UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TEMA

"Propuesta para la bio-remediación de cianuros en aguas residuales de la minería de oro mediante bacterias procedentes de la descomposición de la yuca"

AUTORES

Roberto Carlos Ankuash Tsukanka

Daniel Fernando Cajilema Ávila

DIRECTOR:

Dr. Luis Ramón Bravo Sánchez. PhD

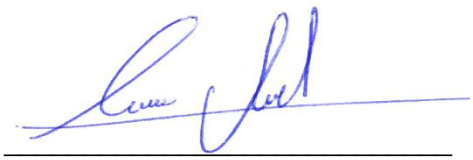
PASTAZA – ECUADOR

2020

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Quienes suscriben Roberto Carlos Ankuash Tsukanka con C.I. 1401230592 y Daniel Fernando Cajilema Ávila con C.I. 1401238520, hacen constar que son autores del Proyecto de Investigación titulado: **Propuesta para la Bio-remediación de cianuros en aguas residuales de la minería de oro mediante bacterias procedentes de la descomposición de la Yuca**, el cual constituye una elaboración personal realizada únicamente con la dirección del Tutor de dicho trabajo, Dr. Luis Ramón Bravo Sánchez. PhD. En tal sentido, manifiesto la originalidad de la conceptualización del trabajo como interpretación de datos y elaboración de conclusiones dejando establecido que aquellos aportes intelectuales de otros autores se han referenciado debidamente en el texto de dicho trabajo.

En el cantón Pastaza, a los 21 días del mes de septiembre del 2020.



Roberto Carlos Ankuash Tsukanka

CI: 1401230592



Daniel Fernando Cajilema Ávila

CI: 1401238520

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El tribunal de sustentación del proyecto de investigación y desarrollo aprueba el proyecto de Investigación titulado: **Propuesta para la Bio-remediación de cianuros en aguas residuales de la minería de oro mediante bacterias procedentes de la descomposición de la Yuca**.



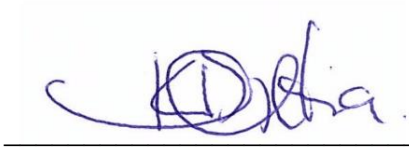
Dr. Ricardo Abril, PhD

Presidente del Tribunal



Dr. Marco Landívar, PhD

Miembro del Tribunal



MSc. Karel Diéguez Santana

Miembro del Tribunal

CERTIFICADO DE PORCENTAJE DE SIMILITUD OBTENIDO EN EL SISTEMA ANTI PLAGIO

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA
SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND

Oficio No. 248-SAU-UEA-2020

Puyo, 10 de septiembre de 2020

Por medio del presente **CERTIFICO** que:

El Proyecto de Investigación correspondiente a los egresados ANKUASH TSUKANKA ROBERTO CARLOS con C.I. 1401230592 y CAJILEMA ÁVILA DANIEL FERNANDO con C.I. 1401238520, con el Tema: **"Propuesta para la bio-remediación de cianuros en aguas residuales de la minería de oro mediante bacterias procedentes de la descomposición de la yuca"**, de la carrera, Ingeniería Ambiental. Director del proyecto Dr. Luis Ramón Bravo Sánchez PhD., ha sido revisado mediante el sistema antiplagio URKUND, reportando una similitud del 2%, Informe generado con fecha 10 de septiembre de 2020 por parte del director conforme archivo adjunto.

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes

Atentamente,

Ing. Italo Marcelo Lara Pilco M.Sc.
ADMINISTRADOR DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND – UEA - .

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios, por esa motivación y fortaleza espiritual que me brindo en este trabajo investigativo para así poder cumplir una de mis metas.

Por supuesto agradecer a mis padres, mis hermanos, mis abuelitos y mi familia en general por ese apoyo tan incondicional que me han brindado durante todo este trayecto universitario, ya que son el pilar fundamental de mi vida.

De igual manera agradecer al director de mi proyecto, Dr. Luis Ramon Bravo Sánchez PhD por su apoyo, orientación y ayuda en el desarrollo de este trabajo de investigación.

También mi agradecimiento a todos mis docentes por su entrega en cada una de sus cátedras y a todos mis amigos, con los que compartí gratos momentos de mi vida.

Por último, agradecer a mi querida Universidad Estatal Amazónica, que me formo como el gran ser humano y profesional para la sociedad.

Ankuash Tsukanka Roberto Carlos

Primero que nada, va mi agradecimiento y gratitud a Dios por haberme apoyado y acompañado en todos los momentos de mi vida y que estará presente en ella por el resto de mi existencia.

De igual manera agradecer a mis padres Cesar y María por su apoyo, paciencia y confianza absoluta durante toda mi carrera universitaria, han sido y serán una parte importante en mi vida.

También quisiera agradecer de manera especial a mi hermano Ramiro quien fue mi fuente de inspiración y motivación pues fue el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional, sentó en mis las bases de responsabilidad y deseos de superación, en el tengo el espejo en el cual me quiero reflejar pues sus virtudes y su gran corazón me llevan a admirarlo cada día más, mil gracias.

Asimismo, expresar mi profundo agradecimiento al director de mi proyecto Dr. Luis Ramon Bravo Sánchez PhD por su ayuda incondicional en el desarrollo de este trabajo de investigación.

Finalmente, agradecer a mi familia y amigos quienes de una u otra manera me apoyaron en este proceso que no fue nada fácil pero que con esfuerzo y dedicación lo pude lograr.

Daniel Fernando Cajilema Ávila

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación la dedico a Dios, a mis padres, Roberto y Margarita por ese apoyo tan incondicional que me brindaron en cada paso que he dado para llegar a cumplir mi meta, por inculcarme los valores al trabajo y honestidad.

A mis hermanos Edison, Flor, Eucler, Lenin, Melisa y Paola por ese cariño, esas palabras de aliento que me dieron muchas fuerzas de continuar con mi objetivo. A mis Tíos Marcelo y Eloísa por ese apoyo tan sincero que me supieron brindar. A mi prima Editha por ese apoyo moral tan fortalecedor y generoso.

Y por último a mi sobrino Samir por enseñarme a ser una mejor persona y se ser mi motivo de perseverancia para llegar a ser un profesional. Sin su apoyo nada de esto sería posible. Gracias por tanto Familia.

Ankuash Tsukanka Roberto Carlos

Lleno de satisfacción y esperanza, dedico este proyecto a Dios y a mis seres queridos, quienes han sido los pilares fundamentales para seguir adelante en mi carrera profesional.

A mis padres César Cajilema y María Ávila, porque ellos son la motivación de mi vida quienes me incentivaron constantemente en la construcción de mis sueños.

A mis hermanos Ramiro, Priscila, Digna, Carolina, porque son la razón de sentirme tan orgulloso de culminar mi meta, gracias por confiar siempre en mí.

Y sin dejar atrás a toda mi familia por confiar en mí, a mis abuelitos, tíos y primos, gracias por ser parte de mi vida y por permitirme ser parte de su orgullo.

Daniel Fernando Cajilema Ávila

RESUMEN

Se analizaron publicaciones recientes acerca de los métodos para la degradación del cianuro, haciendo énfasis en los procesos físico-químicos como la cloración alcalina, la aplicación de aire y dióxido de azufre, la ozonización y el tratamiento biológico, como la biorremediación, resultando este el más eficaz y amigable con el ambiente, por su bajo costo de implementación, utilizando cultivos puros de bacterias que existen en la yuca y que pueden degradar el cianuro y de esta manera se evita adicionar sustancias químicas al medio. Esta biorremediación brinda mayor eficiencia a la hora de eliminar el cianuro de las aguas residuales mineras y ofrece facilidades para controlar el proceso operativo, la capacidad para tratar todas las formas de cianuro y el hecho de ser una solución más simple y completa que las tecnologías mecánicas. Se valoró cualitativamente la efectividad de los microorganismos degradadores de cianuro existentes en la yuca, estas bacterias son: *Pseudomonas flourescens* y *Bacillus subtilis pichieohmeri* que reducen aproximadamente el 98.9 % del cianuro presente en ensayos de degradación a nivel de laboratorio, logrando llevar las concentraciones de cianuro por debajo de los límites máximos permisibles estipulados por la normativa nacional. Este estudio ha permitido, además, demostrar que la yuca, además de ser utilizada como fuente de alimento por sus raíces con almidones de alto valor alimentario, también puede brindar una solución a graves problemas ambientales provocadas por la minería aurífera en todo el país.

