

# **PLANTEAMIENTO DE UNA TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA PARA EL PROCESO DE BENEFICIO DE ORO SIN MERCURIO**

## **APPROACH OF A TECHNOLOGY OF CLEAN PRODUCTION FOR GOLD BENEFICIATION PROCESS WITHOUT MERCURY**

SOR LILIANA CAICEDO GONZÁLEZ

Ingeniera de Producción Biotecnológica  
Especialización en Planeación ambiental y manejo integral de los recursos naturales  
Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, D.C., Colombia

### **RESUMEN**

El presente artículo se realizó con base a una metodología de revisión de fuentes bibliográficas con el fin de recopilar información del estado actual de la minería en Colombia, siendo esta, una problemática de gran importancia ya que genera conflictos socio-ambientales pero sobre todo impactos negativos sobre el medio ambiente y los recursos naturales. El Ministerio de Minas y Energía, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible con la Fiscalía determinan la magnitud de la ilegalidad en el país, y las condiciones generales en las cuales se está adelantando la actividad minera. Como objetivo general del artículo, se plantea el uso de una tecnología limpia en el proceso de beneficio de oro con la correspondiente reducción o eliminación de mercurio, la cual consiste en intervenir eficazmente los procesos de separación, trituración, molienda, lavado y/o concentración, cianuración, fundición y otras operaciones a que se somete el material extraído, para reducir principalmente el alto consumo de sustancias tóxicas como el mercurio

**Palabras clave:** Producción limpia, minería, planta beneficio, amalgamación, cianuración, mercurio, trituración, molienda.

### **ABSTRACT**

This paper was done following a methodology of reviewing bibliographic sources, in order to gather information related to the current setting of mining in Colombia, being an issue of great importance, since it generates socio-environmental conflicts, but primarily negative impacts on the environment and natural resources. The Ministry of Mines and Energy, the Ministry of Environment and Sustainable Development and the Prosecutor's Office establish both the magnitude of illegality in the country and general conditions under which mining is being carried out. As a general objective of this article, it is set out the use of a clean technology in the gold beneficiation process

with its own mercury reduction or elimination, through making the different stages (separation, crushing, grinding, washing and or concentration, cyaniding and melting) more efficient to reduce the high intake of toxic substances such as mercury.

**Key words:** Cleaner production, mining, plant benefit, amalgamation, cyanide, mercury, crushing, grinding.

## INTRODUCCIÓN

La minería en Colombia ha tenido un auge en los últimos años ya que ha sido un sector de importancia por que brinda oportunidades de desarrollo económico, al incrementar su oferta debido al alto precio en los mercados de todo el mundo; pero para las entidades encargadas de su regulación su preocupación se centra en el panorama de temáticas ambientales al conocer estudios sobre los impactos ambientales relacionados con los procesos de explotación y extracción del oro.

Sin embargo, los impactos ambientales ocasionados no solo por la explotación sino por la extracción del mineral artesanalmente no se han contemplado por que a pesar que las autoridades competentes han aumentado la reglamentación que ha venido aplicándose en las regiones donde se han encontrado la práctica de la minería ilegal, siguen implementándose técnicas que no contribuyen al desarrollo sostenible ni a la gestión ambiental de los recursos naturales. Como consecuencias ambientales de las operaciones de extracción se pueden mencionar contaminación de aire, agua, suelo, alteración de ecosistemas, contaminación acústica, y sobre todo problemas de salud pública al personal que trabaja día a día en actividades de extracción.

Por otro lado, es importante destacar el alto grado de contaminación de las fuentes hídricas y la afectación a la salud pública por el uso indiscriminado de sustancias tóxicas (mercurio), como consecuencia de la proliferación no planificada y operación con tecnologías inadecuadas de las plantas de beneficio de oro en las regiones dedicadas a esta labor.

Frente a esta problemática, las corporaciones autónomas regionales con otras entidades como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Minas y Energía, han optado por crear convenios donde se afronta y se adopta la implementación de tecnologías de producción más limpia como una herramienta eficaz para el desarrollo sostenible; su fin es el de incorporar prácticas de producción que conduzca a la armonía entre el hombre y la naturaleza. En ella se describe un

acercamiento preventivo a la gestión ambiental, en un amplio término que abarca lo que algunos denominan ecoeficiencia, minimización de residuos, prevención de la contaminación, o productividad verde. Por tal motivo se busca que esta herramienta ayude a mejorar en cada una de las etapas de beneficio de oro en la explotación aurífera, con el objetivo de eliminar o disminuir el uso de sustancias tóxicas como el mercurio y por ende evitar que estos residuos contaminen las fuentes hídricas cercanas o causen graves daños al ecosistema y a la salud pública.

## 1. MATERIALES Y METODOS

La metodología empleada para el desarrollo del artículo se constituyó de las siguientes fases:

**FASE I: Revisión bibliográfica:** Se realizaron consultas de bibliografía de fuentes primarias y secundarias sobre la implementación de tecnologías limpias en cada una de las etapas que comprenden los procesos de extracción de oro. Adicionalmente, conocer el estado actual de la utilización de tecnologías limpias en Colombia en la minería aurífera; también se realizaron consultas electrónicas sobre el tema; a partir de las cuales se refuerzan las bases conceptuales para el diseño de la propuesta para reducir el uso de mercurio en el proceso de extracción del mineral.

