



T

**COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE ORO, CIANURACION
POR AGITACIÓN Y LIXIVIACION POR PILAS EN LA PLANTA DE BENEFICIO SAN
BARTOLO, SEGOVIA ANTIOQUIA**

ANA CAROLINA VÉLEZ GARCÍA

DIRECTOR:

SERGIO HUMBERTO VALENCIA HURTADO

Tecnológico de Antioquia
Institución Universitaria
Ingeniería en Software
Medellín, Colombia.
2020

DEDICATORIA

Dedicada a Dios por estar siempre presente en mí vida con sus bendiciones y poner las personas adecuadas para lograr todo lo que poseo y amo.

Dedicada con todo mi amor a mí esposo Néstor Victoria, puesto en mi camino para iluminar mi vida, por su sacrificio y esfuerzo para hacer este proyecto de vida una realidad.

A mis padres por brindarme su apoyo, la calidez y el amor de una familia por hacerme sentir orgullosa de contar con unos padres como ellos y regalarme un hermano que admiro

A mis hijos, Mariangel Victoria y Noah Victoria por llegar a enseñarme lo que es amar y ser capaz de dar la vida por alguien.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de trabajo de grado el docente Sergio Valencia Hurtado, por su acompañamiento y excelente labor.

RESUMEN

La actividad minera en Colombia es uno de los principales sectores económicos que se encarga de la explotación de recursos naturales por medio de la excavación del subsuelo. El departamento de Antioquia ha sido por tradición una zona de actividad minera y sus recursos constituyen una riqueza natural de gran importancia, pues se presentan condiciones geológicas propicias para la prospección, exploración y explotación de diversos minerales. El municipio de Segovia y Remedios en el Nordeste antioqueño producen el 11% del oro que se extrae en Colombia, según cifras de la Agencia Nacional de Minería, siendo unos de los principales productores en el país. San Bartolo es una plata de extracción aurífera ubicada en el Municipio de Segovia en la cual se realiza un proceso convencional de extracción de oro mediante cianuración por agitación. San Bartolo, en pro de mejorar sus procesos y acogerse a una producción más limpia, estuvo dispuesto a realizar ensayos de los sistemas de extracción de cianuración por agitación directa y cianuración por pilas para determinar a nivel de laboratorio si la extracción por lixiviación en pilas en comparación con la extracción por el método cianuración por agitación directa presenta mejor rendimiento, para recuperar del mineral aurífero, bajos costos de capital y de operación, y mayor reducción de efectos contaminantes al recurso hídrico. Se encontró que el método de cianuración por agitación directa es económicamente más viable aunque conlleva técnicamente más operación, en comparación con el método de lixiviación por pilas que genera grandes costos si no se realiza a gran escala, en cuanto rendimiento y eficiencia la lixiviación por pilas presenta una eficiencia de recuperación del 43.9 % mayor al de cianuración por agitación directa en general los dos sistemas son buenos pero depende de las metas que tenga una empresa en particular. En cuanto el medio ambiente el sistema de lixiviación por pilas es más amigable dado que genera menor cantidad de vertimientos y consumo del recurso hídrico, al momento de terminar su vida útil su cierre y abandono se puede comparar con el de un relleno sanitario para no causar afectaciones al medio ambiente y darle un adecuado manejo.

PALABRAS CLAVE

Minería aurífera, cianuración, lixiviación, Pila, Recurso hídrico, Contaminación

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN.....	4
PALABRAS CLAVE	4
TABLA DE CONTENIDO.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ABREVIATURAS.....	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	11
3. MARCO TEÓRICO.....	13
4. OBJETIVOS	25
4.1. Objetivo General	25
4.2. Objetivos Específico.....	25
5. HIPÓTESIS	26
6. METODOLOGÍA.....	27
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
8. IMPACTO ESPERADO	49
9. CONCLUSIONES.....	50
10. RECOMENDACIONES FUTURAS.....	52
REFERENCIAS	53
Bibliografía.....	53
ANEXOS.....	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de la planta san Bartolo	20
Figura 2. Sistema de lixiviación por pilas y cianuración por agitación	31

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales de Construcción para los Sistemas	27
Tabla 2. Reactivos Utilizados en los Procesos	28
Tabla 3. Gramos de oro Recuperados por Proceso	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4. Consumo de Reactivos.....	37
Tabla 5.Comparacion consumo de Reactivos Planta San Bartolo Vs Ensayos de Procesos.....	38
Tabla 6. Comparacion Sistema de Lixiviacion Por pilas Y Relleno.....	40
Tabla 7.Parametros medidos en un Vertimineto de Agua Residual	44
Tabla 8. Costos Reactivos.....	46
Tabla 9. Costos Proceso de Cianuracion	47
Tabla 10. Costos Procesos de Lixiviacion Por Pilas.....	47

ABREVIATURAS

Hora (h)

Gramos (g)

Kilogramos (kg)

Minutos (min)

Au (oro)

1. INTRODUCCIÓN

La minería en Colombia es considerada como una de las principales actividades económicas, en los últimos años se intensificó su actividad y es explotada principalmente por grandes multinacionales, de igual manera se cuenta con la pequeña minería que también genera un gran aporte a la economía.

El departamento de Antioquia ha sido considerado por tradición una zona de actividad minera dado a las condiciones geológicas que presenta para la exploración y explotación de diversos minerales representando un gran aporte al producto interno bruto del departamento. A su vez el municipio de Segovia Antioquia centra su actividad económica en la exploración y explotación de mineral aurífero donde se cuenta con más de 100 unidades productivas dedicadas al beneficio del oro.

El presente trabajo se desarrolló en el en la planta de Beneficio San Bartolo ubicada en el municipio de Segovia, donde se realiza un proceso de extracción de oro por medio de técnicas como molienda en húmedo, flotación y cianuración la cual se basa en la solubilidad que tiene el oro en soluciones cianuradas alcalinas diluidas, y por medio de la agitación se pueda dar una precipitación. Sin embargo, la cianuración trae graves consecuencias al medio ambiente, lo que se debe a la generación de lodos y vertimientos de aguas residuales, motivo por el cual la planta dispuso del uso de sus instalaciones para la ejecución de este trabajo que tiene como pregunta investigación es si la extracción por lixiviación por pilas en comparación con la extracción por el método cianuración por agitación presenta mejor rendimiento para extracción del mineral, costos de capital y de operación, y mayor reducción de efectos contaminantes al recurso hídrico. La cual dependiendo de los resultados obtenidos está dispuesta a implementar el sistema de cianuración por pilas a escala industrial, con el fin de mejorar su proceso y contribuir al progreso en el tema ambiental.

Para lograr resolver esta pregunta investigativa se implementó la construcción de los dos sistemas a nivel de laboratorio, teniendo en cuenta que el sistema de cianuración es el más utilizado actualmente y la lixiviación por pilas es en los últimos años se ha desarrollado hasta llegar a ser un método eficiente para tratar el oro oxidado y los minerales de plata. La lixiviación por pilas ha demostrado ser una forma efectiva para extraer metales preciosos de depósitos pequeños y poco profundos. Como resultado se estableció que el sistema de lixiviación por pilas es más eficiente en cuanto recuperación de oro que el sistema de cianuración directa por agitación, pero dado las condiciones que presenta el Municipio de Segovia y la producción del entable San Bartolo para San Bartolo es más rentable realizar el proceso de cianuración, en general el desarrollo del proyecto dio resultados positivos que aportan a implementar el sistema de lixiviación por pilas como una solución ambiental a la problemática que se genera

con la disposición de material estéril resultante del proceso en fuentes hídricas y en el suelo reduciendo así la contaminación, puesto que por ahora la planta de benéfico San Bartolo no cuenta con las condiciones para implementar el sistema a escala industrial aunque exista un porcentaje mayor de eficiencia en cuanto recuperación de oro lo que representa un potencial para la empresa.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Colombia por su posición geográfica ha sido reconocida como un territorio rico en minerales. La extracción de minerales en Colombia pertenece al sector primario económico que se encarga de la explotación de recursos naturales por medio de la excavación del subsuelo. De allí se seleccionan minerales como oro, cobre, diamante, arcilla, cemento, entre otros, para su comercialización. Según el Ministerio de Minas el país cuenta a nivel de exploración con el 70% de información cartográfica geológica del subsuelo, 12% de información geoquímica y 46% de estudio geofísico. Cifras que son destacables a nivel de Latinoamérica. Además, se estima que la exploración del terreno aún tiene mucho potencial a futuro y grandes oportunidades para los inversionistas de la extracción de minerales, lo que se debe a que las concesiones y títulos mineros no superan el 5%. (Noticias Comercio Exterior, 2018)

El departamento de Antioquia ha sido por tradición una zona de actividad minera y sus recursos constituyen una riqueza natural de gran importancia, pues se presentan condiciones geológicas propicias para la exploración y explotación de diversos minerales. El municipio de Segovia y Remedios en el Nordeste antioqueño producen el 11% del oro que se extrae en Colombia, según cifras de la Agencia Nacional de Minería, siendo unos de los principales productores en el país. (BIRD, 2008). El municipio de Segovia (Antioquia) es considerado el municipio con más casos de intoxicación por mercurio de Colombia, a su vez está en el departamento de Colombia con más casos, que es a su vez la tercera nación que más mercurio libera al medio ambiente (75 toneladas al año), detrás de China e Indonesia, según el Departamento Nacional de Planeación.

En el municipio de Segovia (Antioquia) se realiza un proceso convencional de extracción y beneficio de mineral aurífero, por métodos como la amalgamación y la cianuración por agitación, siendo la primera la más usada. En la amalgamación prima la utilización del mercurio, el cual es usado para separar y extraer el oro de las rocas o piedras en las que se encuentra. El mercurio se adhiere al oro para formar una amalgama que facilita su separación de la roca u otro material. Luego se calienta la amalgama para que se evapore el mercurio y quede el oro. (PNUMA, 2015).

La cianuración se basa en la solubilidad que tiene el oro en soluciones cianuradas alcalinas diluidas, y por medio de la agitación se pueda dar una precipitación. Sin embargo, la cianuración trae graves consecuencias al medio ambiente, lo que se debe a la generación de lodos y vertimientos de aguas residuales. Los impactos de la minería sobre los ecosistemas colombianos generan una transformación de la calidad del agua, que se produce durante las etapas de exploración y explotación del proyecto minero.

Así, en la primera fase la excavación tiene un alto impacto ambiental, muchas veces irreversible, como acidificación de las aguas, inestabilidad de taludes, deforestación y apertura de accesos que generan pérdida de hábitats, biodiversidad y afectación de ecosistemas.

En la segunda fase durante la explotación los impactos ambientales son más agresivos como la alteración fisicoquímica de las aguas, sedimentación y afectación de la dinámica de los cuerpos de agua por el vertimiento de aguas residuales mineras, contaminación del suelo con estériles y colas, aumento de procesos erosivos y desestabilización del suelo por la remoción de cobertura vegetal, lo que afecta a las comunidades faunísticas, aumento de material particulado, gases y ruido, y alteración del paisaje. En este sentido, los impactos ambientales más representativos sobre el recurso hídrico se relacionan con la contaminación química, el aumento de sedimentos, el incremento de turbidez, la disminución de caudales y la alteración del curso (Humboldt, 2016).

