro en una zona minera del sur de Bolívar, Colombia. [Tesis de licenciatura] Universidad de Córdoba.
52. EL-ESWED B. (2019) Aluminosilicate Inorganic Polymers (Geopolymers): Emerging Ion Exchangers for Removal of Metal Ions. In: Inamuddin, AHAMED M., ASIRI A. (eds) *Applications of Ion Exchange Materials in the Environment*. Springer, Cham.

53. ESMALI, F., MANSOURPANAH, Y., FARHANDI, K., AMANI, S., RASOULIFARD, A. & ULBRICHT, M. (2020). Fabrication of a novel and highly selective ion-imprinted PES-based porous adsorber membrane for the removal of mercury (II) from water. *Separation and Purification Technology*. Vol. 250.
54. ESTAY, H., ORTIZ, M., ROMERO, J. (2013) A novel process based on gas filled membrane absorption to recover cyanide in gold mining. *Hydrometallurgy*. Vol. 134, p. 166-176.
55. ESTAY, H., RUBY, R., QUILAQUEO, M., SERICHE, G., CORTÉS, I., GIM, M. & BARROS, L. (2021). Enhancing the effectiveness of copper and cyanide recovery in gold cyanidation: A new integrated membrane process. *Hydrometallurgy*. Vol. 202.
56. FERNÁNDEZ VILLALOBOS, N. (2019). Exposición a mercurio de las personas que trabajan en la minería artesanal de oro, Costa Rica, 2015-2016. *Revista del Centro Centroamericano de Población de la Universidad de Costa Rica*, pág. 19-22. Doi: <http://dx.doi.org/10.15517/psm.v17i1.37789>
57. FIGOLI, A., CRISCUOLI, A. (2017) *Sustainable Membrane Technology for Water and Wastewater Treatment*. Green Chemistry and Sustainable Technology. Springer.
58. FLANIGEN, E., BROACH R., WILSON S. (2010) Introduction. In: Kulprathipanja S (ed) *Zeolites in industrial separation and catalysis*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, Weinheim
59. Fundación Ellen MacArthur. (s.f.). *Economía Circular*. Obtenido de Fundación Ellen MacArthur: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/our-story/partners/global/Renault>
60. Fundación Ellen McArthur. (2012). *Towards the circular economy vol. 1*, Cowes-Reino Unido, p.. 17,18,19,20.
61. Fundación Ellen McArthur. (2015). *Circularity Indicators: An approach to Measuring Circularity*, Cowes-Reino Unido, p. 23,24,25 y26.
62. Fundación Ellen McArthur. (2015). *Growth Within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe*. Cowes-Reino Unido: McKinsey.

63. Fundación Ellen McArthur. (2015). Hacia una Economía Circular: motivos económicos para una transición acelerada. Cowes-Reino Unid, p. 20-30.
64. GAMARRA, R. (2017). Eficacia de la tecnología de membranas para convertir efluentes mineros, en aguas para riego. [Tesis de maestría]. Universidad de Piura, p. 107.
65. GARCÍA, M., LUNA, G., GALLEGOS, M., PRECIADO, P., & CERVANTES, M. (2020). Impacto de aguas residuales sobre algunas propiedades y acumulación de metales pesados en el suelo Impact of wastewater on soil properties and accumulation of heavy metals. Universidad Politécnica de la Región Laguna, p. 4-10.
66. GARCÍA, R., CAMPOS, J., CRUZ, J., CALDERÓN, M., RAYNAL, M., & BUITRÓN, G. (2016). Biosorption of Cd, Cr, Mn, and Pb from aqueous solutions by Bacillus sp strains isolated from industrial waste activate sludge. TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-biológicas. España.
67. GAVIRIA, A.; MEZA, L. (2006) Análisis de alternativas para la degradación del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del municipio de Segovia, Antioquia y en la planta de beneficio de la empresa mineros nacionales, municipio de Marmato, Caldas. Dyna, vol. 73, p. 31-44.
68. GAVRILESCU, M. (2022). Enhancing phytoremediation of soils polluted with heavy metals. Current opinion in biotechnology, p. 74, 21-31
69. GHAEDI, M. (ed.). (2021) Adsorption: Fundamental Processes and Applications. Academic Press.
70. GHAEDI, M. (Ed.). (2021). Adsorption: Fundamental Processes and Applications. Academic Press.
71. GONZALEZ, M., MONZON, D., PEREYRA, A. & BESALDELLA, E. (2017) Síntesis de zeolitas a partir de residuos industriales. Jornadas en Ciencias Aplicadas" Dr. Jorge Ronco". Vol. 1.