**FASE II: Clasificación y análisis de las fuentes bibliográficas:** Toda la información obtenida durante la revisión bibliográfica se filtró, se clasificó y por último se analizó, como punto de partida para el cumplimiento del objetivo principal del artículo. Entre estas consultas se destacaron:

- Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC). Distrito Minero de Buenos aires. Cauca. Contaminación por mercurio y otros. Distrito minero de Buenos aires, cauca. Apoyo a proyectos de producción más limpia en minería para los distritos mineros del cauca.
- Ministerio de minas y energía. Centro provincial de gestión minero agroempresarial del alto Nordeste antioqueño. Convenio GSA No. 75. Introducción de tecnologías limpias que permitan la eliminación o reducción del consumo de mercurio en procesos de beneficio de oro.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Hacia una producción más limpia en la minería. Programa para minimizar la contaminación generada por la minería en el sur y occidente colombiano.
- Ministerio de Minas y Energía. Unidad de planeación minero energética. Producción más limpia en la minería del oro en Colombia, mercurio, cianuro y otras sustancias.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diagnóstico y proyecciones de la gestión minero ambiental para las regiones auríferas de Colombia.

**FASE III: Propuesta de la tecnología de producción más limpia:** De acuerdo a los datos y la información obtenida se elabora la propuesta y/o alternativas para el proceso de beneficio del oro con el marco de referencia consultado.

## 2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 2.1 PROBLEMÁTICA SOCIO-AMBIENTAL EN COLOMBIA

Las revisiones bibliográficas realizadas evidencian que actualmente la explotación minera de oro en nuestro país, es una de las problemáticas socio ambientales de mayor interés en Colombia, ya que la explotación de este mineral se realiza ilegalmente, causando daños no solo a la economía sino al medio ambiente, a los recursos naturales y a la sociedad, sin permitir el crecimiento de las regiones al crearse conflictos y problemas de orden público.

Al realizarse explotaciones ilegales del recurso mineral, ocasiona alteraciones en el medio ambiente afectando la fauna, flora, calidad del medio atmosférico, agua y suelo, siendo estos, recursos necesarios para la vida y un desarrollo sostenible. Por ello, el gobierno nacional está formulando un esquema organizacional y funcional para lograr un propósito de renovación y enfrentar la problemática sectorial, evitando la generación de pasivos ambientales.

Durante el proceso de beneficio del oro se emplean sustancias tóxicas como mercurio y cianuro que producen daños no solo a la salud de las personas que practican estas actividades si no también un daño al medio ambiente, sin tener en cuenta, la disposición y control de estas sustancias y sin la implementación de tecnologías más limpias en cada uno de los procesos para mitigar y reducir la contaminación. Por lo anterior, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, consiente de la importancia económica de la pequeña y mediana minería, pero a su vez preocupado por los impactos negativos tradicionalmente generados por ésta, viene gestando esquemas de desarrollo sostenible para la minería aurífera artesanal del país, a través de la introducción de modelos de producción más limpia en la misma [2].

El Estado colombiano desde el año 2007 viene trabajando la problemática de la explotación ilícita de minerales bajo el marco del Convenio N° 027 entre el Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; hoy en día, Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, Fiscalía, Procuraduría e Ingeominas hoy Agencia Nacional Minera, cuyo propósito es el control integral a la

ilegalidad. El Ministerio de Minas y Energía, como apoyo a las acciones adelantadas dentro del Convenio 027, realizó un Censo Minero, en dos etapas, con el objetivo principal de determinar la magnitud de la ilegalidad en el país, y las condiciones generales en las cuales se está adelantando la actividad minera. El primer ciclo, ejecutado en el 2010, recolectó información de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Norte de Santander, Cauca, Huila y Tolima. En Antioquia y Bolívar esta actividad se realizó a través de las Gobernaciones. En la segunda etapa, en el 2011, se está recolectando información de los departamentos restantes del país [3].

## 2.2 PROCESO DE BENEFICIO DE ORO. CONDICIONES TRADICIONALES.

En general la extracción del metal valioso (oro) se realiza iniciando con la trituración (muchas veces de forma manual) y para la molienda se utilizan molinos de pisones o, en algunos casos, de bolas. Para recuperar el oro grueso el material se hace pasar por un canalón (canaleta) cubierto por paños fabricados en la región; posteriormente la pulpa se pasa por mesas concentradoras después de la cual los concentrados obtenidos son llevados a procesos de amalgamación en barriles. La amalgama, conocida como pelusa, es quemada al aire libre sin ningún tipo de protección. El residuo final de la amalgamación suele ser incorporado al proceso de cianuración por percolación. Por su parte el mercurio recuperado en batea es almacenado y reutilizado sin ningún proceso de reactivación. Las colas (residuos) obtenidas, después de removerse los finos en pozos de decantación y adicionar cal, se introducen por 20 días en tinas de cianuración por percolación, dando como resultado procesos globales de recuperación de oro menores al 50% [4].

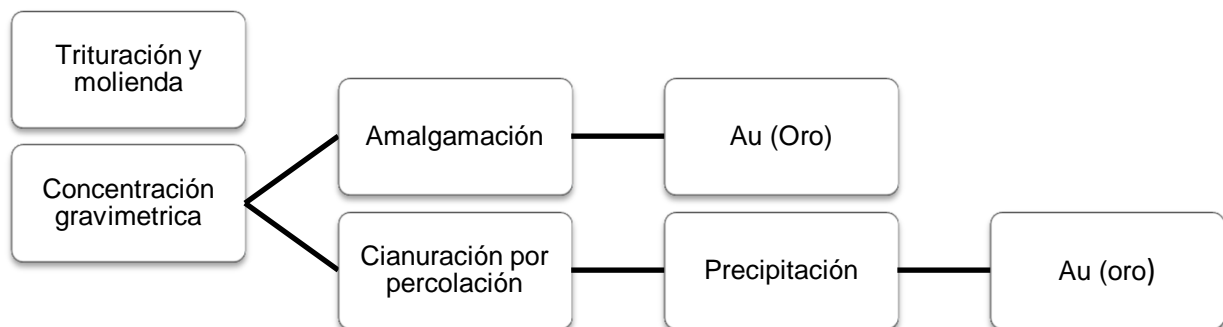


Figura 1. Fases básicas del proceso tradicional de la minería

Fuente: Incorporación de tecnologías limpias para beneficiar minerales auríferos en la pequeña minería de vetas y californias buscando reducir vertimientos de mercurio y cianuro.