El proceso de extracción también se puede realizar de otra manera que se conoce como lixiviación por pilas. Este es uno de los sistemas que presenta mayor facilidad de construcción (adobe, arena y cemento). A escala industrial se contempla el tratamiento de 1000 a más de 50 000 ton/día de mineral. Es también atractiva para el desarrollo de depósitos pequeños. Su gran flexibilidad operativa le permite abarcar tratamientos cortos (semanas) con mineral triturado o bastante prolongados (meses hasta años) con mineral grueso, al tamaño producido en la mina. (German C. 2001).

Por lo tanto, la pregunta de esta investigación es si la extracción por lixiviación por pilas en comparación con la extracción por el método cianuración por agitación presenta mejor rendimiento para extracción del mineral, costos de capital y de operación, y mayor reducción de efectos contaminantes al recurso hídrico. San Bartolo es una planta de extracción aurífera ubicada en el municipio de Segovia (Antioquia) en la cual se realiza el proceso convencional de extracción de oro por medio de la cianuración por agitación en pro de mejorar sus procesos y acogerse a una producción más limpia permitirá diseñar un sistema piloto a escala de los dos sistemas mencionados.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes de la minería en Colombia

En Colombia existen un total de 8.000 solicitudes de títulos mineros, los cuales están radicados ante las autoridades del sector, para obtener los respectivos permisos de exploración y explotación en Colombia. Los que sean aprobados, se sumarán a los 7.935 que están vigentes, de los cuales, solo el 2.35% está intervenido lo que significa que si se unen todas las zonas en producción apenas equivalen a una extensión similar a la de todo el departamento de Sucre.(ANM,2015)

El interés por la obtención de permisos indica que en Colombia se está avanzando en el propósito de hacer minería legal desde el nacimiento de las empresas. Según cifra de la Agencia Nacional Minera (ANM), el 41% corresponde a materiales de construcción, seguido de oro y metales preciosos, otros minerales, carbón y esmeraldas. En otras palabras, se puede decir que la minería colombiana, a pesar de que apenas pesa el 2.1% del Producto Interno Bruto, es una actividad prioritaria para el desarrollo. Solo el año pasado, generó regalías por 2.5 billones de pesos, que se invierten en obras para las regiones. La mayor parte de estos recursos provienen de las empresas de pequeña minería. Los proyectos grandes los explotan 28 compañías y buena parte de ellas son de capital extranjero. (ANM, 2018)

La importancia del sector radica en que sus productos hacen parte de la vida diaria de los colombianos, bien sea porque dependen económicamente de esta actividad, viven ancestralmente de ellas, laboran en minas, transportan los productos, los comercializan, se benefician de los ingresos por exportaciones y hasta los usan a diario. Con un incremento del 7%, el oro se ubicó como uno de los minerales de mayor crecimiento en su producción durante el primer trimestre del año, en comparación con el mismo periodo de 2019, pasando de 8.9 a 9.5 toneladas. De este modo, se reafirma la importancia que tendrá en la reactivación económica sostenible del país. De acuerdo con la Agencia Nacional de Minería, el aumento en la producción del oro se debe, principalmente, al buen momento de precios de este mineral, que recientemente ha alcanzado valores superiores a los U\$1.730 dólares la onza, el más alto en los últimos 7 años (ANM,2020)

Antioquia ha sido por tradición una zona de actividad minera y sus recursos constituyen una riqueza natural de gran importancia, pues se presentan condiciones geológicas propicias para la exploración y explotación de diversos minerales (BIRD, 2008). En la última década ha resurgido la producción de oro en Antioquia. Luego de altos niveles de

producción durante la década de los ochenta, donde se alcanzó un pico de 31.7 toneladas en 1984, la producción cayó durante los noventa con un mínimo de 4.9 toneladas en el año 1994. Entre finales de los noventa y finales de la década del 2000 la producción resurgió y alcanzó un máximo en diez años de 28 toneladas para 2009. Luego de una leve caída luego del 2009 la producción ha continuado con su crecimiento alcanzando 28 toneladas en 2014. En 2015 el nivel de producción fue de 21.5 toneladas. Según algunas estimaciones, entre el 65% y 70% del oro producido en Antioquia proviene de operaciones aluviales y entre el 30% a 35% de vetas subterráneas, y la producción de oro en Antioquia representa entre el 2% y el 4% del PIB del departamento.(OCDE, 2016)

A su vez el municipio de Segovia Antioquia su actividad económica se concentra en la exploración y explotación del material aurífero, Segovia produce el 39.4% del oro de la región y el 6.66% a nivel nacional, siendo estas cifras determinantes en lo que representa la producción nacional y departamental de oro Existen “40 unidades mineras, 82 beneficiadores y 3 plantas de beneficios, es decir, 125 unidades productivas de minería artesanal (Jacqueline, 2017)

- **3.2. Métodos de Explotación Mineral en Colombia**

Principalmente en Colombia el método de explotación del mineral aurífero depende del tipo de depósito, el cual puede ser a cielo abierto o subterráneo.

- **3.2.1. Explotación a cielo abierto**

Existe un sinnúmero de métodos de explotación a cielo abierto que se pueden clasificar en cuatro grandes grupos, teniendo en cuenta, los más utilizados en el país: Tajo Abierto (Open Pit), Minería de Cajón o Descubiertas (Strip-mining), Minería de Contorno (Contour Mining) y Métodos Mixtos o Especiales.

A continuación se hace una descripción general de los métodos usados a cielo abierto y sus principales características.

- **Tajo abierto:** Es el método más avanzado técnicamente. Se caracteriza por mover grandes volúmenes de material estéril. El diseño comprende una serie de bancos de extracción ubicados en el macizo rocoso o mineralizado, que por su buzamiento obligan a una profundización de la excavación. Los materiales estériles pueden ser dispuestos en la parte externa o interna del tajo. Estas explotaciones pueden realizarse de manera longitudinal, transversal o mixta. (MinAmbiente, 2002)

- **Minería de cajón o descubiertas:** Aplicable principalmente a yacimientos sedimentarios, de capas con bajos buzamientos y poco espesor, altas relaciones de descapote, en las que se permite el manejo de dos bancos uno superior de estéril y el otro que comprende el espesor del cuerpo mineral. Su característica principal está en el aprovechamiento de la excavación como vertedero del material estéril removido en el primer ciclo. (Herbert, 2006)

- **Minería de contorno:** Consiste en excavar una trinchera abierta a lo largo de toda la longitud del afloramiento. El estéril removido se deposita sobre la ladera. Para el movimiento del estéril se emplea bulldozer con ripper, el cual empuja directamente este material. En algunas ocasiones se fragmenta el material con explosivos. (MinAmbiente, 2002)

- **Métodos mixtos o especiales:** Se aplica en aquellos yacimientos en los que, por sus características geológicas y por los aspectos tecnológicos, se llegan al límite de explotación por el sistema de Cielo Abierto, y se hace necesario continuar la extracción de manera subterránea. Igualmente, cuando se aplica una minería de contorno que deja una porción de reserva sin extraer. (MinAmbiente, 2002)

Dentro de este tipo de explotación se encuentra los materiales de arrastre o minería aluvial, la minería para materiales de arrastre y de aluvión se efectúa para la extracción de minerales y materiales que han sido arrastrados o transportados por el agua. Se requiere que la sustancia mineral esté en o cerca de las corrientes de agua y a lo largo de las márgenes de las corrientes fluviales. Se extraen por este método, materiales de construcción (gravas, arenas), metales preciosos (oro, plata, platino), algunas gemas y metales no preciosos como estaño. Existen de igual manera diferentes métodos como:

- **Hidráulico:** Se emplea en depósitos de gravas y cantos de gran tamaño. Se utiliza agua a presión para desintegrar el depósito, y se conduce hasta las plantas de lavado, clasificación, trituración y concentración del mineral. La producción está limitada por la disponibilidad de agua, espesor del depósito y tamaño de las rocas encontradas. (Carlos Arturo Avila, 2014)

- **Dragado:** Consiste en la excavación bajo el agua de un depósito aluvial grande en extensión y espesor. Puede ser una corriente activa o extinta del lecho del río. La draga que se utiliza es, básicamente, una plataforma flotante que remueve el material por medio de una línea de cucharas con instalaciones de clasificación, concentración y separación. Las dragas pueden remover material de hasta 45 m bajo el agua. La operación está limitada por la disponibilidad de agua clara y por el porcentaje de grava presente en el depósito.

• 3.3. Explotación Subterránea

La minería subterránea consiste en la extracción y transporte del material a través de túneles y galerías que alcanzan la superficie, en los cuales se busca un mínimo movimiento de material estéril. Este sistema se aplica cuando las condiciones geológicas de un depósito o yacimiento mineral son tales que, la remoción del material estéril hace que la minería a cielo abierto sea antieconómica. (MinAmbiente, 2002)

La recuperación del mineral debe realizarse sobre bases de seguridad y economía, al tiempo que suministre un adecuado soporte de techo y piso en los frentes de producción, procurando preservar la superficie libre de subsidencia. Adicionalmente, la minería subterránea debe manejar actividades específicas de drenaje, ventilación, alumbrado, etc., adecuados a los frentes de trabajo, que permitan garantizar condiciones óptimas de trabajo, que eviten la generación de polvos y gases por encima de los límites permisibles. El uso de explosivos está ampliamente difundido; sin embargo, para algunos minerales o materiales como el carbón, su uso es restringido por las condiciones de seguridad que se requieren. (MinAmbiente, 2002)

Los métodos de minería subterránea se clasifican, entre otros aspectos, de acuerdo al soporte del techo. Este depende de las propiedades mecánicas de las rocas y de las características espaciales, tanto de la sustancia mineral como de la roca encajante. Los métodos utilizados en minería subterránea de manera general se clasifican en tres grandes grupos:

• **Método Auto Portante:** Este método no requiere de soporte artificial, pero no excluye la utilización, para algunos casos de pernos de anclaje en el techo.

- Método de cámaras almacén.
- Método de pozos o macizos largos
- Método de pozos tolva

• **Método con Soporte:** Método en el cual los túneles de extracción, requieren soporte, y el techo sufre subsidencia gradual o desprendimiento después de la explotación.

- Método de cámaras con relleno
- Método de cámaras y pilares
- Método de tajo largo con derrumbe dirigido
- Método de tajo cortó
- Método de tajos en diagonal
- Método de testers o escalones invertidos

- **Método de Derrumbe por Bloques:** Método que depende de las propiedades mecánicas y espaciales de la roca. El depósito es inducido a derrumbarse bajo la acción de la gravedad.

- Método por hundimiento de bloques
- Método de hundimiento por subniveles

Los métodos más utilizados en Colombia son

- **Derrumbe por bloques:** Se emplea para el arranque de los minerales cuando la gravedad y la presión de los terrenos situados en el techo obligan al derrumbe de la sustancia mineral.