72. GORDILLO, M. (2018) Biodegradación de cianuro de aguas y suelos contaminados por la minería de oro. [Tesis doctoral]. Universidad de América. Colombia.
73. GUAICHA, H., & CORREA, L. (2017). IMPACTOS AMBIENTALES EN LA EXPLOTACIÓN MINERA AURÍFERA Y AL SER HUMANO. CASO DE ESTUDIO. DELOS: Desarrollo Local Sostenible. Vol. 10, p. 22.
74. GUALTEROS, D. & Piñeros, S. (2021). Estudio comparativo entre la capacidad de adsorción del carbón activado y la zeolita para la remoción de nitrógeno amoniacal en lixiviados de un relleno sanitario.
75. GUERRERO, A., GUARDADO, R., BLANCO, T. (2003). La conservación del patrimonio geológico y minero como medio para alcanzar el desarrollo sostenible. Cuba. Revista de Minería y Geología. P. 2-3.
76. GUERRERO, J. (2015). Cianuro: Toxicidad y destrucción biológica. Dirección de Salud Ocupacional. Perú, p. 3.
77. HAN, L. (2021) Aging and Degradation of Ion-Exchange Membranes. In: Zhang Z., Zhang W., Chehimi M.M. (eds) Membrane Technology Enhancement for Environmental Protection and Sustainable Industrial Growth. Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development). Springer, Cham.
78. HANELA, S., DURÁN, J., JACOBO, S., Cálculo para el escaldado de un sistema de tratamiento para efluentes con complejos ferrocianurados empleando Oxidación Avanzada (UV-ozono) y lecho de Zeolita modificada.
79. HARJA, M., BUEMA, G., SUTIMAN, D., & CRETESCU, I. (2013). Removal of heavy metal ions from aqueous solutions using low-cost sorbents obtained from ash. Chemical Papers. Slovakia.
80. HERRERA CASTILLO, K. P. (2021). Concentración de mercurio total presente en la concha negra, Anadara tuberculosa, habitualmente comercializada en el mercado de Puerto Bolívar, Ecuador. [Tesis de licenciatura]. Universidad Estatal Península de Santa Elena, p. 54.

81. HIDALGO, A. (2008). Curso de tratamiento de aguas, desalación y depuración de Membranas. Universidad de Murcia. España.
82. HUSEIN, D. (2013). Adsorption and removal of mercury ions from aqueous solution using raw and chemically modified Egyptian mandarin peel. *Desalination and Water Treatment*. Vol 51, p. 34-36.
83. IBÁÑEZ, M. (2019). ve CECT5344. [Tesis de licenciatura] Universidad de Córdoba. España.
84. IDUSUYI, N., AJIDE, O., Abu, R., OKEWOLE, O., & IBIYEMI, O. (2021). Low-cost electrocoagulation process for treatment of contaminated water using aluminium electrodes from recycled cans. *Materials Today: Proceedings*.
85. IYER, V., & GORAIN, B. (2019). *Innovations and Breakthroughs in the Gold and Silver Industries* (Springer Nature Switzerland AG ed., Vol. 1. Process Research Ortech Inc
86. JAKOVLJEVIĆ, K., RANĐELOVIĆ, D., MIŠLJENOVIĆ, T. (2021) Phytoremediation of Mine Waste Disposal Sites: Current State of Knowledge and Examples of Good Practice. In: Joshi S.J., Deshmukh A., Sarma H. (eds) *Biotechnology for Sustainable Environment*. Springer, Singapore.
87. JAWANDAND S., RANDIVE K. (2021) A Sustainable Approach to Transforming Mining Waste into Value-Added Products. In: Randive K., Pingle S., Agnihotri A. (eds) *Innovations in Sustainable Mining*. Earth and Environmental Sciences Library. Springer, Cham.
88. JIANG X. YU. (2019) Versatile core/shell-like alginate@polyethylenimine composites for efficient removal of multiple heavy metal ions (Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>): Batch and fixed-bed studies. Vol 118, p.110526.
89. KHORAMZADEH, E., NASERNEJAD, B. & HALLADJ, R. (2013). Mercury biosorption from aqueous solutions by Sugarcane Bagasse. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. Vol 44, p. 266-269.
90. KHURSHID, A., AKHTAR, N., NAQASH, N., CHOPRA, C., SINGH, R., VINEET, K., KUMAR, S., MULLA, I., HELOISA, J. (2022).