PALABRAS CLAVE: *Manihot esculenta*, biorremediación, aguas residuales mineras, cianuros

ABSTRACT

Recent publications on cyanide degradation methods were analyzed, emphasizing on physical-chemical processes such as alkaline chlorination, the application of air and sulfur dioxide, ozonation and biological treatment, such as bioremediation, resulting this the more efficient and environmentally friendly treatment, due to its low implementation cost, using pure cultures of bacteria that exist in cassava and that can degrade cyanide and thus avoid adding chemical substances to the environment. This bioremediation provides greater efficiency in removing cyanide from mining wastewater and offers facilities to control the operational process, the ability to treat all forms of cyanide, and the fact that it is a simpler and more complete solution than mechanical technologies. The effectiveness of the cyanide-degrading microorganisms existing in cassava was qualitatively assessed, these bacteria are: *Pseudomonas flourescens* and *Bacillus subtilis pichieohmeri*, which reduce approximately 98.9% of the cyanide present in degradation tests at the laboratory level, managing to bring the cyanide concentrations below the maximum permissible limits stipulated by national regulations. This study has also made it possible to demonstrate that cassava, in addition to being used as a food source due to its roots with high nutritional value starches, can also provide a solution to serious environmental problems caused by gold mining throughout the country.

KEY WORDS: *Manihot esculenta*, bioremediation, mining wastewater, cyanides

GLOSARIO

BIORREMEDIACIÓN: Proceso biotecnológico que utiliza microorganismos, hongos, plantas o las enzimas derivadas de ellos para recuperar un medio ambiente alterado por contaminantes a su condición natural.

CIANURO: Sustancia química, potencialmente letal, que actúa rápidamente y puede existir de varias formas

DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES: Procesos desarrollados para la eliminación de contaminantes orgánicos no biodegradables de aguas residuales industriales y urbanas.

ENZIMA: Moléculas de naturaleza proteica que catalizan reacciones químicas, siempre que sean termodinámicamente posibles.

MICROORGANISMOS: Organismo microscópico animal o vegetal.

MINERÍA: Actividad de explotar las minas para extraer minerales.

PH: Coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa.

YUCA: Tubérculo que se cultiva principalmente en América, África y Oceanía por sus raíces con almidones de alto valor alimentario.

GALVANOPLASTIA: Procedimiento para recubrir con metal objetos tales como hebillas, aros, tuercas, remaches y tornillos requiere tradicionalmente del uso de cianuro.

LIXIVIACIÓN: Proceso en el cual se extraen solutos de un sólido mediante la utilización de un disolvente líquido. Ambas fases entran en contacto y el soluto o los solutos pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida (SNMPE 2014).

AGUA RESIDUAL: Las aguas residuales son cualquier tipo de agua cuya calidad se vio afectada negativamente por influencia antropogénica.

EFICIENCIA: Es virtud o facultad para lograr un efecto.

METABOLISMO: Es un conjunto de reacciones químicas que tienen lugar en las células del cuerpo.

DESCOMPOSICIÓN: Se refiere a la reducción del cuerpo de un organismo vivo a formas más simples de materia

PSEUDOMONAS: Género de los bacilos rectos y ligeramente curvados, Gram negativos, oxisada positivas, aerobios, estrictos, aunque algunas veces pueden utilizar el nitrato como aceptor de electrones.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I. 1
1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 2
1.2. OBJETIVOS 2
1.2.1. Objetivo General 2
1.2.2. Objetivos Específicos 2
1.3. JUSTIFICACIÓN 3
CAPÍTULO II. 4
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 4
2.1. La minería 4
2.2. Yuca 4
2.3. El cianuro 5
2.3.1. Impacto a la salud humana. 5
2.3.2. Impacto al ambiente. 5
2.4. Fuentes de producción de cianuro 6
2.4.1. Fuentes naturales 6
2.4.2. Fuentes antropogénicas 8
2.5. Biorremediación 9
CAPÍTULO III. 11
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 11
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN 11
3.2. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN 11
3.2.1. Análisis de los antecedentes bibliográficos de los métodos utilizados para la biorremediación del cianuro. 11
3.2.2. Comparación de los métodos de biorremediación de cianuro. 14
3.2.3. Valoración cualitativamente de manera teórica la efectividad de los microorganismos degradadores de cianuro existentes en la yuca. 15
CAPITULO IV 18
4. ANALISIS DE RESULTADOS 18
4.1. Resultado del análisis de los tratamientos físicos, químicos y biológicos de eliminación de cianuro. 18

4.2. Comparación entre los métodos físicos químicos y biológicos 20
4.3. Resultados de la eficiencia del Proceso de Biorremediación con bacterias de la Yuca. 23
CAPÍTULO V. 25
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 25
5.1. CONCLUSIONES 25
5.2. RECOMENDACIONES 26
CAPÍTULO VI. 27
6. REFERENCIAS 27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concentración de cianuro en la Yuca (*Manihot esculenta*) ……5
Tabla 2. Fuentes naturales de producción de Cianuro……6
Tabla 3. Fuentes artificiales de producción de Cianuro……..8
Tabla 4. Parámetros óptimos para el desarrollo de los microorganismos…….13
Tabla 5. Reacciones que tienen lugar durante los Procesos de biodegradación de cianuro……..18
Tabla 6. Tratamientos físicos-químicos de eliminación de cianuro……..21
Tabla 7. Análisis del tratamiento biológico a desarrollar……..24

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Reacciones que se dan en la cloración alcalina. 12
Ecuación 2. Ecuación del método INCO. 12
Ecuación 3. Ecuación del método Ozonización. 12

CAPÍTULO I.

1. INTRODUCCIÓN

La minería a cielo abierto es una actividad industrial de alto impacto ambiental, en la medida en que requiere la remoción de grandes cantidades de suelo. Presenta como condición que el yacimiento tenga grandes extensiones y esté cercano a la superficie. Es un método de extracción con un alto grado de mecanización de las actividades. Para realizar el proceso de explotación de oro o de cualquier otro mineral se inicia con la deforestación de grandes hectáreas de terreno donde se planea el funcionamiento la mina, destruyendo la capa vegetal de los suelos, quedando alterada irreversiblemente, dejando atrás un paisaje inerte (Cardona, 2015).

Esta etapa no solo implica la eliminación del suelo en el área de explotación, sino también un desecamiento del suelo en la zona circundante, así como una disminución del rendimiento agrícola, agropecuario y un aumento en la escorrentía superficial. Asimismo, los acuíferos y los cursos de agua próximos pueden resultar afectados, poniendo en peligro la flora y desplazando la fauna del lugar (Cardona, 2015).

La eliminación de la vegetación en el área de las operaciones mineras tiene como efecto la destrucción parcial o modificación de la flora en las áreas. La consecuencia inmediata es la afectación directa del hábitat natural de diversas especies. La inevitable producción de contaminantes de las operaciones mineras aumenta considerablemente el riesgo de accidentes y de envenenamiento de plantas y animales. La minería aurífera de oro es una de las principales fuentes de contaminación por cianuro (Cardona, 2015).

Los desechos de estas extracciones son descargados directamente en el suelo y fuentes hídricas donde se verifican los puntos más altos de cianuro. Se han reportado accidentes por contaminación con este compuesto en ecosistemas y poblaciones, alcanzando 2000 km del sitio de origen (Cardona, 2015). La cianuración del oro (también conocida como el proceso de cianuro o el proceso de MacArthur-Forrest) es una técnica metalúrgica para la extracción de oro de mineral baja calidad, que busca convertir el oro (insoluble en agua) en aniones metálicos complejos de aurocianida, solubles en agua, mediante un proceso denominado lixiviación. Es el proceso más comúnmente utilizado para la extracción de oro. Debido a la naturaleza venenosa del cianuro, el proceso es muy controvertido y su uso está prohibido en varios países y territorios (Castillo, 2018).