- **Testereros o escalones invertidos:** Se utilizan en aquellos yacimientos con fuerte buzamiento para lo cual se descompone el yacimiento en pisos o niveles. Se parte de la galería superior o inferior y se abre un frente de trabajo que se va ensanchando y formando bloques escalonados que van progresando a medida que avanza la explotación. (ANM,2003)

- **Tajo largo con derrumbe dirigido:** Este método se aplica en yacimientos o depósitos de poca inclinación, con espesores entre 1 y 2.5m. Consiste en dividir el yacimiento en grandes bloques o tajos, por medio de galerías superiores e inferiores, que determinan el ancho del frente de arranque y unidas por galerías inclinadas, presentándose el derrumbe del techo en las áreas ya explotadas.

- **Cámaras y Pilares:** En la extracción del mineral se dejan pilares del mismo para sostener el techo. Las cámaras se construyen en forma múltiple y paralela. Se hacen tan anchas como las características y propiedades de resistencia de las rocas de techo y piso y del mismo mineral lo permitan. (MinAmbiente, 2002)

- **3.4. Beneficio de Minerales en Colombia**

El beneficio de los minerales consiste en el proceso de separación, molienda, trituración, mezcla y homogenización, lavado, concentración y otras operaciones similares a que se somete el mineral extraído para su posterior transformación y utilización.

El Beneficio de Minerales comprende toda la serie de procesamientos que se pueden realizar sobre el mineral extraído para obtener productos útiles o valiosos. Se puede

realizar beneficio de minerales bajo dos tipos de operaciones que son: operaciones unitarias (transformación física del mineral) y procesos unitarios de beneficio (transformación físico-química del mineral). A continuación se describen algunas operaciones y procesos básicos que se utilizan comúnmente en el beneficio y transformación de minerales.

- **Trituración**

En la trituración se persigue disminuir el tamaño de los trozos de roca provenientes de la mina; sin embargo se debe controlar la generación de finos. Puede clasificarse en cuatro grupos según la granulometría de los productos y su utilización: primaria, secundaria, terciaria y usos especiales (esta última para reducir materiales blandos y evitar la sobreproducción de finos o para efectuar una trituración selectiva de los minerales frágiles). (ANM,2003)

- **Molienda**

En general el proceso consiste en reducir las partículas gruesas procedentes de la trituración secundaria a un tamaño límite que depende del mineral y del proceso siguiente. Los molinos, según su modo de trabajo, se clasifican en:

1. Molinos que trabajan por percusión: molinos de pisones.
2. Molinos que trabajan por fricción: molinos de disco.
3. Molinos que trabajan por fricción y percusión: molinos rotatorios. Los molinos rotatorios son medios molidores sueltos (bolas, guijarros, y barras). Reducen el tamaño de partículas aplicando esfuerzos por impacto y corte.

La molienda puede ser en seco o húmeda. La primera usa grandes sistemas de ventiladores para mover los materiales, mientras que en la segunda el agua es el medio de transporte. (MinAmbiente, 2012).

- **Amalgamación**

Es el proceso por el cual el mercurio es aleado con algún otro metal para producir una amalgama. La aleación de mercurio y oro es un ejemplo de este método. Se ha usado mercurio para coleccionar el oro porque forma una amalgama (Au_2Hg_3) con este, pero no con los minerales de sulfuro. Dado que el mercurio es una sustancia muy tóxica, el proceso de amalgamación ha sido descontinuado por los grandes productores de oro y ha sido reemplazado por otros procesos (lixiviación con cianuro). (Miguel Casallas, 2015)

- **Por flotación**

La flotación es un proceso físico químico complejo. Al igual que otras técnicas de concentración requiere que las especies minerales útiles tengan un grado de liberación adecuado. El proceso se basa en la adhesión selectiva de partículas de especies minerales a burbujas de aire dispersas en un medio acuoso. El desarrollo de la flotación está vinculado al descubrimiento progresivo de ciertas sustancias químicas de carácter orgánico, que incorporadas a una pulpa, presentan la facultad de conferirle propiedades de flotabilidad en forma selectiva o semiselectiva a ciertas especies minerales útiles. (MinAmbiente, 2012).

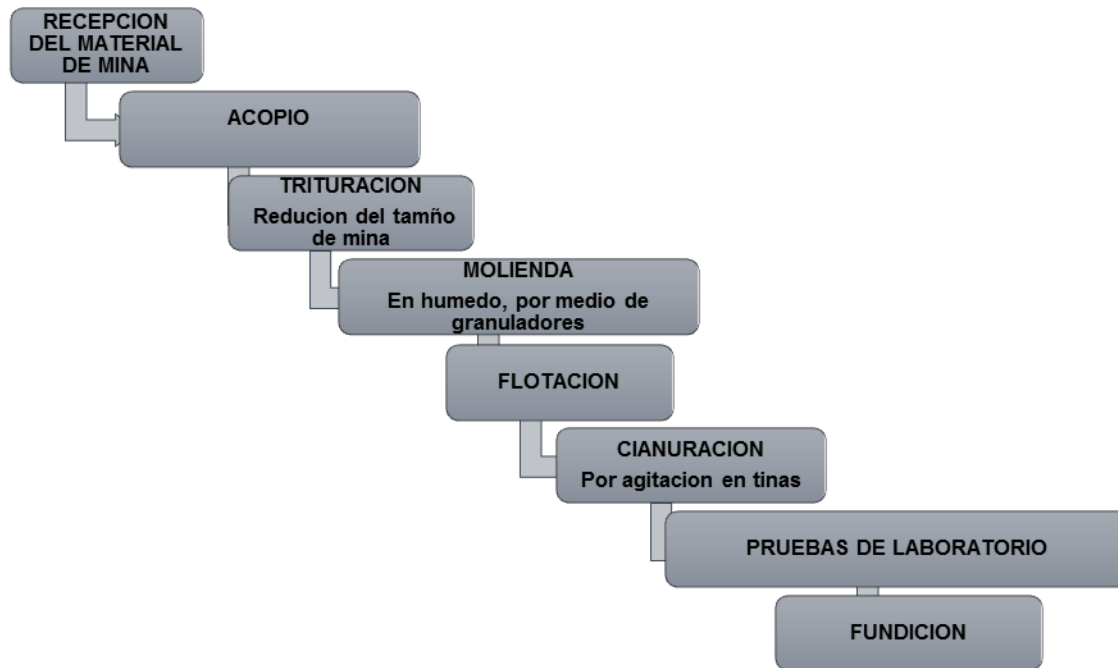
- **Cianuración**

Otra manera de hacer la extracción del oro, es por una técnica conocida como cianuración, la cual busca evitar el uso del mercurio; se viene implementando desde hace casi un siglo. La cianuración por agitación, alcanza recuperaciones de oro de más del 90% y consiste en agregar solución lixiviante que en algunos casos, se trata solo de cianuro concentrado, y en otros, de cianuro y sales como cloruros y nitratos, que luego se pone en contacto con material que contiene el oro que previamente ha sido molido hasta un nivel muy fino. Lo que se logra entonces, es que el oro pueda entrar en solución con la fase acuosa, dejando de lado todo el resto de materiales minerales, los cuales son retirados de la mezcla para seguir el trabajo con la solución, que a través de una precipitación química permite recuperar el oro dejando la solución con cianuro y otros subproductos que debe ser manejada de forma adecuada para evitar contaminación. (Miguel Casallas, 2015)

Cianuración es el proceso que utiliza la propiedad del oro de disolverse en una solución de cianuro de sodio, en presencia de oxígeno. Aquí el material se lixivia en tanques de agitación con la adición de aire y/u oxígeno. El proceso de disolución se lleva a cabo de una manera más rápida y efectiva. (MINMINAS, 2015). La solución resultante que contiene oro se denomina “solución cargada”. Luego se agrega zinc o carbón activado a la solución cargada para recuperar el oro extrayéndolo de la solución. La solución residual o “estéril” (es decir, carente de oro) puede recircularse para extraer más oro o enviarse a una instalación para el tratamiento de residuos. (Mark J. Logsdon, 1995)

El vertimiento generado en esta etapa es de mucho cuidado debido a que el principal contaminante es el cianuro. (MINMINAS, 2015).

En la figura 1 se muestra en resumen los pasos que conlleva el beneficio del material aurífero en una planta convencional del municipio de Segovia en este caso específicamente la planta San Bartolo.



Fuente: Propia

Figura. 1 Proceso Planta San Bartolo

- **3.5. Lixiviación por pilas (Cianuración Por Pilas)**

De igual manera existen métodos de beneficio menos usados como la lixiviación por pilas, esta técnica de extracción ha sido ampliamente aceptada como un excelente método industrial para recuperar oro y plata. La cianuración en pilas se aplica a las menas de oro de baja ley explotada en bajo volumen por la pequeña minería, o a grandes depósitos de oro de baja ley, explotados por la minería a gran escala. (MINMINAS, 2015).

La cianuración en pilas consiste en agregar solución diluida de cianuro, o sea, en el paso lento de la solución a través del material poroso de la pila. La pila puede ser de mena triturada o molida y aglomerada, dispuesta sobre una superficie impermeable que permite colectar la solución del cianuro de oro resultante. Sobre la pila se rocía la solución de cianuro diluida, que percola y disuelve los metales preciosos finamente desmanados en el material de la pila. La solución enriquecida de oro llega al piso permeable, dispuesto en forma ligeramente inclinado, para que fluya hacia una pileta de almacenamiento. Esta pileta alimenta con solución el circuito.

La flexibilidad operativa permite tratamientos que pueden durar semanas meses e incluso años dependiendo de los tamaños de la mina (toneladas) y de la pila con que se dese trabajar. (MINMINAS, 2015).

Para llevar a cabo el proceso de lixiviación, las pilas deben contar con unas condiciones de construcción donde se deben contar con las siguientes consideraciones:

- **La preparación del mineral**

La preparación para la lixiviación radica en producir un mineral suficientemente fino que permita el contacto de la solución con los metales y lograr un mineral suficientemente permeable y estable que permita una adecuada velocidad de percolación a través de la pila.

- **Pila y Capa Impermeabilizada**

Cada instalación de lixiviación es única y el diseño de las pilas y capas impermeabilizadas requieren la combinación de varios factores influyentes. Entre éstos se incluye el tipo y origen del mineral, metalurgia, lixiaviabilidad, topografía del lugar, características geotécnicas y geohidrológicas del lugar, así como el clima del mismo.

Actualmente, se utilizan tres métodos básicos de construcción y operación de pilas y capas impermeabilizadas, estos son: pilas de expansión permanente, la capa impermeabilizada reutilizable y la lixiviación tipo valle. Las pilas y las capas impermeabilizadas necesitan estar diseñadas de forma que sean estructuras estables que contendrán tanto el sólido como el lixiviado. Cada uno de los tres tipos de construcción de pilas/capas impermeabilizadas requiere la consideración de distintos criterios en diseño y operación. (Ministerio de Energía y Minas 2001)

- **La colocación del mineral en las pilas**

Puede realizarse mediante diversos métodos, dependiendo principalmente de la naturaleza del mineral. Los métodos varían desde descarga y nivelación con un bulldozer, hasta la colocación mediante cargadores frontales y el apilamiento con fajas transportadoras. Los principales criterios al seleccionar un método de construcción de pilas consisten en limitar la estratificación, compactación y segregación de partículas así como evitar daños en el revestimiento durante la construcción.

Frecuentemente, se cuenta con pocas alternativas posibles para la instalación de pilas debido a impedimentos tales como distancia de transporte, estado del terreno o topografía.