A continuación se definen y explican cada uno de los procesos desarrollados en el beneficio de oro.

**2.2.1. Trituración y molienda:** Se emplean molinos de pisones o de barril para realizar la trituración del material extraído de la mina de oro, en esta etapa de beneficio se generan impactos ambientales como ruido, generación de polvo y gases, altos consumos de agua, combustible y energía. Durante la molienda se logra que el material de la mina quede polvo para luego proceder a lavarlo y extraer el mineral (oro).

**2.2.2. Concentración gravimétrica:** Son métodos de separación de minerales que utilizan el principio de la gravedad. Esta concentración es realizada en canalones, bateas y en los tanques de sedimentación y en esta etapa se producen la concentración de metales pesados como el mercurio, es decir, el oro se concentra con las partículas más pesadas en la batea, y el agua se lleva las partículas más livianas.

**2.2.3. Amalgamación:** Proceso donde se recupera el oro por medio de la aleación de dos metales, el mercurio y el oro. En este proceso se añade mercurio a todo el mineral durante la trituración, molienda y lavado. Éste es el uso más contaminante del mercurio.

**2.2.4. Cianuración:** El material grueso se recoge, se almacena y se conduce a la planta de cianuración donde se precipitan y se obtiene el oro contenido en el material grueso logrando la recuperación del mineral.

### 2.3 PROBLEMAS EN EL BENEFICIO DE ORO.

Con base en la bibliografía consultada se enuncian algunas de las variables y problemas como consecuencias de las tecnologías inadecuadas empleadas en el proceso de beneficio del oro.

VARIABLES	PROBLEMAS
Entables	Construidos cerca de ríos y quebradas
Campamentos y casetas	Se guardan explosivos, equipos, herramientas e insumos, y se localizan cerca de los entables.
Montaje de minas	Constituida por tolvas, trituradoras, molinos y clasificadores que separan el material grueso del fino, este material pasa a los canalones, construidos en madera o metal con fondos de mallas y trampas donde se agrega sin control, cantidades de mercurio para amalgamar el oro fino.
Canalones	Los residuos o colas de los canalones que contienen cantidades de mercurio y oro, van directamente a quebradas y ríos cercanos.

VARIABLES	PROBLEMAS
Fundición y refinación	Se calienta la amalgama, conocido comúnmente como quema de la amalgama, se hace en un recipiente al aire libre, produciendo contaminación a la atmosfera por vapor de mercurio afectando la salud del personal y de la comunidad aledaña.
Amalgamación	La amalgamación puede llevarse en flujo abierto en la trituración, la molienda y la concentración en canaletas y planchas amalgamadoras, o en circuito cerrado en el lavado del material procesado y concentrados, en barriles o tambores amalgamadores; esta combinación de procesos es de cuidado y puede ser sumamente dañina para el medio ambiente por producir elevadas cantidades de harina de mercurio que permanecen en las colas.
El mercurio	El mercurio llega al agua ya sea por: trituración o molienda defectuosa, uso indiscriminado de mercurio en canalones, lavado de barriles (cocos amalgamadores) y precipitación de la lluvia con vapores de mercurio, lodos residuales contaminados, relavado de arenas amalgamadas y cianuración de arenas residuales de amalgamación; llega a los suelos por mala disposición de arenas amalgamadas, y relavado de arenas amalgamadas; al aire llega por quema de amalgamas sin ninguna técnica o de manera defectuosa, almacenamiento y manipulación incorrecta el mercurio y fugas de vapor en barriles.
El cianuro	La cianuración o lixiviación utilizada sin ningún control, las personas pueden exponerse al cianuro y generalmente tiene efectos sobre el sistema nervioso central y puede causar la muerte. El envenenamiento causado por cianuro depende de la cantidad y el tiempo que esté expuesta la persona.

Tabla 1. Problemas en el beneficio del oro.

Fuente: Ministerio de minas y energía. Unidad de planeación minero energética.

## 2.4 IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES EN LAS PLANTAS DE BENEFICIO.

De acuerdo a las fuentes bibliográficas se determinaron los principales componentes e impactos ambientales generados en las diferentes actividades desarrolladas en las plantas de beneficio de oro. En la tabla 2, se contempla la matriz de identificación de impactos ambientales con sus componentes, subcomponentes y elementos.