Con esta problemática ambiental y ecosistémica se hace pertinente encontrar alternativas que ayuden a mitigar y revertir los efectos negativos por la contaminación con cianuro, mediante la recuperación de suelos y aguas con el uso de biotecnologías (procesos naturales para la remoción de contaminantes) como es el caso de la biorremediación y la fitorremediación. Estas alternativas son tecnologías ambientalmente necesarias, que se sirven de microorganismos capaces de degradar este químico además metales pesados y plantas que asimilan el compuesto (Hurtado, 2012).

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Cómo lograr disminuir la contaminación por cianuro en aguas residuales mineras en las condiciones climáticas de la región Amazónica utilizando técnicas de biorremediación que incorporen microorganismos procedentes de la descomposición de la yuca?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Evaluar una técnica de biorremediación utilizando microorganismos procedentes de la descomposición de la yuca para degradar concentraciones elevadas de cianuro en el agua residual de la industria minera del oro.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Analizar los antecedentes bibliográficos acerca de los métodos que se utilizan para la biorremediación del cianuro.
- Comparar los distintos métodos de biorremediación de cianuro optando por aquellos que generen menores impactos negativos al ambiente.
- Valorar cualitativamente, desde un punto de vista teórico, la efectividad de los microrganismos degradadores de cianuro existentes en la yuca, como posible alternativa en procesos de biorremediación de aguas residuales procedentes de la minería.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Los seres vivos expuestos a dosis letales de cianuro mueren rápidamente, mientras que en dosis no-letales, metabolizan el cianuro y lo expulsan a través de sus heces, lo cual lleva a pensar que los animales no acumulan el cianuro en su cuerpo (al contrario de los metales pesados) (Gordillo, 2018).

Debido a los grados de contaminación por cianuro en las aguas residuales, se hace necesario el tratamiento de los efluentes, sin embargo, estos tratamientos son principalmente con procedimientos químicos, lo que puede generar grandes costos, además de efectos negativos adversos al ambiente (Abad, 2019).

Por lo dicho anteriormente, se buscan alternativas que sean amigables con el ambiente, aquellas que puedan mitigar o eliminar este impacto negativo eficazmente, todo mediante revisiones bibliográficas sobre métodos biorremediadores que puedan servir para el tratamiento de las aguas residuales contaminadas con cianuro de las actividades mineras, recopilando así información documentada y experiencias vividas en el Ecuador. En este caso se pretende mitigar el exceso de cianuro con la aplicación de bacterias que existen en la descomposición de la yuca (Restrepo, Montoya, & Muñoz, 2006).

En Ecuador el cianuro es altamente regulado en las descargas al ambiente, según la Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes: Recurso Agua LIBRO VI ANEXO 1, por lo cual se establecen estándares ambientales en materia de vertimientos, en donde se resuelve que todo vertimiento de residuos líquidos de la red de alcantarillado público y/o a un cuerpo de agua deberá cumplir con los estándares establecidos. El parámetro de cianuro en agua fría dulce, expresado en mg/l, tiene un valor máximo de 0.1 $mg.L^{-1}$ (TULSMA, 2015).

La degradación biológica del cianuro se aprovecha de la capacidad de seis grupos de bacterias utilizadas en las plantas de procesamiento de yuca, capaces de eliminar el contaminante que se encuentran en ríos afectados por la minería. Son microorganismos que de manera natural degradan el cianuro, es decir que estos microorganismos tienen distinta capacidad de procesar y eliminar el contaminante, e incluso logran reducir a cero la presencia en el agua en un plazo de diez días. Por ende, la implementación de esta biotecnología otorgará una alternativa eficaz para el grave problema que representa la contaminación del agua con este ion letal (Giraldo, 2015).

CAPÍTULO II.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. La minería

La minería es la actividad económica que se dedica a la exploración y explotación del potencial minero, lo que permite el aprovechamiento y la obtención de recursos para el beneficio de la nación, de las y los ciudadanos. Es de gran importancia debido a la generación de divisas y recursos para la inversión pública (Cartagena, 2019).

La actividad minera en el Ecuador tuvo lugar antes de la constitución de la República. En la colonia se aprovecharon los sitios mineros que habían sido utilizados por los pueblos originarios. A partir del siglo XX la actividad minera comercial se concentró en el sur occidente del país, en la provincia de El Oro (Portovelo) a cargo de una empresa extranjera, primero, y de capital nacional desde mediados del siglo pasado (Moncada, Otero, & Gonzalez, 2012).

2.2. Yuca

La yuca con su nombre científico (*Manihot esculenta*), es un arbusto perenne de la familia de las euforbiáceas extensamente cultivado en América, África y Oceanía por sus raíces con almidones de alto valor alimentario. La raíz de la mandioca es cilíndrica y oblonga, y alcanza el metro de largo y los 10 cm de diámetro. La cáscara es dura, leñosa e incomestible. La pulpa es firme incluso dura, antes de la cocción, surcada por fibras longitudinales más rígidas; muy rica en hidratos de carbono y azúcares, se oxida rápidamente una vez desprovista de la corteza (Gonzalez, 2011).

La planta de yuca posee en sus diferentes partes dos glucósidos cianogénicos denominados linamarina y lotaustralina, aproximadamente el 85-90% del cianuro total de los tejidos en la yuca se encuentra como cianuro ligado o linamarina y solo el 10-15% como cianuro libre o lotaustralina como se detalla en la Tabla 1 (Gonzalez, 2011).

Tabla 1. *Concentración de cianuro en la Yuca (Manihot esculenta)*

Descripción	Concentración (en mg/kg-1)
Yucas de variedades dulces	377
Hojas de la Yuca	500
Raíces	138
Raíces desechadas	46<100

Tomado de "Análisis comparativo in vitro de la actividad biodegradadora de bacterias del género *Pseudomonas sp* y microorganismos nativos, para su uso en un proceso de biorremediación in situ de sales de cianuro" de L. V. Marín, 2010.

2.3. El cianuro

El cianuro es un importante producto químico industrial que se produce a gran escala, el cual es usado en procesos mineros (extracción del oro), galvanoplastia, producción de plásticos, bronceado, síntesis química y otras industrias. Tales industrias descargan grandes cantidades de residuos ricos en cianuro, siendo un efluente altamente tóxico y peligroso (Hurtado & Berastain, 2012).

2.3.1. Impacto a la salud humana.

Existe una justificable preocupación por el uso de cianuro en ambientes industriales ya que el cianuro es considerado una sustancia tóxica que puede ser letal si se la ingiere o se la inhala. Al igual que miles de otras sustancias químicas que se utilizan en los procesos industriales modernos, el conocimiento, los procedimientos adecuados de manipulación y una actitud responsable son fundamentales para el uso seguro y beneficioso del cianuro. El cianuro es un veneno de acción rápida capaz de matar a una persona en cuestión de minutos si está expuesta a una dosis suficientemente elevada (Carpio, 2014).

2.3.2. Impacto al ambiente.

Para las plantas y los animales, el cianuro es extremadamente tóxico. Derrames de cianuro pueden matar la vegetación e impactar la fotosíntesis y las capacidades reproductivas de las plantas. En cuanto a los animales, el cianuro puede ser absorbido a través de la piel, ingerido o aspirado. Concentraciones en el aire de 200 partes por millón (ppm) de cianuro de hidrógeno son letales para los animales, mientras que concentraciones bajas como 0.1 miligramos por litro son letales para

especies acuáticas sensibles. Concentraciones subletales también afectan los sistemas reproductivos, tanto de los animales como de las plantas (Cartagena, 2019).

2.4. Fuentes de producción de cianuro

Como se ha comentado anteriormente, el cianuro está formado por carbono y nitrógeno, elementos que se encuentran ampliamente distribuidos en las moléculas orgánicas, que constituyen la base de todas las formas de vida. Las fuentes de producción de cianuro pueden ser tanto naturales como antropogénicas (Tabla 2). En el medio natural, el cianuro es generado, excretado o degradado por un gran número de organismos, incluyendo bacterias, algas, hongos, plantas e incluso animales. Sin embargo, no solo existen fuentes naturales de producción de cianuro, sino que también puede ser producido por la acción del hombre como consecuencia de diversas actividades industriales (Ibáñez, 2018).