- **Las bases de las pilas**

Deberán ser capaces de soportar las cargas aplicadas por las mismas, no sólo en términos de estabilidad, sino también en términos de asentamientos diferenciales a través de las pilas. Los asentamientos diferenciales pueden afectar negativamente el drenaje de las pilas y dañar el revestimiento y la capa impermeabilizada. En el caso de pilas tipo valle o lugares con topografía de pendientes empinadas, se deberá considerar en el diseño de las pilas la capacidad de los materiales de las bases y la interface del revestimiento de los mismos para resistir los deslizamientos. Los sistemas de revestimiento (revestimiento sintético) son necesarios principalmente para contener las soluciones de lixiviación dentro de la instalación, y aunque las regulaciones ambientales con frecuencia requieren redundancia en el diseño, se deberá escoger sistemas de revestimiento que cumplan con este objetivo de contención. Los sistemas de revestimiento de capas impermeabilizadas generalmente están compuestos por combinaciones de: revestimientos de membrana sintética, revestimientos naturales o naturales modificados, así como revestimientos naturales y sintéticos compuestos.

- **Aplicación de Soluciones**

La solución de lixiviación es transportada hacia las pilas a través de un sistema de tuberías. Generalmente, se requiere un sistema de bombeo que proporcione suficiente presión para la aplicación de aspersores o riego por goteo del lixivante.

El principal requerimiento es la distribución uniforme del lixivante. Las velocidades típicas de aplicación van de 0,003 a 0,005 gpm/pies² (0,007 a 0,01 3/hora/m²). Las velocidades de aplicación deberán resultar en un flujo no saturado de lixivante a

través del material de pilas. El flujo de solución a través de las pilas es esencialmente vertical desde la superficie hasta la base de las mismas. (Ministerio de Energía y Minas 2001)

- **Recolección de Soluciones**

Las soluciones de lixiviación cargadas se recolectan de las pilas a través del sistema de tuberías y/o una capa de recolección de lixiviado de alta permeabilidad. Con frecuencia se utilizan las tuberías de drenaje perforadas que se encuentran en la capa de drenaje, ubicadas en la parte superior de la capa impermeabilizada, para promover la recolección de soluciones. Dichas tuberías ayudan a evitar el crecimiento de presión de agua libre en la capa impermeabilizada y, por lo tanto, ayudan a reducir el potencial de pérdidas por filtraciones y los impactos en la estabilidad de las pilas. Las tuberías de drenaje pueden conectarse directamente con un sistema de tuberías a la poza de solución cargada, o la solución puede ser transportada a través de un canal/zanja de recolección.

- **Circuito de Recuperación del Metal**

La recuperación de metales preciosos puede realizarse mediante un proceso de precipitación con polvo de zinc (proceso de Merrill-Crowe) o mediante la adsorción con carbón activado. También se incluye las etapas de electrodeposición y fundición. En el caso de lixiviación de cobre se utiliza la extracción de solventes (SX) seguido de electrodeposición (EW) para la extracción de metales. La elaboración de procesos de recuperación de metal escapa al ámbito de estos lineamientos.

- **Factores climáticos**

Los factores climáticos afectan el manejo de lixiviación de pilas en formas importantes. La evaporación, precipitación pluvial y deshielo de la nieve controlan el balance hídrico y los requerimientos extremos de inundación para los trabajos de desviación. (Ministerio de Energía y Minas 2001)

- **3.6. Marco Normativo**

Las normas que regulan la actividad minera en los diferentes países de América Latina configuran un universo complejo, altamente heterogéneo e imposible de describir en términos de tendencias unificadas. Responden a particularidades constitucionales y

legales de cada país, a una “cultura” normativa que tiene matices propios en cada uno de ellos y a la dinámica del sector en términos económicos. Por ejemplo, en países como Chile no existe un código minero único, sino un conjunto de normas que regulan diferentes aspectos de la actividad, basados en preceptos constitucionales establecidos hace tres décadas.

En los demás países de América Latina existe una ley minera, que ha evolucionado con signos diferentes en cada uno de ellos y que define las reglas de juego para la explotación de los recursos, los tipos de minería, la institucionalidad encargada de la regulación del sector, las características y los procedimientos para la titulación, los pagos que deben hacer los particulares al Estado por la explotación de los recursos, las fases del proceso productivo y, en algunos casos, las normas ambientales para el sector, así como algunos procedimientos de participación de la ciudadanía y/o de las minorías étnicas (Foro Nacional por Colombia, 2013).

Según la Agencia Nacional de Minería, la normatividad Colombiana contempla unas áreas excluidas de la minería de pleno derecho (por razones ambientales) y otras áreas en las que la actividad está restringida. Así mismo, se cuenta con altos estándares en materia de protección ambiental para las actividades que implican el aprovechamiento de los recursos naturales no renovables y existen autoridades regionales tales como: Corporaciones Ambientales Regionales y la Agencia Nacional de Licencias Ambientales - ANLA. El proponente a realizar actividades mineras deberá cumplir con la guía minera ambiental aprobada por la autoridad ambiental para iniciar la etapa de exploración y requerirá de la Licencia Ambiental otorgada por la autoridad competente para iniciar las fases de construcción y montaje, así como la de exploración. (ANM 2018)

En 2001, el Código de Minas o ley 685 de 2001 favoreció actividades para las multinacionales, pues privatizó la explotación de minerales y promovió la eliminación de barreras fiscales y comerciales para estimular la inversión extranjera directa, el Código tiene como objetivos de interés público fomentar la exploración técnica y la explotación de los recursos mineros de propiedad estatal y privada; estimular estas actividades en orden a satisfacer los requerimientos de la demanda interna y externa de los mismos y a que su aprovechamiento se realice en forma armónica con los principios y normas de explotación racional de los recursos naturales no renovables y del ambiente, dentro de un concepto integral de desarrollo sostenible y del fortalecimiento económico y social del país. (Código de Minas 2001)

A nivel regional, en el departamento de Antioquia cuenta con la corporación autónoma regional Corantioquia como entidad ambiental en el territorio la cual se encarga de aplicar la legislación colombiana en el área minero-ambiental incluye dos marcos

jurídicos el minero y el ambiental, dichos marcos jurídicos en el 2015 se compilan en el decreto único reglamentario 1073 de 2015 del sector administrativo de minas y energía, la Ley 685 de 2001 – Código minero y en el decreto 1076 del 2015 del sector ambiente y desarrollo sostenible Respectivamente .

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Determinar a nivel de laboratorio si la extracción por el método de lixiviación en pilas en comparación con la extracción por el método cianuración por agitación presenta mejor rendimiento, para extracción del mineral aurífero, bajos costos de capital y de operación, y mayor reducción de efectos contaminantes al recurso hídrico.

4.2. Objetivos Específico

- Determinar el rendimiento y sus efectos entre el sistema de cianuración por agitación y lixiviación por pilas
- Identificar mediante revisión bibliográfica, los principales contaminantes y afectaciones que genera el proceso de cianuración en el recurso hídrico.
- Determinar costos técnico económicos de los métodos.

5. HIPÓTESIS

La extracción por lixiviación por pilas en comparación con la extracción por el método cianuración por agitación si presenta un mejor rendimiento para extracción del mineral, costos de capital y de operación, y mayor reducción de efectos contaminantes al recurso hídrico

6. METODOLOGÍA

•Determinación en el rendimiento y sus efectos entre el sistema de cianuración por agitación directa y lixiviación por pilas.

Se determinó a nivel de laboratorio el rendimiento y sus efectos entre el sistema de cianuración por agitación directa y lixiviación por pilas. Para poder comparar entre los dos métodos de extracción propuestos, se realizaron 3 ensayos a nivel de laboratorio del sistema de cianuración por agitación directa y un ensayo para el sistema de lixiviación por pilas.

Los sistemas se construyeron en las instalaciones de la planta de beneficio San Bartolo, ubicada en el Municipio de Segovia Antioquia, en el cual se lleva a cabo un proceso de beneficio para la extracción de oro con métodos convencionales como amalgamación, flotación y cianuración por agitación.

Materiales

A continuación se muestra en la tabla 1 los materiales utilizados para la construcción a nivel de laboratorio para el sistema de cianuración por agitación directa y lixiviación por pilas.

Tabla 1. Materiales de Construcción para los Sistemas

Sistema de cianuración por agitación	Sistema lixiviación por Pilas
<ul style="list-style-type: none">• 15 kg de material de mina• Taladro percusión como sistema de agitación• Balde casero de 12 l que simula las tinajas utilizadas en el proceso a gran escala• Aspa para garantizar la agitación	<ul style="list-style-type: none">• Área en piso de 1x1 m²• Canaleta alrededor del área para recolectar el lixiviado• 60 kg de material de mina, proveniente del proceso de trituración• Plástico calibre 10 para impermeabilizar y asegurar que no haya filtración al suelo y la canaleta• Capa de arena y gravilla para permitir la filtración de lixiviado• Caneca de 50 l para la solución del riego de la pila• Regadera para simular el sistema de riego de la pila• Tela dacrón para filtrar la solución

- Balde para recolectar el lixiviado

Fuente: Propia basada en teoría

Reactivos

Para poder realizar la extracción del mineral, en este caso oro, es indispensable la utilización de químicos, que durante el proceso se destacan por las funciones que cumplen, las cuales son variadas y dependen del proceso en el que actúan, principalmente funcionan como colectores y facilitan la extracción.

Los químicos especificados en la tabla 2, fueron utilizados tanto para el sistema de cianuración por agitación directa como para el sistema de lixiviación por pilas.

Tabla 2. Reactivos Utilizados en los Procesos

Reactivos	Descripción
Cianuro	Pureza al 98%, en briquetas
Zinc	Alta Pureza, en polvo gris
Cal	Calidad de 83%, en polvo
Acetato de Plomo	Calidad técnica, terrones blancos a pardo

Fuente: Propia

Preparación de las muestras: se utilizó material proveniente de una mina de explotación subterránea, de la misma zona, en una cantidad de 16 kg para el sistema de cianuración directa y 60 Kg para el sistema de lixiviación por pilas, respectivamente.

El material de la mina se pasó por el proceso de trituración, para reducir el tamaño de las partículas, a un tamaño alrededor del rango de 1/2" – 3/8". Esta operación se hizo con el objetivo de aumentar el grado de liberación de los minerales de interés al incrementar el área superficial disponible para reacción química (Bustamante, 2009). El equipo utilizado para esta reducción es propiedad de la planta de benéfico San Bartolo y es conocida como trituradora o canchadora, es una maquina industrial diseñada para reducir el tamaño de las partículas de una sustancia, mediante el uso de la fuerza, para romper en una serie de piezas de volumen más pequeñas o compactas puede procesar rocas u otras materias sólidas.

Este proceso de trituración se realizó en un tiempo mínimo de 10 min, se llevó al sitio donde se realizaron los ensayos. Este tiempo se considera corto dado que la trituradora tiene una capacidad de procesar hasta 2 toneladas de material proveniente de la mina cada tres horas.