- Bioprospecting culturable and unculturable microbial consortia through metagenomics for bioremediation. *Cleaner Chemical Engineering*. Elsevier.
91. KIM, S., SIN, A., NAM, H., PARK, Y., LEE, H., & HAN, C. (2022). Advanced oxidation processes for microplastics degradation: A recent trend. *Chemical Engineering Journal Advances*. Vol. 9.
  92. KURNIAWAN, T., CHAN, G., BABEL, S. (2006). Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metal. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 118, p. 83-98.
  93. LANDABURU, J., GARCÍA, R., MOLINA, S., RODRIGUEZ, L., RABABÁN, L., & GARCÍA, E. (2016). Fouling prevention, prepaiping for re-use and membrane recycling. Towards circular economy in RO desalination. *Desalination*. Vol. 393, p. 16-30.
  94. LAWLER, W., BRADFORD, Z., CRAN, M., DUKE, M., LADEWIG, B., (2012). Toward new opportunities for reuse, recycling and disposal of used reverse osmosis membranes. *Desalination*. Vol 299, p. 103-112.
  95. LAZO, D., & SANCHEZ, T. (2019). Uso de las algas *Macrocystis Pyrifera* Bory y *Lessonia Nigrescens* Bory para el tratamiento de efluentes mineros. [Tesis de licenciatura]. Universidad Peruana Unión, p. 16.
  96. LEHMANN, L. (2019). Economía Circular el cambio cultural: De la gestión de residuos a la gestión de recursos, Editorial Ciudad Autónoma de Buenos Aires: prosa y Poesía American Editores, 2019, Argentina.
  97. LEÓN, C. (2012) Desarrollo sostenible y minero. Pp.1-2. Recuperado de: <http://red.pucp.edu.pe/ridei>.
  98. LEÓN, D. (2017). Bioadsorción de mercurio (II) en aguas residuales generados por el centro minero informal de Lunar de Oro, ubicado en el Distrito de Ananea con biomasa de waraqqo (*Echinópsis maximiliana*). [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional del Altiplano, Perú, p. 66.
  99. LEY MINERA, (2020). Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables. Ecuador,

100. LEYTE, J., GONZÁLEZ, E., GUTIÉRREZ, L., MÁRQUEZ, L., & CRISTO, L. (2019). Caracterización de tres bioindicadores de contaminación por metales pesados. *Revista Cubana de Química*, p. 5.
101. LI, C., ZHONG, H., WANG, S., XUE, J., & ZHANG, Z. (2015). Removal of basic dye (methylene blue) from aqueous solution using zeolite synthesized from electrolytic manganese residue. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Vol. 23, p. 344-352.
102. LI, J., CHEN, W., ZHOU, W. (2020) Synergistic degradation of pyrene by *Pseudomonas aeruginosa* PA06 and *Achromobacter* sp. AC15 with sodium citrate as the co-metabolic carbon source. *Ecotoxicology*.
103. LICONA, S. P. V., & NEGRETE, J. L. M. (2019). Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: Riesgo por ingesta. *Acta Biológica Colombiana*. P. 3-5.
104. LIMA, E., ABANTO, L., SUERO, A., HUAMANÍ, R., ALIAGA, I., ASCUÑA, V., & CRUZ, S. (2019). Estudio de los efluentes líquidos de complejos cianurados para la reutilización industrial mediante el método de jarras. *Revista Boliviana de Química*. P. 3.
105. LIN, W., LIU, X., DING, A., NGO, H., ZHANG, R., NAN, J., ... & LI, G. (2022). Advanced oxidation processes (AOPs)-based sludge conditioning for enhanced sludge dewatering and micropollutants removal: A critical review. *Journal of Water Process Engineering*. Vol. 45.
106. LIU, Y., & ADEWUYI, Y. (2016). A review on removal of elemental mercury from flue gas using advanced oxidation process: chemistry and process. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 112, p. 199-250.
107. LLERENA, G., & LÓPEZ, I. (2018). Degradación del Cianuro de Efluente minero usando dos reactivos: Metabisulfito de sodio y la mezcla metabisulfito con peróxido de hidrógeno. *TECCIENCIA*. Perú, p. 6.