Tabla 2. *Fuentes naturales de producción de Cianuro*

FUENTES NATURALES	
Bacterias	*Pseudomonas aeruginosa*
	Pseudomonas chloraphis
	Pseudomonas fluorecens
Algas	*Chlorella vulgaris*
	Nostcoc muscorum
	Plectonema boryanum
	Anacystis nidulans
Hongos	*Marasmius oreades*
	Stemphyllium loti
	Gioeocercospora sorghii
Plantas	Helechos, sargo, lino, yuca, algodón y árboles frutales (almendros o manzanos)
Animales	Insectos, miriápodos y otros artrópodos

Tomado de "Biorremediación de residuos industriales cianurados de la joyería por la bacteria alcalófila *Pseudomonas pseudoalcaligenes* CECT5344" de M. I. Ibáñez, 2018.

2.4.1. Fuentes naturales

La síntesis biológica de cianuro, proceso denominado cianogénesis, es un fenómeno bastante extendido entre los seres vivos, fundamentalmente en plantas, donde se descubrió por primera vez este proceso en 1803. Debido a la alta toxicidad del cianuro, generalmente su producción natural

suele estar asociada a una función defensiva y ofensiva. La producción de cianuro por parte de estos organismos puede llevarse a cabo por diferentes rutas, aunque se podrían clasificar en dos grupos principales: síntesis directa de cianuro, realizada por bacterias, hongos y algas, y producción de intermediarios cianurados estables y posterior degradación de estos para producir cianuro libre, llevada a cabo por plantas y artrópodos (Ibáñez, 2018).

Entre las bacterias cianogénicas destacan las pertenecientes a los géneros *Pseudomonas* y *Chromobacterium*, en las que el HCN es producido principalmente durante la transición de la fase de crecimiento exponencial a la fase estacionaria. La enzima HCN sintasa es la responsable de la síntesis de cianuro a partir de glicina, generando CO_2 y HCN sin la producción de intermediarios cianurados (Ibáñez, 2018).

Este proceso puede estar influenciado por algunos factores, como la concentración de oxígeno, hierro y fosfato en el medio. *Chromobacterium violaceum* es una bacteria cianogénica en la que se ha estudiado en detalle la producción biológica de cianuro. Son relativamente pocas las algas que producen cianuro, al contrario de lo que ocurre con los hongos, con aproximadamente 300 especies cianogénicas pertenecientes a 52 géneros. En estos organismos el cianuro es producido cuando se forman los cuerpos fructíferos, o bien en condiciones de daño o estrés, como un mecanismo para proporcionar nitrógeno y fuente de carbono (Ibáñez, 2018).

La cianogénesis está ampliamente representada entre las plantas, existiendo más de 2000 especies cianogénicas, incluyendo angioespermas, gimnospermas y helechos. Muchas de estas plantas forman parte de cultivos de interés agronómico, como la alfalfa, el sorgo, el lino, el bambú, la patata, la yuca, el algodón, la judía y algunos árboles frutales, siendo bien conocida la presencia de cianuro en las almendras (Cartagena, 2019).

Muchos de estos cultivos producen cianuro en forma de glucósidos cianogénicos, conocidos como glucósidos de 2-hidroxinitrilos (cianhidrinas) derivados de aminoácidos ramificados (valina, leucina e isoleucina), y aromáticos (fenilalanina y tirosina). Estos glucósidos cianogénicos se almacenan en las vacuolas celulares y son liberados cuando se produce una rotura celular como consecuencia del consumo de la planta por determinados animales. Actualmente se conocen más de 60 glucósidos cianogénicos (Cartagena, 2019).

La otra vía principal de producción de cianuro en plantas es durante la síntesis de etileno, una hormona vegetal de gran importancia, por el denominado ciclo de la metionina o ciclo de Yang (Buchanan et al., 2015). La producción biológica de cianuro dentro del reino animal se encuentra restringida a algunos grupos de artrópodos, tales como miriápodos e insectos coleópteros, heterópteros y lepidópteros (Cartagena, 2019).

2.4.2. Fuentes antropogénicas

A pesar del gran número de organismos cianogénicos presentes en la naturaleza, el cianuro producido de forma natural no constituye ningún problema medioambiental. Por el contrario, el cianuro se produce a altas concentraciones por fuentes antropogénicas como la galvanoplastia, la joyería y la actividad minera y otras industrias, ver Tabla 3.

Tabla 3. *Fuentes artificiales de producción de Cianuro*

FUENTES ARTIFICIALES
Limpieza de metales
Siderurgia (enducercimiento del acero)
Baños electrolíticos (industria joyera)
Recuperación de metales preciosos (minería)
Industria farmacéutica
Industria de Fabricación de pinturas
Humos de combustión de plásticos (poliuretano)

Tomado de "Biorremediación de residuos industriales cianurados de la joyería por la bacteria alcalófila *Pseudomonas pseudoalcaligenes* CECT5344" de M. I. Ibáñez, 2018.

El cianuro es utilizado, gracias a su alta reactividad, para la síntesis industrial de numerosos compuestos químicos, como pinturas, nylon, etc. Otras aplicaciones del cianuro son el endurecimiento del acero, la producción de goma sintética o aplicaciones fotográficas. También se utiliza como control frente a plagas de insectos cuando estos han presentado resistencia a otros pesticidas. El cianuro también es utilizado en la síntesis de medicamentos, como el nitroprusiato sódico utilizado frente a la hipertensión arterial (Ibáñez, 2018).

Las principales industrias que liberan residuos con altas concentraciones de cianuro son las actividades mineras y metalúrgicas, así como la industria joyera cuyos procesos se centran en galvanoplastia y electro-pulido. En la minería, el cianuro es utilizado en la extracción del oro a partir de las menas mediante un proceso denominado cianuración, también conocido como proceso de MacArthur-Forrest. La industria minera libera al medioambiente varios miles de millones de litros de aguas residuales tóxicas que, además de cianuro, pueden contener arsénico, plomo, mercurio, cadmio, cromo y ácido sulfúrico (Ibáñez, 2018).

Los derrames de aguas residuales cianuradas que causan desastres ambientales se han vinculado a actividades mineras, pero el cianuro también es utilizado en grandes cantidades por la industria de la joyería para la recuperación selectiva de metales preciosos, plata y oro. Los residuos que se generan durante el proceso de galvanoplastia de la joyería también constituyen un importante problema medioambiental (Ibáñez, 2018).

Los volúmenes de aguas residuales cianuradas producidas por la industria de la joyería generalmente contienen altas concentraciones de metales, como cobre, hierro, níquel y zinc. A través de los procesos de electro pulido y galvanoplastia, mediante una diferencia de potencial, las piezas metálicas son recubiertas por metales como la plata, el oro o el cromo, proporcionándole resistencia al rayado o la corrosión, así como proporcionando un aumento de su valor. Estos procesos generan altas concentraciones de cianuro y metales, convirtiéndose en residuos líquidos tóxicos que deben ser tratados para minimizar su peligrosidad sobre el medioambiente y la población humana (Ibáñez, 2018).

2.5. Biorremediación

La biorremediación es una tecnología que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos y plantas para limpiar terrenos o aguas contaminadas, también puede definirse como el uso de organismos vivos, componentes celulares o enzimas libres con el fin de realizar una mineralización, transformación parcial o humificación de residuos o agentes contaminantes. Así mismo la Academia Americana de Microbiología define la biorremediación como “la utilización de organismos vivos para reducir o eliminar riesgos medioambientales resultantes de la acumulación de compuestos químicos tóxicos y otros residuos peligrosos” (Gonzalez, 2011).

Según estudios realizados, algunos de ellos consultados en esta revisión bibliográfica, se ha demostrado que los tratamientos por biorremediación, a través del empleo de la actividad biológica

natural de los organismos vivos como las plantas, los hongos y las bacterias pueden aplicarse en suelos, sedimentos, lodos, aguas superficiales y subterráneas, logrando efectividad en la remoción de diferentes tipos de contaminantes (Gonzalez, 2011).