Determinación de cantidad de reactivos usados en los ensayos: los ensayos en los dos sistemas (cianuración por agitación y de lixiviación por pilas) tuvieron una dosificación diferente de reactivos. La cantidad a agregar de reactivos fueron cantidades que aplica la planta San Bartolo con el método cianuración por agitación. Se usaron estas mismas cantidades en el método de método cianuración por agitación en el laboratorio para tener un punto de referencia y comparar los resultados con sus procesos. Además, de observar si se presenta un cambio o alteración en el procesos variando estas cantidades

Preparación de solución: para las pila de lixiviación se preparó una solución de cianuro, que consistió en agregar 2.5 Kg de cianuro a una caneca de 50 l de agua y se diluyó, esta solución se utilizó para el riego de la pila durante los 20 días. El cual se realizó por medio de una regadora para simular el sistema de riego cada 30 min, por 10 horas al día.

Preparación del material de mina para la pila de lixiviación: se realizó un lavado de la mina antes de ubicar el material de mina en la base de la pila de lixiviación, el cual consistió en colocar los 60 kg de mina en un tanque con agua de 100 l y 1kg de cal mediante agitación manual por 30 min, para obtener un pH entre 6.5 y 7 deseado, posteriormente se dejó decantar y escurrir el agua durante 24 h, para luego pasar a ser depositado en la pila.

Descripción de los Montajes Realizados para los Sistemas

- **Proceso de cianuración**

Para la elaboración de los tres ensayos de este sistema se utilizaron 3 canecas plásticas con una capacidad de 12 L, 15 Kg de material de mina, 24 L de agua, un aspa, cianuro, cal, zinc y acetato de plomo.

este proceso se realizó tres veces en días diferentes bajo las mismas condiciones, las cuales fueron la misma cantidad de material de mina, los mismos tiempos para el desarrollo del proceso, materiales y la manipulación de las mismas personas, para

evitar cualquier alteración, a excepción de los químicos que se usaron en porciones diferentes. Se efectuó siguiendo los siguientes pasos

Paso 1. Se llenó la caneca hasta una capacidad de 8 L de agua con 5 kg de mina, la cual antes paso por el proceso de trituración, y se le agrego acetato de plomo y cal.

Paso 2. Se inició el proceso de agitación con un tiempo estimado entre 20 y 40 min, con el fin de que se diera una homogenización.

Paso 3. Pasado este tiempo se comenzó con la adicción de cianuro, continuando bajo agitación por un tiempo máximo de 4 h aproximadamente.

Paso 4. Culminado las 4 h se pasó a la precipitación durante 40 min, esto con el fin de que se precipitara el material que contiene oro, acompañado de la adicción de zinc.

Paso 5. Pasado este tiempo se efectuó la recolección del material resultante conocido vulgarmente como precipitado. Esta se hace por medio de un filtro de tela dacrom.

Paso 6. El material precipitado se llevó al laboratorio para ser analizado

- **Proceso de lixiviación por pilas**

Para la construcción de la pila se tuvieron en cuenta consideraciones como el clima por lo cual se realizó dentro de las instalaciones de la planta, bajo techo para evitar contacto con agua lluvias o con el sol y disminuir la evaporación, además que su construcción contara con una pendiente mínima del 5% para garantizar que el lixiviado pudiera drenar. A continuación se describe paso a paso la construcción de la pila

Paso 1. Se realizó en tierra una base de 1 m x1 m² con una pendiente del 5 %.

Paso 2. Alrededor de la base se construyó un canal o zanja de 10 cm de profundidad por 10 cm de ancho para recolectar y transportar el lixiviado que se genera, este cae a un balde.

Paso 3. La base y canal se impermeabilizo con un plástico calibre 10 para garantizar que no se presentara infiltración al suelo de los químicos utilizados.

Paso 4. En cima de la base se agregó una capa de arena y grava materiales siendo los más comunes y que permitieron que se diera una filtración y mejor drenaje.

Paso 5. Se agregaron 60 Kg de material de mina que previamente había pasado por la trituración y análisis de laboratorio, se colocó encima de las capas filtrantes de manera uniforme.

Paso 6. Se agregó la solución de cianuro con una regadera, ya que no se cuenta con un sistema de bombeo, cada 30 min durante 10 h al día, por un tiempo mínimo de 20 días, y se pudo presentar lixiviación.

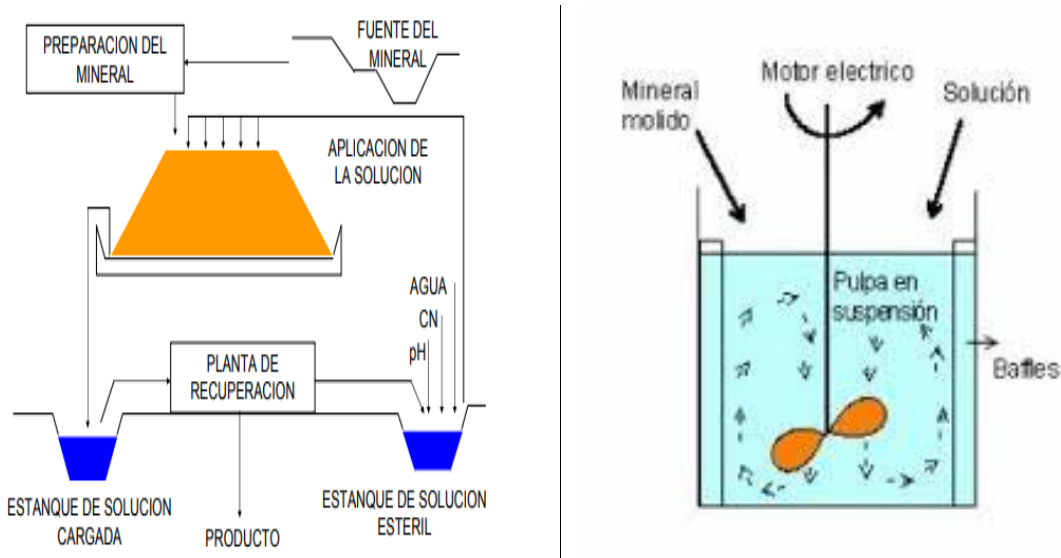
Paso 7. Se recolectó el lixiviado generado, se le agregó 50 g zinc y se dejó precipitar por 1 h.

Paso 8. El precipitado que se formó se filtró con filtro de tela Dacrom.

Paso 9. El material precipitado se llevó al laboratorio para ser analizado

Al final de los ensayos de los dos procesos se determinó de acuerdo a los análisis de laboratorio cuál de los dos presenta una mayor eficiencia en la recuperación de oro, cual requiere menor cantidad de insumos y genera menos vertimientos de agua residual.

En la figura 2. Se puede observar los ensayos construidos.



Fuente: *Fundamento de Hidrometalurgia 2015*

Figura 2. Sistema de lixiviación por pilas y cianuración por agitación

Para realizar la comparación de la eficiencia de ambos procesos se tuvo como referencia las actividades, procesos usos de químicos e instalaciones ya estandarizados de la planta de beneficio san Bartolo, para lo cual proporciono la siguiente información

- **Consumo de agua**

Según información suministrada por la planta de beneficio San Bartolo, se estima que en un proceso de cianuración se consumen alrededor de 2.4 m³ de agua para el proceso de cianuración y puede ser mayor dependiendo de la capacidad de las tinas, las características del material de mina y la cantidad de veces que se pueda realizar en la semana las cuales pueden ser aproximadamente 2 veces para un consumo total de 4.8 m³ semanales.

- **Consumo de Químicos**

Para cada 3 toneladas de mina que se procesa en el sistema de cianuración se utilizan las siguientes cantidades

- 12 kg de Cianuro a lo que corresponde que por cada kilogramo de mina se utilizan 0.4 gr de cianuro.
- 15 kg de Cal, a lo que corresponde que por cada kilogramo de mina se utilizan 5 gr de Cal.
- 1.5 kg de Zinc, esta adición se hace 3 veces en diferentes tiempos a lo que corresponde 4.5 kg de Zinc por cada 3 toneladas.
- 3 g de Acetato de plomo, diluidos en agua al 10%

Se debe tener en cuenta que estas cantidades pueden presentar una variación ya sea aumentar o disminuir en el proceso que depende especialmente de las características que presente el material de mina a procesar o de los valores que arrojen los análisis de laboratorio realizados para determinar qué cantidad de oro se está recuperando en el proceso.

Pruebas de laboratorio para analizar contenido de oro: estas pruebas se realizaron en dos momentos de la implementación de los sistemas, al inicio y al final: la primera fue para el material proveniente de la mina para determinar qué cantidad en gramos contiene de oro, y al final del proceso para determinar qué cantidad de oro se logró recuperar en los dos sistemas.

Estas pruebas fueron realizadas directamente en el laboratorio de la planta de beneficio San Bartolo:

- **Prueba de laboratorio al inicio del proceso**

Para la toma de la muestra se seleccionaron al azar dos costales que pesaron aproximadamente 50 Kg cada uno, para un total de 100 kg. A estos dos costales se les realizó el proceso de trituración y luego se mezclaron, para luego sacar un kilogramo y llevarlo al laboratorio donde fue analizada mediante un equipo electrónico portátil para detectar oro (Au) in situ o en el laboratorio.

No se menciona nombre ni referencia del equipo por política de la planta San Bartolo. El encargado del análisis de las muestras en el laboratorio indico que el funcionamiento del equipo es simple, con solo acercar al material de mina a la pantalla de lectura del equipo este estudia el material a través de análisis por fluorescencia de rayos X ofrece datos geoquímicos en tiempo real y de alta precisión para efectuar caracterizaciones rápidas de múltiples elementos en muestras de suelos, rocas y minerales.

Este equipo permite efectuar mediciones rápidas y útiles de varias muestras asociadas a la exploración de oro (Au), en las minas, en los laboratorios mineros y en los productos refinados de oro. El resultado de esta prueba inicial sirvo tanto para los tres ensayos de cianuración por agitación como para la lixiviación en pilas dado que se realizaron con el mismo material de mina.

- **Prueba de laboratorio al final de los procesos**

Terminados los procesos de cianuración directa y lixiviación por pilas del material resultante, que se conoce como precipitado, fueron llevados al laboratorio de la planta donde se analizaron cada uno por separado mediante el método Ensayos al fuego el cual es un proceso estándar utilizado en el sector para obtener concentraciones de grupos de elemento platino y oro (Antonio Ballester, 2000). y así obtener la cantidad de oro recuperada por cada ensayo de cianuración y el ensayo de lixiviación por pilas.

El método consiste en producir una fusión de la muestra usando reactivos y fundentes adecuados para obtener dos fases líquidas: una escoria constituida principalmente por

silicatos complejos y una fase metálica constituida por plomo, el cual colecta los metales de interés (Au y Ag); que posteriormente serán sometidos a Análisis Químico o determinación gravimétrica, según condiciones finales de la muestra. (Antonio Ballester, 2000).