108. LOVASOA, R., KAROUI, A., HARIANAIVO, A., HAMMA, Y. (2017). Bioremediation of soil and water polluted by cyanide: A review. *African Journal of Environmental Science and Technology*. Vol 11, p 272-291
109. LOZADA, J. (2017). Opciones para una minería. *Revista Geográfica Venezolana*. P. 12-14.
110. MAE., Ministerio del Ambiente del Ecuador, Libro VI Anexo 1, Normal de la Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua, (2017)
111. MALIK R, DAHIYA S, LATA S (2017) An experimental and quantum chemical study of removal of utmostly quantified heavy metals in wastewater using coconut husk: a novel approach to mechanism. *Int J Biol Macromol*. P. 139–149.
112. MALIK R., BHASKARAN, MEENA, LATA S. (2021) Heavy Metal Removal from Wastewater Using Adsorbents. In: Inamuddin, Ahamed M.I., Lichtfouse E. (eds) *Water Pollution and Remediation: Heavy Metals. Environmental Chemistry for a Sustainable World*, vol 53. Springer, Cham.
113. MALLQUI, J. (2018) Reducción de cianuro y mercurio mediante micro-nanoburbujas de aire con peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) por minera artesanal en el Centro Poblado La Molina-Carabayllo Escala de Laboratorio 2018.
114. MANCILLA, O., CRUZ, E., SANCHEZ, E., MENDOZA, I., OLGUÍN, J., CAN, Á., & FLORES, H. (2020). Metales pesados, arsénico y boro en agua de riego subterránea en zacoalco de torres y autlán de navarro, Jalisco. *Revista Agrociencia*.
115. MAO, J., LI, C., PEI, Y., XU, L. (2018). Implementation of a Circular Economy. In: *Circular Economy and Sustainable Development Enterprises*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-8524-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-10-8524-6_9)
116. MARTÍNEZ, A., PADRÓN, W., RODRÍGUEZ, O., CHIQUITO, O., ESCAROLA, M., HERNÁNDEZ, J. MENDEZ, G., TINOCO, J. & Martínez-Castillo, J. (2014). Alternativas actuales del manejo de lixiviados. *Avances en química*. Vol. 9, p. 37-4

117. MARTÍNEZ, J., & CASALLAS, M. (2018). Contaminación y remediación de suelos en Colombia: Aplicación a la minería de oro. Editorial EAN.
118. MATA, O., TORRES, I., SILLER, M. MOLINA, S. (2019) Evaluación de reuso de agua industrial mediante el tratamiento de generación electroquímica de un agente coagulante. Vol 13, p. 32.
119. MEDINA, D., MARTIN, D., LÓPEZ, C., GARCÍA, L., AGUILAR, S., JARAMILLO, X., ROSADO, D., & GARCÍA, A. (2021). Removal of Pb (II) in Aqueous Solutions Using Synthesized Zeolite X from Ecuadorian Clay. Revista de Ingeniería e Investigación. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v41n2.89671>
120. MEGO, E. (2016). Evaluación de la oxidación química con el peróxido de hidrógeno y ósmosis inversa en el tratamiento de efluentes de Minera Coimolache. [Tesis de maestría]. Universidad de Cajamarca. P. 112.
121. MÉNDEZ, B., LIRA, R. (2019) Uso potencial de la zeolita en la agricultura sustentable de la nueva revolución verde. Ecosistemas y recursos agropecuarios. Vol. 6, p. 191-193.
122. METUKO, L., JACKSON, V., NTWAMPE, S. (2013) Biodegradation of free cyanide using Bacillus sp. Consortium dominated by Bacillus safensis, Lichenformis and Tequilensis strains. A bioprocess supported solely with whey.
123. METUKO, L., NTWAMPE, S., UTOMI, C., MOBO, M., MUNDUMBI J., NOGONGANG, M., & AKINPELU, E. (2017). Performance of a continuously stirred tank bioreactor system connected in series for the biodegradation of thiocyanate and free cyanide. Journal of environmental Chemical Engineering. Vol 5, p. 1936-1945.
124. MITRA, M., MAHAPATRA, M., DUTTA, A., ROY, J., KARMAKAR, M., DEB, M., MONDAL, H., CHATTOPADHYAY, P., BANDYOPADHYAY, A., & SINGHA, N. (2019) Carbohydrate and collagen-based doubly-grafted interpenetrating terpolymer hydrogel via N-H activated in situ allocation of monomer for superadsorption of