COMPONENTE AMBIENTAL	SUB-COMPONENTE AMBIENTAL	ELEMENTO	IMPACTO AMBIENTAL	MATRIZ DE IDENTIFICACION DE IMPACTOS AMBIENTALES EN PLANTAS DE BENEFICIO									
				ETAPAS									
				Trituración del material	Molienda del mineral	Lodos y concentrados	Amalgamación	Cianuración	Lavado de arenas de cianuración	Disposición de arenas de cianuración	Vertimientos del proceso de cianuración	Precipitación del oro	Función de precipitados
ABIÓTICO	GEOSFÉRICO	GEOFORMAS	Alteración topográfica										
			Generación de procesos erosivos										
			Generación de fenómenos de remoción en masa										
		SUELO	Riesgo de contaminación										
	PAISAJE	Cambios en la calidad visual											
	HÍDRICO	AGUA SUPERFICIAL	Modificación red drenaje.										
			Contaminación por vertidos										
	ATMOSFÉRICO	CALIDAD DEL AIRE	Cambio en la concentración de gases en el aire										
			Cambio en la concentración del material particulado										
Cambio en los niveles de presión sonora													
BIÓTICO	ECOSISTEMA TERRESTRE	COBERTURA VEGETAL	Cambio en la abundancia y diversidad de la cobertura vegetal										
		FAUNA SILVESTRE	Cambios en la composición de la fauna / alteración de hábitats.										
SOCIECONÓMICO	ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS Y CULTURALES	ASPECTOS POBLACIONALES	Cambio en la dinámica poblacional (migración)										
		ECONOMIA	Cambio en la oferta y demanda de bienes y servicios										
			Beneficio económico y ecológico										
			Cambio en la dinámica del empleo										
CONDICIONES DE VIDA/SALUD E HIGIENE AMBIENTAL	Riesgo de accidentes												

Tabla 2. Matriz de identificación de impactos ambientales en las plantas de beneficio.

Fuente: Autor.



## **2.5 PROBLEMÁTICA DE LAS PLANTAS DE BENEFICIO DEL PAÍS.**

En las regiones donde se practica las actividades de beneficio del oro en el país, cuentan con procesos tradicionales los cuales están integrados por una serie de operaciones y procesos que definen como se extrae el mineral. Básicamente y como se mencionó anteriormente, las operaciones son: trituración y molienda del mineral explotado, concentración gravimétrica y separación del material valioso conocido como limpieza o lavado, filtración, cianuración y fundición, los cuales generan impactos negativos al ambiente por la utilización de mercurio en la amalgamación y cianuro para la recuperación.

De acuerdo a la formulación de una iniciativa de producción más limpia dirigido al sector de los metales preciosos en pequeña escala en Colombia, realizada por la Unidad de planeación minero energética, se clasificaron a las regiones de Antioquia (Nordeste Antioqueño), Nariño, Santander, Chocó y Sur de Bolívar como provincias de minería a escala pequeña de los metales preciosos. En este diagnóstico, se evidenció que en todas las provincias los procesos y operaciones de beneficio de oro, comprenden las etapas básicas para la extracción, permitiendo unificar los procesos e identificar las ventajas y desventajas de cada uno, relacionados con la fase de producción y la generación de impactos ambientales. En la tabla 3, se consideran las prácticas de beneficio de cada una de las provincias.

De acuerdo a lo anterior, los procesos que comprenden las actividades de beneficio de oro, demandan consumos altos de energía, agua, sustancias tóxicas como el mercurio, además efectos nocivos para la salud de los trabajadores. Para entender mejor los anteriores consumos se dan a conocer los balances calculados en un entable del Municipio de Puerto Berrio, estudio realizado con el convenio GSA No.75.

ACTIVIDAD		ANTIOQUIA		CHOCO	NARIÑO		SUR DE BOLIVAR		SANTANDER
		Nordeste antioqueño	Bajo Cauca		Zona andina	Barbacoas	Serranía	Piedemonte	California/Vetas
Producción de mineral	Oro	X	x	X	X	X	X	X	Oro
	Plata	x	X	x	X	X	X	X	Plata
	Platino			X		X			Platino
	Recuperación integral minerales asociados	Baja recuperación		Baja recuperación	Baja recuperación		Baja recuperación		Baja recuperación
Prácticas de beneficio	Artesanal (tradicional/informal/supervivencia)		Canalones largos, mediante la amalgamación del oro con mercurio	Canalón en tierra, Canaletas de madera y/o metálicas	Molinos y canalones				Bateas y matracas
	Minería a pequeña escala	Trituración primaria, canalones	Canaletas de madera y/o metálicas,	Canaletas de madera y/o metálicas,	Trituración primaria, canalones	Canaletas de madera y/o metálicas,	Trituración primaria, canalones	Canaletas de madera y/o metálicas,	Trituración primaria, canalones
	Semimecanizadas	En pequeñas plantas mineralúrgicas, llamadas también entables	Canaletas de madera y/o metálicas, concentradores gravimétricos	Canaletas de madera y/o metálicas, concentradores gravimétricos	Trituradoras, canalones con embayetado de piso rico en mercurio, barriles amalgamadores y cianuración por percolación	Canaletas de madera y/o metálicas, concentradores gravimétricos	Trituración primaria, canalones, mesas concentradoras, trituración secundaria, molinos amalgamadores, cianuración por percolación	Canaletas de madera y/o metálicas, concentradores gravimétricos	Trituración primaria, canalones, mesas concentradoras, trituración secundaria, molinos amalgamadores, cianuración por percolación
	Recuperación mineral	Perdida de metales preciosos	Perdida de metales preciosos	Perdida de metales preciosos	Perdida de metales preciosos	Perdida de metales preciosos	Perdida de metales preciosos	Perdida de metales preciosos	Perdida de metales preciosos
Beneficio	Directa	Entables en casas							Entables en casas
	Intermediación	Si							

Tabla 3. Características principales de la minería de los metales preciosos en pequeña escala.