La biorremediación de aguas se efectúa en algunos casos mediante el bombeo tratamiento-recarga que consiste en extraer el agua, promover la biodegradación de los contaminantes en reactores y posteriormente devolverla al acuífero, o bien, inyectar nutrientes y bacterias. Una vez que se han eliminado las sustancias químicas dañinas, las bacterias ya no tienen sustrato disponible y mueren (Rodallega, 2015).

Investigadores colombianos han identificado hasta seis grupos de bacterias en las plantas de procesamiento de yuca, un tubérculo que crece en tierra tropical, capaces de eliminar el cianuro de los ríos contaminados por la minería aurífera. Esta alternativa es eficaz y más accesible que otros procedimientos químicos de limpieza de aguas residuales, pues los microorganismos que degradan el cianuro aparecen durante la fermentación del almidón de la yuca que sirve de materia prima para la panadería (Cardona, 2015).

CAPÍTULO III.

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente proyecto será una investigación de tipo documental, basada en la revisión bibliográfica.

3.2. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Los métodos de investigación se basaron en la revisión de literatura científica especializada, a través de la consulta artículos científicos de bases de datos de prestigio internacional, libros y videos. No se realizó ninguna fase de campo ni de laboratorio.

3.2.1. Análisis de los antecedentes bibliográficos de los métodos utilizados para la biorremediación del cianuro.

Para buscar la información se empleó un método de investigación que se basa en la revisión de diversas fuentes de información que van desde artículos científicos de revistas indexadas en bases de datos de prestigio internacional hasta libros de texto y vídeos que abordan temas relacionados a la biorremediación de aguas contaminadas por cianuro.

Analizando los antecedentes bibliográficos acerca de los métodos que se utilizan para la biorremediación del cianuro, se han recalcado algunos métodos que dan gran importancia a los procesos de biorremediación; en este caso, para las aguas residuales procedentes de la minería de oro artesanal, y a continuación se detallan algunos de ellos.

Tratamientos físico-químicos de eliminación de cianuro

- **Cloración alcalina:** La cloración alcalina es el proceso de destrucción de cianuro más antiguo y el más conocido. La oxidación del cianuro se lleva a cabo en dos etapas. En primer lugar, mediante la adición de cloro o hipoclorito se produce cloruro de cianógeno, el cual es posteriormente transformado en cianato, compuesto menos tóxico. Finalmente, el cianato se oxida hasta amonio y CO_2. Este es uno de los procesos más utilizados para la eliminación de los cianuros presentes en las aguas residuales debido a su fácil manejabilidad (Ibáñez, 2018). Las reacciones que se dan en la cloración alcalina son las siguientes:

$$Cl_2 + CN \rightarrow CNCl + Cl^-$$

$$CNCl + H_2O \rightarrow CNO + Cl^- + 2H^+$$

$$CNO^- + 2H_2O \rightarrow CO_2 + NH_{4^+} + OH^-$$

Ecuación 1. Reacciones que se dan en la cloración alcalina.

Tomado de "Biorremediación de residuos industriales cianurados de la joyería por la bacteria alcalófila *Pseudomonas pseudoalcaligenes* CECT5344, 2018.

➢ **Aire/Dióxido de azufre:** Este tratamiento, también conocido como método INCO, fue desarrollado en los años 80. El cianuro es oxidado a cianato mediante dióxido de azufre y aire, actuando el cobre soluble como catalizador, en un proceso que requiere control de pH (Ibáñez, 2018).

$$CN + SO_2 + O_2 + H_2O \rightarrow CNO^- + SO_{4^{2-}} + 2H^+$$

Ecuación 2. Ecuación del método INCO.

Tomado de "Biorremediación de residuos industriales cianurados de la joyería por la bacteria alcalófila *Pseudomonas pseudoalcaligenes* CECT5344, 2018.

➢ **Ozonización**: La ozonización es ampliamente utilizada en el tratamiento de aguas residuales cianuradas, convirtiéndose en una novedosa alternativa a la utilización de cloro o peróxido de hidrógeno. Se caracteriza por conseguir la descomposición completa y rápida de distintas formas de cianuro, incluyendo el cianato y el tiocianato. En la primera reacción, conocida como "ozonización simple" se libera O_2, continuando así la oxidación del cianuro mediante una segunda reacción mostrada es conocida como "ozonización catalítica". Esta tecnología presenta el inconveniente de su elevado coste por los equipos y los reactivos requeridos (Ibáñez, 2018).

$$CN^- + O_3 \rightarrow CNO^- + O_2$$

$$C2CN^- + O_2 \rightarrow 2CNO^-$$

$$\text{Gobal; } 3CN^- + O_3 \rightarrow 3CNO^-$$

Ecuación 3. Ecuación del método Ozonización.

Tomado de "Biorremediación de residuos industriales cianurados de la joyería por la bacteria alcalófila *Pseudomonas pseudoalcaligenes* CECT5344, 2018.

➢ **Carbón activado**: Es un método muy efectivo y ampliamente utilizado en los últimos años. Debido a que el carbón activado tiene alta porosidad y gran área superficial por lo que su capacidad de adsorción es muy elevada. Este método se ha aplicado eficientemente con sistemas de lecho empaquetado, y se ha demostrado que es aplicable con concentraciones de cianuro bajas (Gordillo, 2018).

Degradación de cianuro por microorganismos

Primeramente, se detallan los parámetros óptimos para que los microorganismos puedan desarrollarse, especificamos en la Tabla 4.

Tabla 4. *Parámetros óptimos para el desarrollo de los microorganismos*

Parámetros	Condiciones adecuadas para actividad microbiana
Humedad	25-28% de capacidad de retención de agua
pH del suelo	5.5 – 8.8
Contenido de Oxigeno	<10% de aire en los espacios de poros
Temperatura (°C)	15-45
Nutrientes	Fosforo y Nitrógeno
Tipo de suelo	Bajo contenido de arcilla y sedimentos
Metales pesados	Total, de 2000 $mg.L^{-1}$

Obtenido de "Biodegradación de cianuro en aguas y suelos contaminados por la minería de oro," de M.C. Gordillo, 2018, p. 54.

El bajo costo y su compatibilidad con el ambiente hacen de estos métodos biológicos sean muy útiles y más sostenibles que los métodos físicos y químicos. Por ende, uno de los métodos que se implementó es la biodegradación.

Los procesos anteriormente mencionados presentan una característica en común, no logran una completa degradación, razón por la cual se "desarrollan tratamientos biológicos para dicha tarea, los cuales gracias a las propiedades de degradación que presentan muchos microorganismos, como la oxidación de compuestos de cianuro y tiocianato por *Pseudomonas paucimobilis*, metabolismo de cianuros por cepas de *Pseudomonas*, *Acinetobacter, Bacillus* y *Alcaligenes* incluyendo las enzimas oxigenasa y bacterias degradadoras de cianuro principalmente cianuro oxigenasa, nitrilasa e hidratasa (Gordillo, 2018).

➢ **La degradación biológica o biorremediación**, "puede definirse como el uso de organismos vivos, componentes celulares o enzimas libres con el fin de realizar una mineralización, transformación parcial o humificación de residuos o agentes contaminantes". También se considera un tratamiento secundario ya que está ligado a dos procesos microbiológicos, los cuales pueden ser aerobios y anaerobios. Del mismo modo comprende reacciones complejas de digestión y fermentación efectuadas por la especie utilizada y se califica su eficiencia expresando la disminución de la DBO en porcentaje. Estos procesos de biorremediación se han venido desarrollando desde 1987, todo como resultado de la preocupación por la contaminación, que estaba presentando desde aquella época este proceso de minería (Gordillo, 2018). Por ende, se detalló y se utilizó un método denominado:

3.2.2. Comparación de los métodos de biorremediación de cianuro.

Para comparar los métodos de biorremediación se utilizaron ciertos pasos claves como la recolección básica de bibliografía, elaboración de tablas comparativas con el objeto de conocer los antecedentes y exponer las ideas resaltantes.