- Pb (II), Hg (II), dyes, vitamin-C and p-nitrophenol. *Journal of Hazardous Materials*. Vol 369, p. 746-762.
125. MOHAMED, B., LI, L., HAMID, H. & JERONIMO, M. (2022) Sludge-based activated carbon and its application in the removal of perfluoroalkyl substances: A feasible approach towards a circular economy. *Chemosphere*.
126. MONGABAY. (2020). Ecuador: contaminación en efluentes del río Napo apunta a la minería. *Periodismo Ambiental Independiente en Latinoamérica*
127. MORA, A., JUMBO, D., JUMBO, D., GONZÁLEZ, M., & BERMEO, S. (2016). Niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca del río Puyango, Ecuador. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, p. 2.
128. MORANTE, F., *Las zeolitas de la costa de Ecuador (Guayaquil): geología, caracterización y aplicación*. [Tesis Doctoral]. Ecuador.
129. MOUSSAVI, G.; MAJIDI, F.; FARZADKIA, M. (2011) The influence of operational parameters on elimination of cyanide from wastewater using the electrocoagulation process. *Desalination*, 2011, vol. 280, p. 127-133.
130. NANSEU, C., TCHAMANGO, S., NGOM, P., DARCHEN, A., NGAMENI, E. (2009) Mercury (II) removal from water by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes. *Journal of hazardous materials*, vol. 168, p. 1430-1436.
131. NASEF M., UJANG Z. (2012) Introduction to Ion Exchange Processes. In: Dr. I., Luqman M. (eds) *Ion Exchange Technology I*. Springer, Dordrecht.
132. NIÑO, G., BARRRERA, C., GARCÍA, A., & LUMBAQUE, E. (2013). La electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. *Revista de Facultad de Ciencias Básicas*. España. Vol. 9, p. 306-317.
133. OBREGÓN, D., ISABEL, I., & SUN, R. (2020). Remoción de mercurio empleando carbón activado preparado a partir de aguaje (*Mauritia flexuosa*). *Revista de la Sociedad Química del Perú*. Vol. 86, p. 70-87.

134. ORDOÑEZ, Y., MERA, P., BELALCAZAR, G., & PORTILLO, J. (2021). Intoxicación por cianuro y accidente cerebrovascular en fosa posterior: Reporte de un caso y revisión de la literatura. *Rev. Toxicol. Argentina*, p. 1.
135. ORTEGA, A., & SÁNCHEZ, N. (2021). Tratamientos avanzados para la potabilización de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. Vol. 31, p. 121-134.
136. OTERO, O. (2017). Evaluación del potencial de producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de la caña de azúcar. Universidad Técnica de Madrid. [Tesis Doctoral]. España.
137. OVIEDO, R., MOINA, E., NARANJO, J., & BARCOS, M. (2017). Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. *Bionatura*. Vol. 2, p. 437-441.
138. OVIEDO, R., MOINA, E., NARANJO, J., BARCOS, M. (2017). Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. *Ecuador*, p 1-2.
139. PADILLA, A., & RIVERO, J. (2016). Producción de Biogás y compost a partir de Residuos Orgánicos recolectados del Complejo Arqueológico Huaca de la Luna. *Revista Ciencia y Tecnología*. Vol. 12, p. 29-43.
140. PANDURO, G., RENGIFO, G., BARRETO, J., ARBAIZA, Á., IANNACONE, J., ALVARIÑO, L., & CRNOBRNA, B. (2020). Bioacumulación por mercurio en peces y riesgo por ingesta en una comunidad nativa en la amazonia peruana. *Revistas de Investigaciones Veterinarias del Perú*, p. 2.
141. PEÑA, E., NEGRETE, J., HERNANDEZ, J., CASTELLON, J. (2016) Remoción de mercurio en agua residual minera por la técnica electrocoagulación. Colombia.
142. PEZORO, J., CUADRA, R. (2017). Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable. *Química Viva*. Vol. 17, p 56-69
143. PIEDRA, N., & ZAMBRANO, Y. (2021). Aplicación de electroquímica en la remoción de contaminantes presentes en aguas

residuales generadas de una planta procesadora de material minero [Tesis de licenciatura]. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química. Ecuador, pág. 87.

144. PRIMICIAS. (2021). Nombre del sitio web: <https://www.primicias.ec/noticias/economia/protesta-peru-contaminacion-rio-mineria-ecuador/>
145. PUMACAJIA, M., & HUAMAN, M. (2018). Uso de residuos de ladrillo para la formación de zeolita sintética NAP y evaluación de su capacidad de adsorción de Pb<sup>2+</sup> Contenido en Solución.
146. QUISPE, G. CORAL, K. (2018) Biosorción de Pb (II) por la bacteria pseudomona aeruginosa en sueño contaminado por minerales
147. QUISPE, K. (2015). Electrocoagulación en la remoción de mercurio de aguas residuales en el centro poblado la Rinconada Puno. 2015.
148. RASHIDI, N., YUSUF, S. (2017). Revisión sobre avances tecnológicos recientes en la producción de carbón activado a partir de residuos de la palma de aceite. Revista Palmas. Vol. 38, p. 86-118.
149. REPETTO, M., REPETTO, G. (2009). Toxicología Fundamental. Cuarta Edición. Editorial Diaz Santos.
150. RESTREPO, O. MOTOYA, C., MUÑOZ, N. (2006) Degradación microbiana de cianuro procedente de planta de beneficio de oro mediante una cepa nativa de *P. fluorocens*. Dyan. Vol. 73, p. 45-51.
151. RIASCOS, C. (2020). Economía circular y bioeconomía, pilares del desarrollo sostenible. Revista Colombiana de Biotecnología. Vol. 22, p 3-5.
152. RIGNACK, M., SÁNCHEZ, A., REYES, A., & ARIAS, R. (2020). Reducción de metales pesados en el crudo ligero cubano con el uso de zeolita. Revista de Tecnología Química. Ecuador, p. 2-6.
153. RIVERA, M., MORENO, W., UVIDIA, D., ORTIZ, H., & TRUJILLO, B. (2020). Biorremediación de efluentes de la industria minera contaminados con cianuro. Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional. Vol. 5(3), p. 181-191.
154. ROBLES, F., ROJO, J. (2011). Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes: aplicación