Fuente: [5]

## 2.5.1. Proceso de beneficio de oro del entable, Municipio de Puerto Berrio.

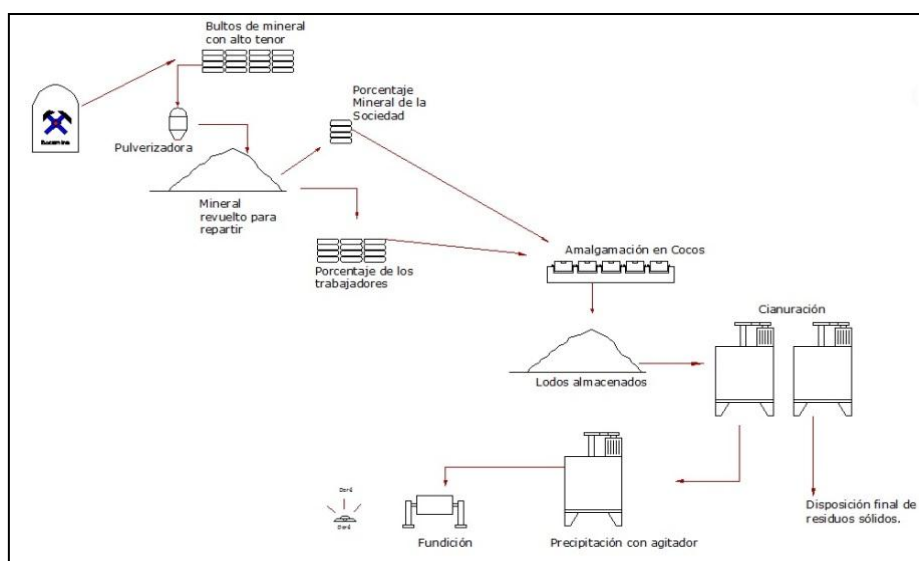


Figura 2. Descripción de los procesos típicos en un entable.

Fuente: Convenio GSA No. 75

Se extraen aproximadamente 1600 kilos de mineral y son trasladados al entable donde se les realizara el proceso de extracción, iniciando la trituración con un equipo conocido como trituradora de mandíbulas, el mineral triturado se almacena en una zona donde se homogeniza dos veces y se empaican en bultos. En el entable donde se extraerá el oro, cuenta con unos equipos llamados cocos donde se muele y amalgama el mineral, a los cuales se les adiciona mercurio con agua y luego se muele por un tiempo aproximado de 3 horas con aproximadamente 5 molidas. Cumplido este tiempo, se detienen los cocos y el mineral molido será dispuesto en un balde donde se les realiza el proceso de deslode (lavado con abundante agua). En este proceso, el consumo de agua es extremadamente alto, ya que el deslode consiste en adicionar altos volúmenes de agua mientras el operario agita en forma circular donde las partículas pocas densas se rebozan y las pesadas permanecen en el balde, donde la mayor parte del mercurio y la amalgama (mezcla de oro y mercurio) quedan contenidos en el recipiente (balde), y el restante se dispone en una batea donde se termina la separación de la amalgama y se recupera otra parte del mercurio empleado.

Para el proceso de amalgamación se emplean barriles con una dimensión de 50 cm x 50 cm, con una capacidad de 50 kg de mineral, donde se efectúa la molienda para terminar de romper el mineral en un tiempo de tres horas. Durante las tres primeras horas no se adiciona mercurio, las doce horas restantes sí; al finalizar cada molienda se obtiene una amalgama en un tiempo total de 15 horas procesando por coco 45 kg

de mineral, obteniendo un promedio de 1,7 Toneladas/día, implementando 38 cocos amalgamadores.

Para cuantificar los consumos de energía, agua y mercurio, se evaluaron las variables más importantes de operación durante dos procesos; comprendiendo la estimación promedio de la potencia demandada para girar un barril la cual es de 0.657 Kw, dato obtenido a partir del seguimiento a la potencia demandada en un set de cocos cuyo motor hacia girar 7 cocos de 14 disponibles. El valor de potencia total para mover estos 7 cocos fue de 4,6 Kw. Con el valor 0,657 Kw y con la capacidad de carga de cada barril (45 Kg) se estima el consumo de energía del proceso y el consumo de energía por tonelada de mineral procesado.

- **Consumo de energía**

Proceso	Tiempo (h)	Mineral Procesado (ton)	Número de barriles por proceso	Energía Kw-Hora por mineral procesado	Energía (Kw-h /ton)
1	15	0,65	34	22.3	33.9
2	15	0,70	36	23,7	36.0
<b>Promedio</b>	<b>15</b>	<b>0,68</b>	<b>35</b>	<b>23,0</b>	<b>34.9</b>

Tabla 4. Consumo de energía..

Fuente: Autor

El consumo de energía para procesar una tonelada de mineral es en promedio unos 34,9 Kw-h, de acuerdo a lo consignado en la tabla 4. Para obtener el cálculo de la energía consumida se tuvieron en cuenta los datos aportados por los equipos como intensidad de corriente medida en amperios, el voltaje y el cálculo y conversión de la potencia a Kw.

- **Consumo de mercurio**

Cuando el mineral es sometido al proceso de amalgamación, este consiste en adicionar cierta cantidad de mercurio para que este se fusione con el oro, obteniéndose unos botones compuestos por un 50% de mercurio y un 50 % de oro y plata. A continuación se relaciona el consumo total de mercurio en las cinco moliendas de las que consta el proceso.

MOLIENDA	MERCURIO (g)	MERCURIO RECUPERADO (g)	MERCURIO CONSUMIDO (g)
1	0	0	0
2	590	490	100
3	440	390	50
4	470	430	40
5	300	360	-60 Remanente de las moliendas anteriores, por lo tanto no es el consumido en la quinta molienda. (Recuperado)
<b>TOTAL</b>	<b>1800</b>	<b>1670</b>	<b>130</b>

Tabla 5. Consumo de mercurio en las cinco moliendas.