Para ello se consultó diversos métodos físicos, químicos y biológicos de eliminación de cianuro, haciendo énfasis en los métodos biológicos que utilizan microorganismos capaces de asimilar el cianuro como fuente de nitrógeno (Gordillo, 2018).

En el caso del cianuro generado industrialmente, este suele ser eliminado generalmente mediante métodos físico-químicos que reducen la concentración de cianuro y lo convierten en productos menos tóxicos. Se pueden considerar tratamientos enfocados a la recuperación del cianuro y metales o a su transformación. Para seleccionar el tratamiento adecuado para la eliminación del cianuro se tuvo que tener en cuenta varios factores, como el tipo de compuesto cianurado, el volumen a tratar o el entorno donde se aplicará el tratamiento (Gordillo, 2018).

Los procesos anteriormente mencionados presentan una característica en común, no logran una completa degradación, razón por la cual se desarrolla este nuevo método de biorremediación con la utilización de bacterias presentes en la descomposición de la Yuca, los cuales gracias a las propiedades de degradación que presentan estos microorganismos, como la oxidación de compuestos de cianuro y tiocianato por Pseudomonas, metabolismo de cianuros por cepas de Pseudomonas, Acinetobacter, Bacillus y Alcaligenes incluyendo las enzimas oxigenasa y bacterias

degradadoras de cianuro con el fin de realizar una mineralización, transformación parcial o humificción de residuos o agentes contaminantes (Gordillo, 2018).

3.2.3. Valoración teórica cualitativa de la efectividad de los microorganismos degradadores de cianuro existentes en la yuca mediante la revisión de estudios y artículos similares al tema de investigación.

Para el desarrollo de este estudio se recomienda utilizar una metodología sumamente interesante y muy amigable con el ambiente que es la biorremediación, utilizando solamente bacterias aisladas de las existentes en la yuca, que tienen la capacidad de degradar el cianuro que se encuentran en las aguas residuales mineras. De acuerdo con la publicación de varios artículos estas bacterias tienen una eficiencia de degradación de un 95 %, ya que incorporan el cianuro en su metabolismo y tienen la capacidad de adaptarse a cualquier medio (Marín, Ochoa, & Prado, 2010).

Debido a que no se pudo realizar la fase de campo y la de laboratorio no se puede detallar exactamente su efectividad ante la problemática planteada, pero gracias a la revisión bibliográfica se toma en cuenta la similitud de un proyecto realizado en Colombia, titulado "Análisis comparativo in vitro de la actividad biodegradadora de bacterias del género *Pseudomonas sp,* y microorganismos nativos, para su uso en un proceso de biorremediación in situ de sales de cianuro". A continuación, se detallará el protocolo que ellos siguieron para su investigación (Marín, Ochoa, & Prado, 2010).

- **Toma de muestras**

Los autores procedieron a tomar las muestras de agua, con la finalidad de conocer la concentración de cianuro proveniente de la actividad minera para así, mediante la experimentación, eliminar el cianuro del agua residual minera con algunas bacterias aisladas de las existentes en la yuca en estado de descomposición (Marín, Ochoa, & Prado, 2010).

Las muestras se extrajeron del último tanque en el procedimiento de extracción aurífera, donde se esperaba que la concentración de cianuro fuera superior. Se presenta una mezcla uniforme de arenas, agua y cianuro de sodio NaCN, que se encuentra bajo cubierta en continua agitación a 80 revoluciones por minuto (Marín, Ochoa, & Prado, 2010).

Los investigadores tomaron muestras simples en envases de vidrio color ámbar previamente esterilizados en diferente horario mañana, tarde y noche. Cada una de ellas fue etiquetada y mantenida en un "cooler" a bajas temperaturas. No fue necesario adicionar hidróxido de sodio a 0.1 N pues el pH era muy alcalino; la alcalinidad es imprescindible para evitar pérdidas de cianuro como HCN (Marín, Ochoa, & Prado, 2010).

Las muestras se enviaron al laboratorio para su análisis respectivo y se determinó así que la concentración media de cianuro fue de 1920 $mg.L^{-1}$, en la muestra del agua residual (Marín, Ochoa, & Prado, 2010).

- **Cuantificación de comunidades de bacterias**

Posteriormente, los autores cuantificaron las comunidades de bacterias totales de cada muestra de macerado de yuca objeto de estudio. Para ello dispusieron de medios de cultivos generales para bacterias (Agar Nutritivo-NA). Para la elaboración de los medios de cultivo se siguieron las instrucciones del manual del fabricante (28 $g.L^{-1}$ para NA). El pH para el medio de cultivo fue de 5.7. Ambos medios se esterilizaron a 121 °C y 200 atm. de presión, durante 15 min. Para la cuantificación de las comunidades microbianas se utilizó el método del Numero Más Probable (NMP), que consistió en realizar diluciones cuantitativas y siembra en cajas Petri de 1 g de macerado de yuca de las muestras en agua peptonada estéril desde 10-1 hasta 10-6. (Cartagena, 2019). Al primer tubo de ensayo se le adicionó 1 g de macerado de yuca siendo esta la muestra inicial para la realización de las diluciones cuantitativas.

- **Cuantificación de cianuro**

Para medir la concentración del ion cianuro en el medio y poder estimar si las posibles bacterias son capaces de degradar la especie química, se empleó un electrodo selectivo al ion cianuro, cuya membrana de ion selectivo permite que únicamente los iones cianuro lo penetren. Además, es un electrodo indicador que necesita trabajar siempre junto a uno de referencia. Las ventajas que presenta este tipo de medición es que se realizan de forma simple, rápida y precisa (Rodallega, 2015).

Prueba de actividad de los microorganismos aislados para degradar el cianuro

En cuanto a la descomposición de la yuca, los investigadores procedieron a dejar reposar por varios días los macerados para que las bacterias se reprodujeran y así obtener cultivos en el laboratorio para luego aislar las bacterias en una caja Petri y proceder con el protocolo de cultivo y aplicación de las bacterias en las muestras de agua residual con vistas a completar el proceso de biorremediación.

Una vez obtenido el cultivo de las bacterias de la yuca se colectó una muestra de agua de río contaminada con cianuro y se la llevó a laboratorio. El electrodo selectivo permitió determinar la concentración de cianuro en función del tiempo. Se observó que al cabo de 10 días el cianuro que había en ese medio líquido (muestra de agua de río) se redujo a cero, de lo que se deduce que definitivamente las bacterias incorporan el cianuro en su metabolismo. Esto concuerda con lo informado en varios artículos acerca de que el porcentaje de remoción del cianuro, bajo estas condiciones de tratamiento es alrededor del 95 % (Carpio, 2014).

CAPÍTULO IV.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos en el análisis de los distintos métodos de degradación del cianuro, haciendo énfasis en los procesos de remediación biológica. Este análisis se realizó mediante una búsqueda bibliográfica que se basó en la revisión de diversas fuentes de información que incluyeron desde artículos científicos hasta libros de texto y vídeos que abordan temas relacionados a la biorremediación de aguas contaminadas por cianuro.

4.1. Resultados del análisis de los tratamientos físicos, químicos y biológicos para la eliminación de cianuro de las aguas residuales.

Tratamientos Físico-Químicos

Estos tratamientos se basan principalmente en la eliminación rápida del contaminante en aguas residuales con bajas concentraciones de cianuro, además poseen una baja eficiencia en la remoción de dicho contaminante en comparación al método biológico.

Las posibles limitaciones de estos procesos son la necesidad de obtener una licencia para utilizar el proceso, el costo de construccion de una planta, la necesidad de realizar ensayos empiricos para optimizar el sistema y la incapacidad del proceso para oxidar subproductos intermedios del cianuro.