de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales. Ediciones Díaz de Santos.

155. ROCHA, R., MOROZIN, VENTURA DA SILVA, A. & ALBERTO DA SILVA, A. (2009). Use of rice Straw as biosorbent for removal of Cu (II), Zn (II), Cd (II) an Hg (II) ions in industrial effluents. *Journal of Hazardous Materials*. Vol 166, p. 383-388.
156. RODRIGUES, C.; MADEIRA, L.; BOAVENTURA, R. (2014) Synthetic textile dyeing wastewater treatment by integration of advanced oxidation and biological processes–Performance analysis with costs reduction. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol. 2, p. 1027-1039.
157. RODRIGUEZ, M., BAENA, F., ARROYO, F., VILCHES L. (2021) Forward Osmosis for Sustainable Industrial Growth. In: Zhang Z., Zhang W., Chehimi M.M. (eds) *Membrane Technology Enhancement for Environmental Protection and Sustainable Industrial Growth. Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development)*. Springer, Cham.
158. ROJAS, I. (2003). Definición de producción más limpia. *Revista Tecnología en Marcha*. Costa Rica. Vol 16, p. 1-2.
159. ROJAS, J., GUITIÉRREZ, E., DE JESUS, G., (2016). Obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodo de plantas de tratamiento de agua residual de una industria avícola. *Ingeniería, investigación y tecnología*. Vol. 17, p. 453-462.
160. RUBIO, A., CHICA, E.; PENUELA, G. (2018) Photovoltaic array for powering advanced oxidation processes: Sizing, application and investment costs for the degradation of a mixture of anthracene and benzo [a] pyrene in natural water by the UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol. 6, p. 2751-2761.
161. RUIZ, A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*. Vol 2, p.50-56.



162. RUIZ, Á. (2005). La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, pág. 3-4.
163. RUIZ, A. (2014) La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de investigación*. Vol. 2, p. 49-56.
164. SADEGHI, H., MOHAMMADPOUR, A., SAMAEI, M., AZHDARPOOR, A., HADIPOOR, M., MEHRAZMAY, H., & KHANEGHAH, A. (2022). Application of sono-electrocoagulation in arsenic removal from aqueous solutions and the related human health risk assessment. *Environmental Research*.
165. SAHA, G., HOQUE, M., MIAH, M., HOLZE, R., CHOWDHURY, D., KHANDAKER, S., & CHOWDHURY, S. (2017). Biosorptive removal of lead from aqueous solutions onto Taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) as a low cost bioadsorbent: Characterization, equilibria, kinetics and biosorption-mechanism studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 5(3), p. 2151-2162.
166. SALAZAR, B., ZEA, V., VILLANUEVA, J., & GONZALES, E. (2021). Cd (II) and Pb (II) biosorption in aqueous solutions using agricultural residues of *Phaseolus vulgaris* L.: Optimization, kinetics, isotherms and desorption. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*.
167. SALDARRIAGA, S., HERNANDEZ, G., IQBAL, H., BARCELO, D. & PARRA, R. (2020) Biorremediation potential of *Sargassum* sp. Biomass to tackle pollution in coastal ecosystems: Circular economy approach. *Science of The Total Environment*. Vol. 715.
168. SALINAS, E., RIVERA, I., CARRILLO, F., PATIÑO, F., HERNANDEZ, J., HERNÁNDEZ, L. (2004). Mejora del proceso de cianuración de oro y plata mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono. México. Vol. 48 *Revista de la Sociedad Química de México*. P. 315-320.
169. SANCHEZ, J., GONZÁLEZ, R., BLANCAS, F., & FONSECA, Á. (2020). Utilización de subproductos agroindustriales para la