Fuente: Autor

De acuerdo a la tabla 5, el mercurio consumido en las cinco moliendas es de 130 gramos para procesar 0,7 toneladas de mineral. Al finalizar las moliendas se obtienen amalgamas con un peso total de 91,48 gramos (dato calculado a partir del peso de cada amalgama obtenida), donde el 50% es mercurio y el otro 50% es oro y plata, es decir, el 50% de mercurio equivale a 45,74 gramos y el otro 50 % a 84,26 gramos que se retienen en los lodos y en el agua de lavado. Estos 45,74 gramos son para procesar 0,7 toneladas y para una tonelada de material se consumen 65,3 gramos de mercurio. El mercurio que se recupera es el exceso que se emplea en la amalgamación, pero realmente no existe un procedimiento para recuperar mercurio en la quema de la amalgama ó en los lodos producidos por la amalgamación.

- **Consumo de agua**

El agua consumida en los procesos de amalgamación cuando se procede a moler el mineral en los cocos y en el lavado o deslode del material es de 13,6 m<sup>3</sup>, consumo para procesar una tonelada de material. En la siguiente tabla se relaciona el consumo de agua en los dos procesos que comprendieron la cuantificación.

Molida	Proceso 1 (L)	Proceso 2 (L)	Promedio (L)
1	2818	3034	2926
2	2532	2813	2673

<b>Molida</b>	<b>Proceso 1 (L)</b>	<b>Proceso 2 (L)</b>	<b>Promedio (L)</b>
3	1305	1303	1305
4	1290	1261	1276
5	948	947	947
<b>TOTAL GENERAL</b>	8893	9359	9126
<b>Toneladas Procesadas</b>	0,65	0,7	0,68
<b>m<sup>3</sup> de Agua / Toneladas Procesadas</b>	<b>13,7</b>	<b>13,4</b>	<b>13,6</b>

Tabla 5. Relación de agua en el proceso de amalgamación  
Fuente: Convenio GSA No. 75

- **Mercurio en Residuos líquidos y sólidos (lodos).**

Para determinar el contenido de mercurio en residuos sólidos y líquidos se recolectaron muestras en los residuos correspondientes con los protocolos establecidos para este tipo de muestreo; muestras colectadas al final de cada molida y fueron analizadas en un laboratorio ambiental competente.

La muestra para determinar el contenido de mercurio total en lodos fue tomada cuando se realizó el último lavado del proceso de amalgamación.

<b>Descripción Muestra</b>	<b>Consumo de agua (L)</b>	<b>Valor Reportado de Mercurio Residuos líquidos (mg Hg/L)</b>	<b>Mercurio en líquidos (g)</b>	<b>Valor Reportado de Mercurio Residuos sólidos (ug Hg/g)</b>	<b>Mercurio en sólidos (g)</b>
Líquido en el primer Lavado	2813	0.653	1,84	-	-
Líquido en el segundo Lavado	1303	0.1.51	0,20	-	-
Líquido en el tercer Lavado	1261	0.1.56	0,20	-	-

Descripción Muestra	Consumo de agua (L)	Valor Reportado de Mercurio Residuos líquidos (mg Hg/L)	Mercurio en líquidos (g)	Valor Reportado de Mercurio Residuos sólidos (ug Hg/g)	Mercurio en sólidos (g)
Líquido en el cuarto Lavado	947	0.742	0,70	-	-
Lodos finales amalgamados	-	-	-	398	398 g/Tonelada

Tabla 6. Relación de mercurio en residuos sólidos y líquidos

Fuente: Convenio GSA No. 75

Con los consumos promedio de agua reportados en la Tabla 5 y las concentraciones de mercurio reportadas por el laboratorio se multiplican para obtener los gramos de mercurio contenidos en los residuos líquidos, los cuales lo integraron los cuatro lavados que se realizan después de la molienda del material.

De acuerdo a la tabla 6, el valor reportado en lodos es de 398 gramos/ton, por tanto en 0.7 toneladas de mineral procesado deberían contener 279 gramos de mercurio.

### Balance de Mercurio en el segundo seguimiento.

Con los datos recopilados se puede estimar como se distribuye el mercurio consumido para procesar 0.7 ton.

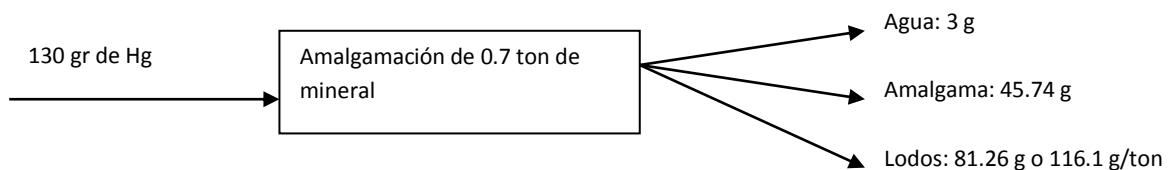


Figura 3. Balance de mercurio.

Fuente: Convenio GSA No. 75

Para instalar un sistema de recuperación de mercurio en lodos, se puede esperar un contenido de mercurio en lodos entre 116 g de Hg/ton (medido en el seguimiento y 398 g de Hg/ton (estimado con el reporte de ensayo). El tenor es muy variable porque depende mucho de los usuarios mineros y la antigüedad de los lodos. Para efectos de cálculo asumiremos un tenor de 200 g de Hg/ton para estimar los ingresos de un sistema de recuperación [6].