Según el encargado del laboratorio los pasos realizados para este análisis fueron:

- Preparación de las muestras
- Preparación de fundentes, se pesa y adiciona el fundente, para luego homogenizarla con la muestra
- Adición de Nitrato de plata al 12 %
- Adición de Bórax
- Fundición; con el fin de obtener las fases líquidas y metálicas, a una temperatura de 1000°C y tiempo de 60 - 90min.
- Separación de escoria, donde se obtiene el regulo de plomo que contiene los metales de interés oro (Au), para luego darles forma de cubos (para facilitar su manipulación); usando un martillo.
- Se realiza Copelación; se calientan las copelas por 60min, para luego fundir el regulo de plomo, con el fin de eliminar el Pb (a 920°C en 45min). El 98.5% de Pb queda atrapada en las copelas y el 1.5% se elimina en los gases.
- Se obtiene el botón de oro.
- Laminación del botón (debe hacerse con bastante cuidado con el fin de no romper ni contaminar la muestra).
- Liberación del Au; en crisoles de porcelana sobre una plancha de calentamiento a 120°C, adicionando ácido nítrico al 15%.
- Lavado; se realiza con agua cuatro o cinco veces, para obtener el Au libre de la solución de nitrato de Ag, para luego pasar al calcinado para darle el color característico introduciéndola en una mufla por 1min a 700°C.
- Diluir el Au; usando agua regia (según concentración de Au y volumen final al cual se va a aforar), sobre panchas de calentamiento a 80°C por 1 min.
- Trasvase, aforo, adición de ácido clorhídrico al 10% y agitación en tubos de ensayo; para el análisis químico en el espectrómetro de absorción atómica, el cual determinará la cantidad de oro presente en la muestra en g/ton

- **Identificación mediante revisión bibliográfica, los principales contaminantes y afectaciones que genera el proceso de cianuración en el recurso hídrico.**

Para este objetivo se realizó una revisión bibliográfica de empresas de minería aurífera o entidades que apliquen este mismo proceso y caractericen sus vertimientos mediante la normatividad vigente en el país, en este caso la resolución 0631 de 2015, por la cual se establecen parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Especialmente se comparara con los parámetros contenidos en el capítulo 6, sector y actividades de minería, artículo 10 el cual especifica los parámetros fisicoquímicos a monitorear.

- **Determinación costos técnico económicos de los métodos**

Para determinar los costos se revisó las facturas de compra de los productos proporcionadas por la planta de beneficio San Bartolo, realizando un inventario de los productos químicos a usar y sacando el costo por Kg consumido ejemplo: una caneca de cianuro con presentación de 50 kg tiene un valor de 975, 549 \$ este valor se dividirá por los 50 kg obteniendo el valor real de cada kg consumido.

Durante todo el proceso se pesó y documento el uso de cualquier químico y al final se realizó una suma del consumo de cada proceso y se hicieron los cálculos y sumas correspondientes para determinar el costo de los químicos.

De igual manera se tuvo en cuenta las horas laborales y gastos energéticos, información que fue proporcionadas por la administración y la parte contable de la planta de beneficio San Bartolo.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante la aplicación de la metodología que se desarrolló para lograr los tres objetivos propuestos se obtuvieron los siguientes resultados

Análisis de laboratorio

- **Al principio del proceso**

Los análisis realizados para iniciar el proceso y determinar la cantidad de oro que contenía el material de mina utilizado arrojaron un resultado de 5.71 g de oro/ton. Este resultado también sirvió para el proceso de lixiviación por pilas ya que se utilizó del mismo material.

- **Al final del proceso**

Para las muestras del proceso de cianuración por agitación y lixiviación por pilas que se realizaron al finalizar los procesos se obtuvieron los siguientes resultados que se observan en la Tabla 3 en cuanto a la cantidad de oro que se logró recuperar.

Tabla 3. Gramos de oro Recuperados por Proceso

Proceso	Cantidad en Gramos			
	Cianuro (g)	zinc(g)	Cal(g)	Acetato de plomo(g)
Cianuración por Agitación				
• Ensayo 1	400	10.3	700	3
• Ensayo 2	600	18.2	700	4.1
• Ensayo 3	1050	23	700	3.8
Lixiviación por pilas	2.500	50	1000	2
Proceso	Gramos oro recuperado / tonelada			%
Cianuración por Agitación				
• Ensayo 1		0.98		17.1
• Ensayo 2		0.72		12.6
• Ensayo 3		1.08		18.9
Lixiviación por pilas		2.51		43.9

Fuente: Propia

Efectuando el balance entre los dos sistemas y comparando los resultados de los análisis de laboratorio donde se evidencia que el proceso de lixiviación por pilas en comparación de los ensayos de cianuración por agitación presenta una mayor eficiencia en cuanto a recuperación de oro. Este resultado debe ser a que el mineral estuvo más tiempo en contacto con la solución de cianuro y de igual forma tuvo más

tiempo para una colección de oro por parte del cianuro. También se considera que cuando el mineral paso por el proceso de trituración favoreció la liberación del mineral.

La diferencias que se encontraron en cuanto los porcentajes de recuperación tanto en los tres ensayo de cianuración por agitación directa como lixiviación por pilas se debe a la variación del uso de reactivos como se observa en la tabla ---entre mayor uso de reactivo mayor porcentaje de recuperación se presenta.

Cantidad de químicos usados

En la tabla 4 se puede apreciar la cantidad de químicos que se agregó a cada proceso.

Tabla 3. Consumo de Reactivos

Proceso	Cantidad en Gramos			
	Cianuro (g)	zinc(g)	Cal(g)	Acetato de plomo(g)
Cianuración por Agitación				
• Ensayo 1	400	10.3	700	3
• Ensayo 2	600	18.2	700	4.1
• Ensayo 3	1050	23	700	3.8
Lixiviación por pilas	2.500	50	1000	2

Fuente: Propia

Según la Tabla 4 donde se reporta el consumo de químicos se puede observar que la cantidad de cianuro utilizado se considera alta para los dos procesos, teniendo como referencia que en el proceso de la Planta San Bartolo por cada 3 toneladas de mina se utilizan 12 kg de cianuro en un proceso ya estandarizado, a lo que corresponde que por cada kilogramo de mina se utilizan 0.4 gr de cianuro y en los ensayos se utilizó una cantidad mayor. En el proceso de lixiviación por pilas se evidencio el mayor consumo de reactivos esto se debe a que al momento de determinar las cantidades se tuvo en cuenta que el material de mina no paso por ningún proceso como generalmente se hace en el proceso actual a gran escala, que se utiliza material que ya paso por el proceso de molienda, flotación y cianuración por agitación este ya viene con determina cantidad reactivos en los procesos mencionados.

Estas diferencias se pueden observar a mayor detalle en la Tabla 5 donde se realiza un comparación del consumo de químicos de la planta San Bartolo versus los procesos realizados en este trabajo.

Tabla 4. Comparación consumo de Reactivos Planta San Bartolo Vs Ensayos de Procesos

Proceso	Gramos de químico consumido / por kg de Mina			
	Cianuro	Zinc	Cal	Acetato de plomo (I)
Planta de Beneficio San Bartolo	0.4	1.5	5	0.01
Cianuración por Agitación				
• Ensayo 1	0.08	0.02	140	0,6
• Ensayo 2	0.12	0.03	140	0.8
• Ensayo 3	0.21	0.04	140	0.7
Lixiviación por pilas	41.6	0.83	16.6	0.03

Fuente: Propia

Los dos sistemas no se consideran eficientes en cuanto el uso de químicos, teniendo como referencia la planta de beneficio San Bartolo el uso de reactivos se incrementa el doble en los ensayos de cianuración por agitación directa y el triple en lixiviación por pilas.

Esto se debe a que el material utilizado para lo proceso no paso por procesos posteriores como la flotación donde se hace una separación del mineral para realizarse la cianuración como se efectúa en la planta de beneficio san Bartolo (ver figura 1). Para el proceso de lixiviación por pila por lo general se utilizan materiales que provienen de realizar todo el proceso realizado en la planta hasta la cianuración el cual contiene trazas de los reactivos usados y necesitaría menos cantidad al momento de pasar al proceso de las pilas. (Ministerio de Energía y Minas 2001)

- **Consumo de agua por proceso**

Según información suministrada por la planta de beneficio San Bartolo, se estima que en un proceso de cianuración se consumen alrededor de 2.4 m³ de agua por cada 3 ton y puede ser mayor dependiendo de la capacidad de las tinajas, las características del material de mina y la cantidad de veces que se pueda realizar en la semana. En los ensayos por los dos métodos no fue notorio el consumo de agua, por ser un sistema a escala, solo se utilizó aproximadamente de 180 litro. Al terminar no se generó vertimientos de agua ni contaminación al suelo, dado que los reactivos y material usado en los ensayos, la planta de beneficio decidió reincorporarlo a su proceso productivo nuevamente.

El sistema de lixiviación no presentó mayor rendimiento en cuanto consumo de químicos, pero sí presentó una mayor eficiencia de recuperación de oro de 43.9 para lixiviación por pilas y 18.9 para cianuración por agitación). Este rendimiento lleva a la posibilidad de llegar a ser implementado por la planta de benéfico San Bartolo, puesto que se identificaron variables que son muy positivas tanto para la productividad de la planta como para el medio ambiente las cuales se especifican a continuación

- **Consumo se agua**

El sistema de lixiviación por pilas requiere de una cantidad mínima de agua en comparación con la cianuración por agitación. El uso del agua es exclusivamente para el sistema de riego que se implemente, por lo general se utiliza el sistema de riego por goteo. Esta cantidad de agua con la que se inicie siempre será la misma puesto que es recirculada durante el tiempo de vida útil de la pila, que puede durar de meses hasta años. Esto implica que solo se considera agregar agua a la solución usada cada que se decida aumentar el tamaño de la pila. Por otro lado, no se genera un vertimiento puntual a fuentes de agua. Además, cuando se decida terminar con la pila, la solución puede ser usada para el comienzo de otra. Según procesos realizados a gran escala el agua agregada para mojar la pila debe estar entre (0.05 a 0.08 m³/ton), y estando en proceso de lixiviación y compensar las pérdidas por evaporación, no debe sobrepasar los 1.5 m³/ton (Grimaldos, 2018), se debe tener en cuenta que la cantidad de agua depende de las toneladas que se construya la pila, pero como ya se menciona es recirculada.

- **Flexibilidad operativa**

El sistema de lixiviación por pilas permite procesos que pueden durar desde días hasta años, lo que depende del tamaño de la pila. Adicionalmente, no requiere de cuidado constante, solo de un operario o persona que esté pendiente que el sistema de bombeo funcione y garantice que la pila tenga una constante irrigación de solución. Además, que recolecte el lixiviado para continuar con el proceso de precipitación y fundición. Es de tener en cuenta que todo depende del tamaño de la pila (MINMINAS, 2015)

- **Beneficios ambientales:**

Actualmente, los lodos que se generan en la minería después de un proceso de amalgamación, son considerados como estériles y se consideran uno de los grandes problemas de la minería no son controlados. Estos lodos terminan siendo escombros en

lugares no adecuados o vertido en ríos. Esa clase de manejo puede generar enfermedades a largo plazo en las personas cercanas a estos ríos y los escombros amontonados pueden generar problemas de estabilidad por deslizamiento o volcamiento (Casas Efraín et al, 2017).

Botaderos de material estéril.

Se considera el material estéril, todo material sin valor económico para permitir la explotación del mineral útil o que sus concentraciones en contenidos ya sea de oro o plata son bajos.