- bioadsorción de metales pesados. TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas. México, p. 4-8.
170. SAXENA, G., KUMAR, V., & SHAH, M. (Eds.). (2020). Bioremediation for environmental sustainability: toxicity, mechanisms of contaminants degradation, detoxification and challenges. Elsevier.
171. SELAMAT S., HALMI M., ABDULLAH S. (2018) Optimization of lead (Pb) bioaccumulation in *Melastoma malabathricum* L. by response surface methodology (RSM). *Rend Lincei* 29:43–51. <https://doi.org/10.1007/s12210-017-0656-5>
172. SENTHIL, P., GUNASUNDARI, E. (2018). Bioremediation of Heavy Metals. In: Varjani, S., Agarwal, A., Gnansounou, E., Gurunathan, B. (eds) *Bioremediation: Applications for Environmental Protection and Management. Energy, Environment, and Sustainability*. Springer, Singapore.
173. SHEN, X., DAI, M., YANG, J., SUN, L., TAN, X., PENG, C., ... & NAZ, I. (2021). A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: Performance and challenges. *Chemosphere*.
174. SHETTIMA, A., HUSSIN, M., AHMAD, Y., & MIRZA. J., (2016). Evaluación of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*.
175. SIGNORELLI, S., COSTA, J., & de ALMEIDA, A. (2021). Electrocoagulation-flotation for orange II dye removal: kinetics, costs, and process variables effects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106157.
176. SILVA, A., MONGES, S., BENGGOA, C., TORRES, A., RIBEIRO R. (2018) Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales.
177. SINGH, U. ARORA, N., SACHAN, P. (2018). Simultaneous biodegradation and cyanide present in coke-oven effluent using immobilized *Pseudomonas putida* y *stutzeri*. *Juornal Microbiology*. Vol 491, p 38-44

178. SIVARAJ, R., NAMASIVAYAM, C., KADIRVELU, K. (2001) Orange peel as an adsorbent in the removal of acid violet 17 (acid dye) from aqueous solutions, *Waste Manag.* Vol. 21, p. 105–110.
179. SOLÍS, C., VÉLEZ, C., RAMÍREZ, J. (2017). Tecnología de membranas: ultrafiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería.* Vol. 11. Pp. 3
180. SOMMERVILLE, R., BLISSETT, R., ROWSON, N., & BLACKBURN, S. (2013). Producing a synthetic zeolite from improved fly ash residue. *International Journal of Mineral Processing.* Vol 124, p. 20-25.
181. SOSA, J., BALAGURUSAMY, N., GADI, S., MONTAÑEZ, J., BENAVENTE, J., MORALES, L. (2022). Critical Process Parameters and Their Optimization Strategies for Enhanced Bioremediation. In: Suyal, D.C., Soni, R. (eds) *Bioremediation of Environmental Pollutants.* Springer, Cham.
182. SPITZ, K., & TRUDINGER, J. (2019). Mining and the environment: from ore to metal. *CRC Press.* Vol 2, p. 49-60.
183. SRIVASTAVA, A., SIGH, R., SINGH, D. (2021). Chapter 20- Microbe-based biorreactor system for bioremediation of organic contaminants: present and future perspective. In *Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants.* Elsevier, p. 241-253.
184. TABIBIAN, S., ARMIN, S., & YOUSEF, S. (2020). Contaminación por mercurio en árboles de carpas (*Carpinus betulus*) en espacios verdes en el área del parque Industrial. *Revistas Temas Agrarios*, p. 8-9.
185. TAGHIZADEH, M., TAGHIZADEH A. (2018), Mesoporous activated carbons of low-cost agricultural bio-wastes with high adsorption capacity: preparation and artificial neural network modeling of dye removal from single and multicomponent (binary and ternary) systems, *J. Mol. Liq.* Vol. 269, p. 217–228.
186. TIBOR, S., GRANDE, C. (2022) Industrial production of activated carbon using circular bioeconomy principles: Case study from a Romanian company. *Cleaner Engineering and Technology.* Vol. 7, p. 100443.