- **Cianuración.**

No se está realizando el proceso de cianuración debido a que no es rentable, sin embargo se recopiló la siguiente información:

<b>Materiales</b>	<b>Datos</b>
Toneladas mineral/proceso	9
Tiempo Lavado (horas)	192
Tiempo Cianuración (horas)	72
Relación líquido:sólido	2:1
Kg NaCN / proceso	9
Kg Zn en polvo / proceso	3
Concentración NaCN	3,2
pH	10,5
Trabajadores (Cantidad)	2
N° Lavados	15
Tinas de agitación	3
Tinas de precipitación	1

Tabla 7. Datos proceso de cianuración  
Fuente: Convenio GSA No. 75

## **2.6 PLANTEAMIENTO DE LA TECNOLOGIA DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA PARA EL PROCESO DE BENEFICIO DE ORO SIN MERCURIO.**

En el campo de la productividad aurífera se adoptan tecnologías de producción más limpia como alternativa para la reducción y mitigación de los impactos negativos generados por la explotación de los recursos naturales, por ello, es importante resaltar que con estas técnicas y tecnologías adecuadas permitirán el desarrollo minero en armonía con el medio ambiente enmarcado en un concepto de sostenibilidad ambiental.

Por lo tanto, a continuación se plantea la tecnología de producción más limpia para el proceso de beneficio de oro sin la utilización de mercurio, con la implementación de equipos que permiten una mejor y mayor recuperación del mineral mediante métodos gravimétricos.



ETAPA DE PROCESO	EQUIPO ACTUAL	PROPUESTA	CARACTERISTICAS
<b>TRITURACIÓN</b>	Trituradora de mandíbulas o quijadas	Zaranda Trituradora de quijadas Molino de martillos	Los equipos propuestos permitirán que el mineral se reduzca a 4 pulgadas de granulometría y finalizar con un diámetro de ¼ de pulgada al someterse a la molienda. Para esto se debe disponer de una tolva con una capacidad aproximada de 20 toneladas para contener el mineral el cual será sometido al proceso de trituración.
<b>MOLIENDA PRIMARIA</b>	Cocos o barriles	Molino de bolas Banda transportadora Tolva	El molino de bolas puede ser de 30"x60", el cual tiene la capacidad de moler 20 ton/día, cuando la granulometría es muy fina. El alimento debería ser controlado por medio de una banda transportadora y desde una compuerta para una tolva de finos, donde se puede graduar la cantidad de mineral que entra al molino. El objetivo de la etapa de molienda, es disminuir el tamaño de partícula de ¼ de pulgada a 300 µm (malla 48), donde se debe estar presentando la mayor parte de liberación de sulfuros. Para controlar el tamaño de partícula que sale del proceso de molienda, se recomienda instalar un clasificador Atkins, para recircular las partículas que no cumplen con el tamaño deseado.
<b>CONCENTRACIÓN PRIMARIA</b>	Valdes	Mesas vibratorias Canalón y trampa	Se separa mineral estéril de mineral útil, en un rango de partícula relativamente grueso (150µm a 300µm), con equipos de concentración gravimétrica al ser muy eficientes (mesas

ETAPA DE PROCESO	EQUIPO ACTUAL	PROPUESTA	CARACTERISTICAS
	<p>Contenedores</p> <p>Canecas</p>		<p>vibratorias y canalones). A la salida del clasificador Atkins, se puede instalar trampas para recuperar oro libre, estas pueden ser un canalón (sumidero para atrapar oro libre). Estas trampas se pueden hacer antes de alimentar otros equipos de concentración gravimétrica. El concentrado obtenido en esta etapa debe tener un buen contenido de oro libre, y con el uso de otra mesa y con batea, también se puede recuperar.</p>
<p><b>MOLIENDA SECUNDARIA</b></p>	<p>Cocos o barriles</p>	<p>Molino similar al primario</p> <p>Bomba de pulpas</p> <p>Hidrociclón</p>	<p>La molienda secundaria se puede realizar con otro molino similar al molino primario es decir 30"x60", es necesaria una bomba de pulpas y un hidrociclón para cerrar el circuito. El objetivo es reducir el mineral con un diametro igual a 75µm para que pueda llegar a la etapa de concentración secundaria (Flotación).</p>
<p><b>CONCENTRACIÓN SECUNDARIA</b></p>	<p>No cuenta con una etapa de concentración secundaria</p>	<p>Celda de flotación</p>	<p>El mineral molido a malla 200 puede ser flotado en dos celdas circulares de 1 ton/hora cada una.</p>
<p><b>REMOLIENDA</b></p>	<p>Cocos o barriles</p>	<p>Molino de bolas</p> <p>Bomba</p>	<p>Todo el concentrado debe molerse a un tamaño de partícula con un d80 igual 45µm (malla 325), con un molino de bolas de 3 pies x 3 pies, este molino puede funcionar en circuito cerrado con</p>

ETAPA DE PROCESO	EQUIPO ACTUAL	PROPUESTA	CARACTERISTICAS
		Hidrociclón	<p>otra bomba y otro hidrociclón. Se puede realizar una remolienda con solución de cianuro, para iniciar la lixiviación desde la remolienda. El sobre flujo del hidrociclón debe depositarse en unos tanques de sedimentación, para procurar separar el sólido del líquido. Para acelerar la sedimentación se necesita la ayuda de un floculante y un coagulante y un tanque con filtro para aclarar la solución rica, la cual puede pasar directamente al proceso de precipitación.</p>
<b>CIANURACIÓN, PRECIPITACIÓN Y FUNDICIÓN</b>	<p>Tinas de agitación</p> <p>Tinas de precipitación</p>	Horno basculante	<p>El proceso de cianuración se realiza con dos agitadores de 3 toneladas cada uno y un proceso semanal, se logra cianurar todo el concentrado recuperado de las etapas anteriores. La fundición es conveniente mejorarla con un horno basculante el cual es más seguro de operar.</p>

Tabla 8. Propuesta tecnología más limpia.