Los principales tratamientos se describen a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. *Fundamentos de los tratamientos físico-químicos para la eliminación de cianuros en aguas residuales y porcentajes de remoción alcanzados.*

Cloración alcalina		**Aire/Dióxido de azufre**		**Ozonización**		**Carbón activado**	
Fundamento	**%**	**Fundamento**	**%**	**Fundamento**	**%**	**Fundamento**	**%**
Se basa en la oxidación del cianuro mediante la adición de cloro o hipoclorito lo que produce cloruro de cianógeno, el cual es posteriormente es transformado en cianato, compuesto menos tóxico. Finalmente, el cianato se oxida hasta amonio y CO_2.	**85**	El cianuro es oxidado a cianato mediante dióxido de azufre y aire, actuando el cobre soluble como catalizador, en un proceso que requiere control de pH.	**80**	Se caracteriza por tener dos reacciones. En la primera reacción, conocida como "ozonización simple" se libera O_2, continuando así la oxidación del cianuro mediante una segunda reacción mostrada conocida como "ozonización catalítica".	**90**	Este proceso es muy eficiente debido a que tiene alta porosidad y gran área superficial por lo que su capacidad de adsorción del cianuro es muy elevada.	**87**

Tomado de "Análisis comparativo in vitro de la actividad biodegradadora de bacterias del género *Pseudomonas sp*. Y microorganismos nativos, para su uso en el proceso de biorremediación in situ de sales de cianuro," de L.V. Marín, 2015, p. 79.

Tratamiento Biológico

Este método novedoso es una opción aplicable a aguas residuales provenientes de procedimientos industriales o mineros, ya que constituye una alternativa eficaz por ser específico; es decir, se aplica directamente en los focos de contaminación que se pretende tratar, y una vez estandarizados, estos procedimientos resultan económicos con respecto a los procesos químicos o físico químicos.

La biodegradación del cianuro, genera una ventaja adicional por ser de diseño simple, además de que la disposición o el uso de la biomasa celular resultante después del tratamiento biológico puede ser reciclado en calidad de lodo biológico. Para este proceso se propone el siguiente protocolo:

Protocolo para la obtención de microorganismos capaces de degradar los glucósidos cianogénicos de la yuca.

Para llevar a cabo este método, se recomienda comenzar con el lavado de la yuca, para luego proceder a pelar y continuar con el rallado. De la yuca rayada es posible obtener el almidón, el cual se coloca en una caja Petri y se deja madurar a temperatura ambiente por unas dos semanas, de forma tal que las bacterias se puedan desarrollar de una mejor manera. Las bacterias *Pseudomonas flourescens* y *Bacillus subtilis* son las que se obtienen fundamentalmente mediante este procedimiento y son las que posteriormente serán aisladas y utilizadas para la remoción de cianuros. Las bacterias mencionadas anteriormente fueron usadas para el tratamiento de una muestra de agua de río contaminada con cianuro. En el laboratorio, con un electrodo selectivo fue posible calcular la concentración y observar la eliminación del cianuro por las bacterias, debido a que, como ya se ha mencionado, este se incorpora a su proceso metabólico (Carpio, 2014).

Fundamento de la actividad biológica de los microorganismos que degradan el cianuro

En los procesos de biodegradación de cianuro, los microorganismos convierten la parte orgánica en amoniaco y bicarbonato. Lo metales que pueden estar presentes normalmente son adsorbidos por la biopelícula o inmovilizados; la eficiencia de estos procesos dependerá de la estabilidad de los compuestos y muchos de los microorganismos utilizados para esto se encuentran en los lugares cercanos a donde se realiza algún uso del químico en la minería o en otras áreas. Por ende, las bacterias que se encuentran en la yuca contribuyen a la eliminación del cianuro. Estos procesos usualmente tienen lugar en contenedores biológicos, camas empacadas, reactores "batch", sistemas de lodos activados, entre otros (Gordillo, 2018).

4.2. Comparación entre los métodos físicos químicos y biológicos

Una vez realizada la comparación entre los distintos métodos de degradación del cianuro (Tabla 6), se pudo constatar que el proceso de biorremediación con bacterias de la yuca posee mayores ventajas como la facilidad para controlar el proceso operativo, la capacidad para tratar todas las formas de cianuro y ofrece una solución más simple y completa que las tecnologías mecánicas. Otras ventajas son, la facilidad de trabajar con cultivos puros y que sus procesos no provocan daños colaterales al ambiente, puesto que no se añaden sustancias químicas en el medio. Una de las posibles limitaciones pueden ser las temperaturas frías y las concentraciones muy altas de cianuro en las aguas (Castillo, 2018).

Tabla 6. *Comparación de los métodos Físicos, Químicos y Biológicos de degradación del Cianuro*

Procesos	Ventaja	Desventaja	Remueve	Tratamiento Adicional	Eficiencia de eliminación de CN^-
		Procesos Físico-Químicos			
Cloración alcalina	• Fácil manejabilidad. • Eficaz en el tratamiento con cianuro a niveles bajos	• Relativamente costoso de operar debido a los altos usos de reactivos. • Baja efectividad en la eliminación de algunos complejos cianuro-metálicos. • Altas cantidades de cloro a utilizar que pueden encarecer el proceso.	CN- NaSCN CH_4N_2O	SI	85%
Aire/Dióxido de azufre	• Aplicación a soluciones o lodos y la reacción es muy rápida.	• Incapacidad del proceso para oxidar subproductos intermedios del cianuro. • Costo de construcción de una planta procesadora. • Requiere una licencia para utilizar el proceso.	CN- SCNCN-	SI	80%
Ozonización	• Descomposición completa y rápida de distintas formas de cianuro	• La tecnología utilizada presenta un elevado coste por los equipos y los reactivos requeridos.	CN- KCN	NO	90%

Carbón Activado	• Alta porosidad y gran área superficial por lo que su capacidad de adsorción es muy elevada.	• Aplicable con concentraciones de cianuro bajas	CN- NaSCN	SI	87%
		Procesos Biológicos			
Biorremediación con las bacterias de la Yuca	• Ofrece una solución más simple y completa que las tecnologías mecánicas. • Menos costosa que otras tecnologías. • No requiere el uso de químicos o controles extensos.	• Se requieren evaluaciones y estudios específicos para cada tipo y sitio. • La tecnología no está totalmente establecida.	CN- SCNCN- (WAD) NaSCN	NO	95-98%

Elaborado por: Los Autores

Tomado de "Análisis comparativo in vitro de la actividad biodegradadora de bacterias del género *Pseudomona sp*. y microorganismos nativos, para su uso en un proceso de biorremediación in situ de sales de cianuro" de L.M. Marín, 2010, p, 81.

Los microorganismos procedentes de la descomposión de la yuca poseen varios sistemas enzimáticos que les permite desarrollarse en ambientes con alta concentración de cianuro, de esta degradación resulta la formación de amonio (Vallejo, 2010).

Entre las principales bacterias consideradas degradadoras de cianuro se puede mencionar a *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus subtilis pichiaohmeri.* Las características principales de estos microorganimos es que en su mayoría son unicelulares y más pequeñas que los hongos y tienen formas redondas o bacilares. Según los resultados de algunas investigaciones, los microorganismos aerobios presentan un porcentaje mayor de remoción (Vallejo, 2010).

Según Martínez (2012), la efectividad de las bacterias *Pseudomona fluorescens* y *Bacillus subtilis pichiaohmeri* superan el 95% de degradación del cianuro destacándose dentro de todas las bacterias degradadoras de cianuro, ya que estas resisten a condiciones desfavorables y se acoplan fácilmente a los diferentes factores del medio en lo que se refiere a la degradación del cianuro.

De esta manera, el proceso de biodegradación, utilizando bacterias procedentes de la descomposición de la yuca, resultan alentadoras brindando opciones a los mineros para que puedan implementarlo en sus procesos, generando disminución de costos en cuanto a la inversión en tecnologías de descontaminación y llegar a tener aguas y suelos libres de contaminantes para recircular al proceso o para disponer en fuentes naturales sin hacerles mayor daño. Casos como el realizado en Antioquia Colombia utilizando *Pseudomona fluorecens* con tiempo de proceso de hasta de tres días, se ha logrado un porcentaje de remoción de hasta 70%. La empresa Homestake Mining Co. en diferentes países puso en marcha procesos de biodegradación con eficiencias de remoción entre 91% y 95%. Pintail System Inc. logró reducir de 46.6 $mg.L^{-1}$ a 0.2 $mg.L^{-1}$ de cianuro, usando *Bacillus subtilis* y requiriendo entre 7 y 24 horas para llegar a un 99.9% de eficiencia en la remoción de cianuro (Gordillo, 2018).