187. TORRES, M., & CHILIGUANO, G. (2019). Ferrita de manganeso aplicada a remoción de mercurio (ii) y cobre (ii) en solución acuosa. [Tesis de licenciatura]. Universidad Técnica de Machala, Ecuador, p. 19-33.
188. TOUNSI, H., CHAABANE, T., OMINE, K., SIVASANKAR, V., SANO, H., HECINI, M., & DARCHEN, A. (2022). Electrocoagulation in the dual application on the simultaneous removal of fluoride and nitrate anions through respective adsorption/reduction processes and modelling of continuous process. *Journal of Water Process Engineering*. Vol. 46, p. 102584.
189. VALDERRAMA, L., CHAMORRO, J., OLGUÍN, D., RIVERA, J., & OYARCE, J. (2012). Amalgamación de concentrado de oro obtenido en concentrador knelson. *Revista de la Facultad de Ingeniería, UDA, Chile*, p. 4-12.
190. VALDÉS M., Pérez A., Díaz M. (2006) Zeolites and zeolite-based materials in analytical chemistry. *Trends Anal Chem*. Vol. 25, p. 24–30
191. VAN J., HATMSEN, P., BOS, H. (2020). Biomasa para la economía circular. *Wageningen Food & Biobased Research*.
192. VELA, N., GUAMÁN, M., & GONZÁLEZ, N. (2019). Biorremediación eficiente de efluentes metalúrgicos mediante el uso de microalgas de la amazonia y los andes del ecuador. *Revista internacional de contaminación ambiental. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Ecuador*.
193. VENA, G. (2019). Biosorption of heavy metal cd (ii) for the treatment of mining effluents through sodium alginate biosorción del metal. *Revista Boliviana de Química, Bolivia*, p. 4-8.
194. VERA, L., GARCÍA, N., UGUÑA, M., FLORES, M., GONZÁLEZ, E., & BRAZALES, D. (2018). Tecnologías de biosorción y membranas en la eliminación de metales pesados. *Tecnología y Ciencias del Agua, Ecuador*, p.8-13

195. VIELA, W., ESPINOSA, M., BRAVO, A. (2020) La contaminación ambiental ocasionada por la minería en la provincia de El Oro. Ecuador. *Estudios de Gestión*. Vol. 8, p, 210-228.
196. VILLEGAS, V., & LAINES, J. (2017). Vermicompostaje: I avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. Vol. 8, p. 393-406.
197. WITEK, A., SZAFRAN, R., & MODELSKI, S. (2011). Biosorption of heavy metals from aqueous solutions onto peanut shell as a low-cost biosorbent. *Desalination*. Vol. 265, p. 126-134.
198. WU, B., LUO, S., LUO, H., HUANG, H., XU, F., FENG, S., & XU, H. (2022). Improved phytoremediation of heavy metal contaminated soils by *Miscanthus floridulus* under a varied rhizosphere ecological characteristic. *Science of The Total Environment*. Vol. 808.
199. XUE, X., CHENG, R., SHI, L., MA, Z. & ZHENG, X. (2017). Nanomaterials for water pollution monitoring and remediation. *Environmental Chemistri Letters*. Vol 15, p. 23-27.
200. YAASHIKAA, P., KUMAR, P., JEEVANANTHAM, S., SARAVANAN, R. (2022). A review on bioremediation approach for heavy metal detoxification and accumulation in plants. *Environmental Pollution*.
201. YAN, X., FENG, L., LI, P., REN, B., GAO, S., CAO, R. (2021). Fast and efficient removal of mercury ions using zirconium-based metal-organic framework filter membranes. *Inorganic Chemistry Communication*. Vol. 131, p. 108796.
202. YANNOPOULOS, J. (1991). Milling of Amenable Gold Ores. In: *The Extractive Metallurgy of Gold*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8425-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8425-0_4)
203. YIN, M., WAN, Y., LI, S., ZHAO, X., ZHANG, W., ZHANG, Y., & WANG, H. (2021). Carbon nitride-doped melamine-silver adsorbents with peroxidase-like catalysis and visible-light photocatalysis: Colorimetric detection and detoxification removal of total mercury. *Journal of Hazardous Materials*. Vol 408.

204. ZAIDI, S. (2012) Zeolites as Inorganic Ion Exchangers for Environmental Applications: An Overview. In: Inamuddin D., Luqman M. (eds) Ion Exchange Technology II. Springer, Dordrecht.
205. ZAPATA, G. (2020). Problemas medioambientales de la minería aurífera ilegal en Madre de Dios (Perú). Revista Científicas Completeness, Perú, p. 7-12
206. ZHANG, Z., ZHANG, W., MENDI, M. (2021) Membrane Technology Enhancement for Environmental Protection and Sustainable Industrial Growth. Advances in Science, Technology & Innovation.
207. ZHOU, C., SUN, L., ZHANG, A., MA, C., WANG, B., YU, J., ... & XIANG, J. (2015). Elemental mercury (Hg<sup>0</sup>) removal from containing SO<sub>2</sub>/NO flue gas by magnetically separable Fe<sub>2</sub>. 45TiO<sub>2</sub>. 55O<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation processes. Chemical Engineering Journal. Vol 273, p. 381-389.