Este botadero debe formarse de manera planificada y ordenada, de modo que el llenado del desnivel topográfico resulte en una obra estable. Bajo ningún motivo el botadero de estéril puede construirse en un área de escurrimiento natural de aguas, a menos que se realicen obras de encauzamiento de éstas. (Guía Operación Minera, 2016).

Dado a las condiciones que se requiere para realizar la estructura de un pila se pudo analizar que este método es muy similar a la construcción de un relleno sanitario, se deben considerar algunos de los parámetros de construcción y de igual marea se debe contar con un plan de cierre y abandono.

A continuación se muestra a través de la Tabla 7 las similitudes que presenta la construcción y operación de un relleno sanitario con una pila de cianuración por lixiviación, que se basa en el decreto 1784 de 2017, por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1077 de 2015 en lo relativo con las actividades complementarias de tratamiento y disposición final de residuos sólidos en el servicio público de aseo y el Decreto 838 de 2005, por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones, que pertenecen a la normatividad colombiana y la Guía Ambiental para Proyectos de Lixiviación en Pilas del Ministerio de Energía y Minas de Perú país que aplica este sistema a gran escala y con más experiencia en el sector minero.

Tabla 5. Comparacion Sistema de Lixiviacion Por pilas Y Relleno

Lixiviación en pilas Guía Ambiental	Decreto 1784 de 2017	Decreto 838 de 2005
El diseño de las pilas y capas impermeabilizadas requieren la combinación de varios factores		

influyentes. Entre éstos se incluye el tipo y origen del mineral, metalurgia, lixiaviabilidad, topografía del lugar, características geotécnicas y geohidrológicas del lugar, así como el clima del mismo

Frecuentemente, se cuenta con pocas alternativas posibles para la instalación de pilas debido a impedimentos tales como distancia de transporte, estado del terreno o topografía.

Generalmente, se coloca una capa de material permeable con o sin tuberías de drenaje directamente sobre el revestimiento antes de la construcción de pilas. El propósito de esta capa es proporcionar drenaje y también actuar como protección para el revestimiento durante la construcción de pilas

Las soluciones de lixiviación cargadas se recolectan de las pilas a través del sistema de tuberías y/o una capa de recolección de lixiviado de alta permeabilidad. Con frecuencia se utilizan las tuberías de drenaje perforadas que se encuentran en la capa de drenaje, ubicadas en la parte superior de la capa impermeabilizada, para promover la recolección de soluciones

Caracterización de la Ganga	Estudio Hidrogeológico:	Distancias a cuerpos hídricos.
El objetivo de la caracterización de la ganga	Determinación y evaluación de las condiciones del agua	Este criterio establece la relación que tendrá el área en

<p>consiste en identificar los constituyentes que puedan ocasionar impactos en la calidad del agua durante las operaciones y luego de la clausura si se descargan desde la instalación.</p>	<p>subsuperficial y subterránea en condiciones normales y extremas más probables en el periodo de diseño de análisis del proyecto, con especial descripción de las características hidráulicas (porosidad, permeabilidad, transitividad, coeficiente de almacenamiento) y niveles freáticos.</p>	<p>la que se efectuará la disposición final de residuos, respecto a las fuentes hídricas permanentes y superficiales existentes en la zona.</p>
<p>Vida útil y su capacidad</p>	<p>Se deberá monitorear la cantidad de residuos y la capacidad remanente de la celda de disposición en términos volumétricos, a fin de determinar la vida útil real del relleno sanitario.</p>	<p>Capacidad. El área donde se ubicará el relleno sanitario, debe ser suficiente para permitir que la vida útil de este sea compatible con la producción proyectada de residuos sólidos a disponer en el mismo, considerando tanto el municipio receptor como aquellos ubicados dentro de un radio de 60 kilómetros del mismo.</p>
<p>Durante la localización de las instalaciones, es importante identificar y evaluar los peligros geológicos (tales como desprendimiento de tierras, fallas activas, etc.) que podrían tener un impacto sobre la integridad de las estructuras e instalaciones que contienen las soluciones del proceso.</p>	<p>Estudios Geológicos y Geomorfológicos: Levantamiento geológico, utilizando la base cartográfica del estudio topográfico, interpretación de fotografías aéreas y sensores remotos, exploración del subsuelo (directa e indirecta) y ensayos in situ y de laboratorio. En cuanto a geomorfología, se deberán identificar las unidades geomorfológicas, registrando la cartografía y morfo dinámica basada en análisis multitemporal</p>	<p>Condiciones del suelo y topografía. Este criterio determina las facilidades de construcción, operación y trabajabilidad en el área en que se efectuará dicha disposición final, mediante la tecnología de relleno sanitario</p>
<p>Frecuentemente, se cuenta con pocas alternativas posibles para la instalación de pilas debido a impedimentos tales como distancia de transporte, estado del terreno o topografía. Las bases de las pilas deberán ser capaces de soportar las cargas aplicadas</p>		<p>Accesibilidad vial. Este criterio corresponde a la facilidad y economía que la persona prestadora del servicio público de aseo en el componente de recolección y transporte, tiene para llevar los residuos sólidos al área en que se efectuará dicha</p>

por las mismas, no sólo en términos de estabilidad, sino también en términos de asentamientos diferenciales a través de las pilas. Los asentamientos diferenciales pueden afectar negativamente el drenaje de las pilas y dañar el revestimiento y la capa impermeabilizada

disposición final, mediante la tecnología de relleno sanitario.

Según el Ministerio de Minas la perturbación general de la superficie durante las operaciones se puede reducir efectuando un cierre o una rehabilitación concurrente, de ser esto factible el plan de abandono que se debe tener en cuenta al momento de clausurar la pila, se ve como una gran oportunidad de recuperación ambiental en las partes donde se realiza esta actividad.

Esto se identificó como una gran oportunidad dado que este plan de cierre y clausura busca reducir al máximo la generación de contaminantes, tener un adecuado monitoreo y de ser posible recuperar el suelo con plantas que se adapten. Motivo por el cual se considera el proceso de lixiviación por pilas se puede ser un sistema amigable con el medio ambiente y puede ayudar a reducir el problema de botaderos a cielo abiertos de material estéril que se generan por las plantas de benéfico auríferas.

Este material estéril puede ser acumulado con un control y vigilancia constante, y realizarse el proceso de lixiviación por pilas por determinado tiempo y generar ingresos económicos para el sostenimiento del mismo y al momento de su clausura sería de manera segura y propendiendo a la recuperación de los suelos, aguas y la parte paisajística.

Lo cual se puede comparar con el decreto 838 de 2005 de rellenos sanitarios que establece, Cierre y Clausura con el fin de garantizar la disponibilidad de recursos económicos para realizar el cierre, clausura, pos clausura y posterior monitoreo de los rellenos sanitarios, toda 'persona prestadora del servicio público de aseo en la actividad de disposición final de' residuos sólidos, deberá constituir y mantener una provisión, que garantice la disponibilidad permanente de las sumas acumuladas durante el periodo de operación del relleno sanitario, necesarias para construir las obras de clausura y pos clausura requeridas y llevar a cabo el monitoreo por para dichas etapas. La forma de determinar los valores a provisionar será establecida por la Comisión de Regulación de

Agua Potable y Saneamiento Básico en la metodología tarifaria del servicio público de aseo.

Desventajas

De igual manera se encontraron tres desventajas que se deben tener en cuenta al momento de implementar el sistema de lixiviación por pilas y que fueron analizadas en conjunto con los encargados de la planta de beneficio San Bartolo las cuales fueron:

- Es un proceso aplicable para generar ganancias a largo plazo, dado al tiempo que puede durar el proceso comparado con los sistemas de cianuración por agitación que se puede realizar en días.
- Se debe contar con una gran extensión de terreno para la implementación de la pila, y que cumpla con los parámetros establecidos, de lo contrario sería rentable solo para el pequeño minero.
- Colombia cuenta con una variabilidad climática y en sectores donde se presente alta precipitación sería un problema las aguas de escorrentía y la cantidad que podría absorber la pila

Identificación mediante revisión bibliográfica, los principales contaminantes y afectaciones que genera el proceso de cianuración en el recurso hídrico.

Se halló que los parámetros contenidos en la resolución 0631 de 2015, Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. En su capítulo VI sector actividades de minería se encuentran especificados los tipos de contaminantes fisicoquímicos que se pueden encontrar en un agua residual provenientes de las actividades de extracción mineras en este caso de minería aurífera, estos se especifican en la tabla 7

Tabla 6. Parametros medidos en un Vertimiento de Agua Residual

PARAMETROS	UNIDADES
pH	Unidades de pH
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O ₂
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂

Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L O ₂
Sólidos sedimentables (SSED)	ml/L
Aceites y grasas	mg/L
Fenoles	mg/L
Sustancias activas en azul de metileno (SAAM)	mg/L
Compuestos de fosforo	
Ortofosfatos (P- PO ₄ ³⁻)	mg/L
Fosforo total (P)	mg/L
Compuestos de Nitrógeno	
Nitratos (N-NO ₃ -)	mg/L
Nitritos (N-NO ₂ -)	mg/L
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃)	mg/L
Nitrógeno total (N)	mg/L
Iones	
Cianuro total (CN ⁻)	mg/L
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L
Sulfatos (so ₄ ²⁻)	mg/L
Sulfuros (s ²⁻)	mg/L
Metales y Metaloides	
Arsénico (As)	mg/L
Cadmio (Cd)	mg/L
cinc (Zn)	mg/L
Cobre (Cu)	mg/L
Cromo (Cr)	mg/L
Hierro (fe)	mg/L
Mercurio (Hg)	mg/L
Níquel (Ni)	mg/L
Plata (Ag)	mg/L
Plomo (Pb)	mg/L
Otros parámetros para análisis y reporte	
Acidez total	mg/L CaCO ₃
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃
Dureza total	mg/L CaCO ₃
Color real (medidas de absorbancia en las siguientes longitudes de onda 436 nm, 525nm y 620 nm)	m ⁻¹

Fuente: Propia

Se considera que los parámetros mencionados son los principales en ocasionar una afectación al sistema hídrico, además de otros efectos representativos como el aumento de sedimentos, la disminución de caudales y la alteración del curso.

Según el instituto Alexander Humboldt Una segunda vía de contaminación del agua es a través de los procesos mineros cuando se utiliza durante las operaciones o beneficios mineros. Esta agua al entrar en contacto con los minerales extraídos, los estériles o los relaves terminan convirtiéndose en drenajes ácidos, y en algunos casos como en los procesos del oro termina contaminada con mercurio y/o cianuro.

Determinar costos técnico económicos de los métodos.

Para la obtención del total de los costos generados en los dos procesos se tuvo en cuenta información contable proporcionada por la planta de beneficio san Bartolo, a través de sus facturas de compras de insumos y costos que manejan al interior de su proceso. Esta información se puede observar a continuación

Tabla 7. Costos Reactivos

Químico	Valor unidad \$	Formula química o componentes	Descripción o presentación
Cianuro	975.549	KCN	Caneca de 50 kg, pureza al 98%, en briquetas.
Zinc	440.520	Zn	Caneca 25 kg, alta pureza calidad PWG, en polvo gris.
Cal	21.600	CaO	Bulto 25 kg, calidad de 83%, en polvo
Acetato de Plomo	299.990	Pb(CH ₃ COO) ₂ ·3H ₂ O	Paquete 25 kg, calidad técnica, terrones blancos a pardo

Fuente: Propia

- **Costo servicios públicos**

Consumo mensual de energía: el servicio es prestado por la empresa de servicios públicos de Segovia S A E S P. Esta empresa fue constituida como SOCIEDAD ANONIMA y se dedica a Instalaciones eléctricas. REGISTRANDO UN CONSUMO mensual de aproximadamente \$ 2.500.00, valor que puede variar de acuerdo a las horas laboradas

Consumo de agua: la planta cuenta con un permiso de Concesión de Agua subterránea otorgado por Corantioquia, agua la cual es utilizada para los procesos que se realizan.