Fuente: Convenio GSA No. 75

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En su mayoría las plantas de beneficio de oro no cuentan con operaciones eficientes y menos contaminantes por lo que se ha evidenciado la necesidad de implementar técnicas y tecnologías limpias en cada una de las etapas que integran los procesos de extracción de oro, con el propósito de reducir y/o eliminar sustancias tóxicas como el mercurio y por consiguiente disminuir los impactos negativos al medio ambiente.
- La producción más limpia en los procesos de extracción de oro, deben asumirse como una prioridad y necesidad para el estado, ya que actualmente la minería aurífera se considera una de las actividades de importancia para el desarrollo del país, por lo tanto deben incorporarse estas tecnologías en los entables de pequeña y mediana escala para que el desarrollo de esta actividad sea más amigable con el medio ambiente.
- De acuerdo al balance de mercurio del entable del Municipio Puerto Berrio, el consumo de mercurio fue de 130 gramos para procesar 0.7 toneladas de material por día, de los cuales 3 gramos permanecen en el agua de lavado, 45,74 gramos en la amalgama y 81,26 gramos en los lodos.
- Los impactos ambientales generados por los procesos de beneficio del mineral se consideran de alta significancia ya que afectan todos los recursos de la naturaleza como agua, aire, fauna y flora. Igualmente inciden sobre la población tanto minera como comunidades aledañas al generar problemas de salud por el uso de sustancias como el mercurio. Entre los impactos ambientales negativos se destacan pérdida de biodiversidad, degradación de suelos, pérdida de zona arbórea y contaminación de fuentes hídricas.
- Se debe promover y sostener iniciativas de buenas prácticas para las actividades de beneficio de oro en la minería de mediana y pequeña escala, con la participación de entidades gubernamentales y autoridades ambientales.
- Se recomienda en los entables de beneficio de oro realizar un estudio de línea base donde se realice un diagnóstico técnico en cada una de las etapas, se revisen mediante un inventario los equipos que puedan ser mejorados o intervenidos que permitan finalmente la reducción de sustancias tóxicas como mercurio en la recuperación del mineral.

- Se recomienda que mediante campañas informativas y educativas se capacite a la población minera respecto a la problemática ambiental y de salud pública que causan las inadecuadas prácticas en sus procesos de beneficio.
- Se recomienda realizar una caracterización de las variables en los procesos de beneficio de oro, antes y después de la implementación de la tecnología de producción más limpia, con el fin de poder establecer comparaciones en los consumos de agua, energía y reducción de mercurio.
- Se recomienda mejorar respecto a la gestión de los vertimientos, haciendo más eficiente el proceso de sedimentación incorporando el uso si es necesario de floculantes que garanticen que el agua que se vierte en los cuerpos de agua contengan la mínima cantidad de sólidos.

## **BIBLIOGRAFÍA.**

[1]CINEP. Programa por la Paz. Informe especial. Minería, conflictos sociales y violación de derechos humanos en Colombia.(2012). En: [www.cinep.org.co/index.php?option=com\\_docman&task](http://www.cinep.org.co/index.php?option=com_docman&task).

[2] Ministerio del medio ambiente. Hacia una producción más limpia en la minería.

[3] Ministerio de Minas y energía. Colombia Minera. Boletín informativo No. 23. (2011).En:[http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Minas\\_%20Anllela/Boletines/boletin%2023/Boletin\\_23\\_espanol\\_v10.pdf](http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Minas_%20Anllela/Boletines/boletin%2023/Boletin_23_espanol_v10.pdf)

[4] Erwin Wolff Carreño. Corporación Autónoma Regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga. Incorporación de tecnologías limpias para beneficiar minerales auríferos en la pequeña minería de vetas y califonia (Santander) buscando reducir vertimientos de mercurio y cianuro.

[5] Ministerio de minas y energía. Unidad de Planeación Minero Energética. Formulación de una iniciativa de producción más limpia dirigido al sector de los metales preciosos en pequeña escala en Colombia para ser implementado a través de los centros ambientales mineros – cams – u otros instrumentos técnicos. (2005). En: <http://www.upme.gov.co/Docs/Mineria/1865.pdf>

[6] Ministerio de minas y energía. Centro provincial de gestión minero agroempresarial del alto Nordeste antioqueño. Convenio GSA No. 75. Introducción de tecnologías más limpias que permitan la eliminación o reducción del consumo de mercurio en procesos de beneficio de oro.

[7] J. E. B. Galvis, «Tesis de grado: Caracterización en la extracción metalúrgica de oro y plata del distrito minero Segovia - Remedios,» Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Materiales, Medellín, 2005.

[8] Instituto Geológico y Minero de España. Técnicas aplicadas a la caracterización y aprovechamiento de recursos geológicos – mineros. 2010. Páginas: 40 y 51.

[9] Barrera Sterling, L.P y Fernández Rubio I.J.; Propuesta para la implementación de nuevas tecnologías limpias, para la reducción o eliminación del consumo de mercurio en la planta de beneficio de oro ubicada en el Municipio de Puerto Berrío, departamento de Antioquía; Bogotá, 40 p. Monografía. Universidad Industrial de Santander.

[10] Garmendia Salvador, A; Salvador Alcaide, A; Crespo Sánchez, C. Evaluación de impacto ambiental. Prentice Hall. 2005. Capítulo 3 y capítulo 7.

[11] Restrepo Oscar Jaime; Montoya Carlos Arturo y Muñoz Nury Alexandra. (2006). Degradación microbiana de cianuro procedente de plantas de beneficio de oro mediante una cepa nativa de *P. fluorescens*. *Dyna*. Vol 73; núm 149, pp 46-51.