4.3. Resultados de la eficiencia del Proceso de Biorremediación con bacterias de la yuca.

Según un estudio realizado en Colombia por la Universidad Icesi de Cali, se demuestra la eficiencia que tienen estas bacterias puesto que eliminan cerca del 99% del contaminante, como se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. *Porcentaje de eliminación del cianuro en aguas mediante biorremediación con bacterias procedentes de la yuca*

Ensayo	Concentración inicial ($mg.L^{-1}$)	Concentración final ($mg.L^{-1}$)	Remoción (%)
1	3600	2.58	98.9
2	1920	2.21	98.8
3	1440	1.65	98.8

Tomado de "Tratamiento de desechos del cianuro por biorremediación" de A. D. Martínez, 2012. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/277210162_Tratamiento_de_desechos_del_cianuro_por_biorremediación

Como puede observarse, las remociones de cianuro fueron en todos los casos superiores al 97%. Estas altas remociones del cianuro se deben a las reacciones enzimáticas oxidativas de las bacterias *Pseudomona flourescens* y *Bacillus subtilis* la cuales utilizan al cianuro como fuente de Carbono y Nitrógeno, dando como producto final al amonio (compuesto nitrogenado fácilmente asimilable por microorganismos) en el proceso de conversión. El consorcio de microorganismos demostró tener alta eficiencia en degradar el cianuro y de esta manera brinda una oportunidad a la minería acuífera con nuevos métodos de tratamiento para las aguas residuales procedentes de sus procesos unitarios (Martinez, 2012).

CAPÍTULO V.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El estudio bibliográfico de los métodos a utilizarse para la degradación del cianuro, arrojó procesos como, por ejemplo: procesos físico-químicos como la cloración alcalina, aire/dióxido de azufre, ozonización y el tratamiento biológico como la biorremediación; este último resultó ser el método más eficaz, amigable con el ambiente y de más bajo costo, utilizando bacterias que existen en la yuca y que degradan al cianuro.

- La biorremediación, utilizando bacterias provenientes de la descomposición de la yuca, resulta el método de elección porque brinda mayor eficiencia a la hora de eliminar el cianuro de las aguas residuales mineras, ofrece la facilidad de poder controlar el proceso operativo, así como la capacidad para tratar todas las formas de cianuro; constituye una solución más simple y completa que las tecnologías mecánicas y sus procesos no provocan daños, puesto que no se añaden sustancias químicas en el medio.

- La efectividad de los microorganismos degradadores de cianuro existentes en la yuca, investigada a través de una valoración bibliográfica cualitativa, es adecuada pues las bacterias: *Pseudomona flourescens* y *Bacillus subtilis pichieohmeri* reducen aproximadamente el 98.9 % del cianuro presente, según ensayos de degradación a nivel de laboratorio, logrando llevar las concentraciones de cianuro por debajo de los límites máximos permisibles estipulados por la normativa nacional, siendo así una alternativa en los procesos de biorremediación por la alta eficiencia degradativa de los cianuros existentes en las aguas procedentes de la minería aurífera.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se sugiere para futuros estudios con los microrganismos de la yuca, que durante la investigación en la fase de laboratorio se pueda brindar a los microorganismos las condiciones del ambiente natural (temperatura, pH, humedad, luz, etc.) de donde se ha extraído, para garantizar la supervivencia del microorganismo y de ese modo que los resultados obtenidos estén más orientados hacia condiciones reales de las áreas contaminadas.

- Continuar con la investigación de los contaminantes procedentes de los sitios bajo condiciones de vertimiento o aplicación de residuos de la explotación aurífera, lo cual permitirá un porcentaje mayor de acierto en cuanto a la identificación y eliminación del cianuro por microorganismos.

- Debido a que en Ecuador la biodegradación del cianuro no es un tema muy conocido y puesto en práctica, para aquellos que deseen implementar dicha investigación aún queda mucho por aprender como por ejemplo la puesta en práctica a nivel industrial para así poder beneficiar al ambiente y reducir la carga contaminante que estas problemáticas presentan en el entorno.

CAPÍTULO VI.

6. REFERENCIAS

Abad, H. (2019). Bacterias-de-Yuca-Ayudan-a-Eliminar-Cianuro-de-Rios-Contaminados-Por-Mineria-Colombia-Inn.pdf>.

Cardona, E. (2015). *Microorganismos Potenciales degradadores de Cianuro en residuos de minería de oro.* Medellín, Colombia.

Carpio, M. (2014). *Degradación de cianuro en efluentes líquidos cianurados por bacterias biorremediadoras en condiciones de laboratorio*. Tacna.

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*. Medellin , Colombia.

Castillo, Y. (23 de diciembre de 2018). *Determinación de parametros óptimas en la biorremediación de efluente cianurado de minerales auriferos, utilizando pseudomonas alcalófilas*. Repositorio Unac. Obtenido de http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/UNAC/4003/CASTILLO%20Y%20VEGA_PREGRADO_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Giraldo, C. E. A. (2015). *Microorganismos Potenciales degradadores de Cianuro en residuos de minería de oro*. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Colombia.

González, E. (2011). *Concepto y estrategias de biorremediación*. Nariño.

Gordillo, M. (noviembre de 2018). *Biodegradación de cianuro en aguas y suelos contaminados por la minería de oro*. Repositorio Universidad América. Obtenido de: https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7134/1/083531-2018%20I-GA.pdf

Hurtado, J., & Berastain, A. (2012). *Optimización de la biorremediación en relaves de cianuración adicionando nutrientes y microorganismos*. Lima.

Ibáñez, M. (2018). *Biorremediación de residuos industriales cianurados de la joyería por la bacteria alcalófila pseudomonas pseudoalcaligenes cect5344*. Córdova, Argentina. Repositorio Universidad de Córdoba. Obtenido de https://ueaeduec-my.sharepoint.com/personal/amb2015209_uea_edu_ec/Documents/Archivos%20de%20chat%20de%20Microsoft%20Teams/Cianuro%20proyecto%201.pdf

Marín, L., Ochoa, J., & Prado, K. (2010). *Análisis comparativo in vitro de la actividad biodegradadora de bacterias del género Pseudomonas sp, y microorganismos nativos, para su uso en un proceso de biorremediación in situ de sales de cianuro.* Cuenca, Ecuador. Repositorio Universidad Salesiana. Obtenido de https://ueaeduec-my.sharepoint.com/personal/amb2015209_uea_edu_ec/Documents/Archivos%20de%20chat%20de%20Microsoft%20Teams/metodos%20yuca.pdf

Martínez, A. (20 de septiembre de 2012). *Tratamiento de desechos del cianuro por biorremediación*. Research Gate. Obtenido de file:///C:/Users/absalon/Downloads/Tratamiento_de_desechos_del_cianuro_por_biorremedi.pdf

Moncada, M., Otero, D., & González, C. (2012). *Minería: ¿del extractivismo a una nueva era?* Bogotá, Colombia.

Restrepo, O., Montoya, C., & Muñoz, N. (2006). *Degradación microbiana de cianuro procedente de plantas de beneficio de oro mediante una cepa nativa de P.fluorecens*. Medellín, Colombia.

Rodallega, E. (2015). *Aislamiento y caracterización de bacterias capaces de degradar cianuros presentes en tanques de almacenamiento de cianuro en una mina de oro del municipio de buenos aires cauca*. Santiago de Cali.

TULSMA. (2015). *Reforma Texto Unificado Legislación Secundaria*, Medio Ambiente, LIBRO VI, Decreto Ejecutivo 3516, Registro Oficial Suplemento 2, 31/03/2003.

Vallejo, L. M. (14 de diciembre de 2010). *Análisis comparativo in vitro de la actividad biodegradadora de bacterias del género Pseudomonas sp. y microorganismos nativos,*

para su uso en un proceso de biorremediación in situ de sales de cianuro. Obtenido de https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1524