Valor de un día laborado: 80.000 \$

Con la información proporcionada se determinaron los costos de los sistemas implementados y así tener una idea de cuánto podría ser un aproximado a escala real

En las Tablas 9 y 10 se observa el total de costos generados por sistemas y así tener una idea de cuánto podría ser un aproximado a escala real

Tabla 8. Costos Proceso de Cianuración

Cianuración por Agitación	Proceso 1	Proceso 2	Proceso 3	Valor \$ unitario (gr)	Total \$
Cianuro (gr)	400	600	1050	1.600	32,800
Zinc (gr)	10.3	18.2	23	2,200	113,000
Acetato de plomo (gr)	3	4.1	3.8	1,000	10,900
Cal (gr)	700	700	700	100	2.100
				Total \$	156,700

Fuente: Propia

Tabla 9. Costos Procesos de Lixiviación Por Pilas

Lixiviación por Pilas	Gramos	Valor unitario\$ (g)	Total \$
Cianuro	2.500	1.600	40.000
Zinc	50	2.200	11.000
Acetato de plomo	2	1.000	2.000
Cal	1.000	100	1.000
		Total \$	54.000

Fuente: Propia

Como se puede observar en la Tabla 9 y 10 en cuanto el consumo de los químicos se refiere es más rentable y económico realizar lixiviación por pilas que por cianuración por agitación. Esta última requiere de un consumo mayor de cianuro, es de tener en cuenta que estas cantidades pueden variar de acuerdo a las características que presente la mina o material a procesar.

El sistema de lixiviación por pilas a gran escala, siempre será más económico que el sistema por agitación. sin embargo, al analizar los datos proporcionados por la planta san Bartolo y la opinión de sus encargados, estos sistemas llevados a una escala real teniendo en cuenta los demás gastos como trabajadores, mantenimiento, adecuación de instalaciones, gastos energéticos, topografía del municipio, condiciones del clima y la cantidad de toneladas que puede procesar una planta de beneficio , se considera que el sistema de cianuración por agitación directa es más económico dado que se ven resultados en menor tiempo en el caso de la planta a los 4 días , lo que indica tratar más toneladas de mina y recuperar más oro en menos tiempo, según el administrador de la planta de beneficio san Bartolo el mantenimiento que genera una pila al tener que ser monitoreada durante el día y el gasto energético de la bomba que realiza el riego a la pila , el uso de maquinaria pesada se puede invertir en la compra de insumos y demás gastos para cianuración por agitación.

8. IMPACTO ESPERADO

La minería es considerada uno de los sectores de producción más importantes del país, en especial la minería aurífera ha desarrollado procesos que se vienen efectuando hace muchos años adquiriendo algún tipo de mejora tanto tecnológica como fisicoquímica, implementada por personas empíricas o que se han dedicado a esta actividad de manera ancestral sin dejar atrás la utilización de la tecnología que tiene grandes aportes a los procesos y a la reducción de contaminantes al medio ambiente.

La habilidad del cianuro para disolver minerales de oro ha sido conocida desde principios del siglo 19, pero no fue comercialmente explotado hasta finales de 1980 (MinMinas, 1995). Actualmente la cianuración en sus varias formas continúa siendo el método dominante para la lixiviación del oro, por ende es de gran importancia para el sector ambiental por los efectos que causa tanto en suelos como en el recurso hídrico por los vertimientos de agua residual que se genera y la deposición de material estéril. Con estos últimos efectos mencionados el impacto esperado por el proyecto fue muy positivo para el sector ambiental ya que contribuye a generar una posible solución al tratamiento de material estéril generado y sus vertimientos puesto que las pilas al ser un sistema que funciona de manera similar a un relleno sanitario por su construcción, trabajo, plan de abandono y seguimiento, al culminar el proceso productivo de las pilas y ejecutar el debido plan de cierre y abandono se puede garantizar que no se va a causar un impacto negativo a la zona donde se encuentra, esto posibilita que se pueda generar el crecimiento de malezas y arbustos que permitan un cubrimiento vegetal de la pila y con un constante monitoreo por un determinado tiempo garantizar que se deje de generar lixiviado.

De contarse con el área disponible, que cumpla con determinadas características geológicas e hídricas, además con la unión de las diferentes plantas de beneficio y diferentes entidades como la administración del Municipio de Segovia, la Asociación de Entablos Mineros de Segovia, la entidad ambiental en este caso Corantioquia y demás empresas privadas se podría desarrollar un proyecto para la implementación de estas pilas.

Estas aportarían dos beneficios muy importantes como tener un lugar donde se puedan depositar todo el material resultante de las plantas y que a un se le puede realizar extracción de minerales y generar ganancias económicas para el mantenimiento y operación de las mismas, en segundo lugar se estaría contribuyendo a que estos materiales no se sigan depositando en suelos y fuentes hídricas generando una contaminación fisicoquímica y deteriorando la calidad del agua y por último tendría un impacto visual y paisajístico en la zona al darles un adecuado mantenimiento, de igual

manera se generen empleos a la comunidad y estimular a las empresas a realizar actividades de este tipo que aporten al medio ambiente y califiquen sus procesos como sustentables e amigables con el medio ambiente.

9. CONCLUSIONES

- El sistema de lixiviación por pilas presenta una mayor eficiencia que el sistemas de cianuración por agitación directa, lo que lleva a una eficiencia de recuperación del 43.9 % en cuanto al uso de químicos y consumo se refiere. Además, generan impactos menos negativos al medio ambiente al contar con un sistema de recirculación de agua de la solución cianurada, no se generan vertimientos puntuales a las fuentes hídricas y puede contribuir a que los materiales resultantes de los procesos en las plantas de beneficio tengan un sitio de disposición final y así evitar que sean arrojados a botaderos a cielo abierto y fuentes hídricas, además de contribuir al impacto visual y paisajísticos que estos generan.
- Mediante la revisión bibliográfica se lograron definir por medio de la resolución 0631 de 2015 cuales son los principales contaminantes que podemos encontrar en el agua donde se realizan vertimientos puntuales de los procesos mineros y así saber qué calidad presentan estas aguas y que afectos pueden causar en la flora, fauna y salud humana. Se considera que estos vertimientos son una segunda vía de contaminación del agua es a través de los procesos mineros cuando se utiliza durante las operaciones o beneficios mineros. Esta agua al entrar en contacto con los minerales extraídos, los estériles que presentan contenido de cianuro, mercurio entre otros generan altas cargas de contaminantes y mayor impacto al recurso hídrico.
- Se estableció que el sistema de lixiviación por pilas es más eficiente en cuanto recuperación de oro que el sistema de cianuración directa por agitación, pero dado las condiciones que presenta el Municipio de Segovia y la producción del entable San Bartolo para San Bartolo es más rentable realizar el proceso de cianuración, dado que no cuentan con la extensión de terreno que se requiere, la maquinaria pesada, el transporte del mineral y demás condiciones que faciliten la operación de la pila insitu, la plantas de beneficio afirma que mientras busca cumplir con estas condiciones invierten en los reactivos y las actividades de operación que conlleva el proceso de cianuración obteniendo ganancias a corto

plazo, no obstante de llegar a realizarse un proyecto en conjunto con todas las plantas del municipio y entidades a cargo estarían dispuestos a participar.

- En general el desarrollo del proyecto dio resultados positivos que aportan a implementar el sistema de lixiviación por pilas como una solución ambiental a la problemática que se genera con la disposición de material estéril resultante del proceso en fuentes hídricas y en el suelo reduciendo así la contaminación, puesto que por ahora la planta de benéfico San Bartolo no cuenta con las condiciones para implementar el sistema a escala industrial aunque exista un porcentaje mayor de eficiencia en cuanto recuperación de oro lo que representa un potencial para la empresa.

10. RECOMENDACIONES FUTURAS

Se recomienda formular un proyecto donde participen las plantas de beneficio y las entidades al respecto como la Alcaldía y la Asociación de Entables del Municipio de Segovia, para implementar el sistema de lixiviación por pilas con dos fines, el primero darle solución a la problemática de disposición de residuos de mina generados por todas las plantas y minas del Municipio, para reducir la contaminación en suelos y el recurso hídrico, recuperación ambiental con en el ensayo de diferentes técnicas paisajistas que mejoren también el impacto visual teniendo un lugar donde se les puede hacer un adecuado tratamiento y en segundo lugar realizando el proceso de cianuración se obtendrían los ingresos económicos para ejecutar las diferentes actividades en el lugar generando empleo y un proyecto sostenible.

Por último se sugiere que la planta de Beneficio San Bartolo con su buena voluntad de contribuir al mejoramiento ambiental y desarrollo de sus procesos sea el pionero en presentar el proyecto además de ser el ejecutor y encargado de las actividades que allí se generarían.

REFERENCIAS

Bibliografía

- Antonio Ballester, I. F. (2000). *Metalurgia Extrativa. Vol 1. Síntesis.*
- Grimaldos, R. B. (2018). *Cianuración por percolación o lixiviación en pilas.* Peru .
- Herbert, J. H. (2006). *Metos de Minería Cielo Abierto* . Madrid : Universidad Politécnica de Madrid.
- Mark J. Logsdon, K. H. (1995). Manejo del Cianuro en la extracción del Oro . *CONSEJO INTERNACIONAL DE METALES Y MEDIO AMBIENTE* .
- Miguel Casallas, J. A. (2015). Programa de la minería del oro en Colombia . *Universidad EAN, 20-27.*
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA - MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE
AMBIENTE, M. D.-M. (2002). *Guía Minero-Ambiental 2. Explotación.* Bogotá, Colombia .
- Efraín Casadiego Quintero, A. G. (2017). Manejo estratégico de la producción de residuos estériles de minería sustentable, utilizando prácticas mineras ecoeficientes en Colombia. *Revista Investigación Agraria y Ambiental, 108-118.*
- Energía, M. d. (1995). Procesamiento de Minerales Auríferos . *Técnicas para la extracción aurífera procesos de Cianuración y Amalgamación* . República de Colombia .
- Fundación, F. N. (2013). *LA NORMATIVA MINERA EN PAÍSES DE AMÉRICA LATINA* . Bogotá, Colombia .
- Grimaldos, R. B. (2018). *Cianuración por percolación o lixiviación en pilas.* Peru .
- Mark J. Logsdon, K. H. (1995). Manejo del Cianuro en la extracción del Oro . *CONSEJO INTERNACIONAL DE METALES Y MEDIO AMBIENTE* .
- Minas, M. d. (2020). Guía Ambiental Para Proyectos de Lixiviación en Pilas . Lima , Perú.

