



COOPERACION TECNICA COLOMBO - ALEMANA

PROYECTO REDUCCION DE LA CONTAMINACION
AMBIENTAL DEBIDA A LA PEQUEÑA MINERIA
EN LA CUENCA DEL RIO SURATA

ETAPA DE DIAGNOSTICO



RS-8-98

DOCUMENTO DE PUBLICACION
INFORME
OPERACIONES DE BENEFICIO

BGR
Instituto Federal de
Geociencias y Recursos
Naturales de Alemania

BUCARAMANGA, OCTUBRE DE 1998



COOPERACION TECNICA COLOMBO - ALEMANA

**PROYECTO REDUCCION DE LA CONTAMINACION
AMBIENTAL DEBIDA A LA PEQUEÑA MINERIA
EN LA CUENCA DEL RIO SURATA**

ETAPA DE DIAGNOSTICO

RS-8-98

**INFORME
OPERACIONES DE BENEFICIO**

BGR
Instituto Federal de
Geociencias y Recursos
Naturales de Alemania

BUCARAMANGA, OCTUBRE DE 1998

COOPERACION TECNICA COLOMBO - ALEMANA

PROYECTO REDUCCION DE LA CONTAMINACION
AMBIENTAL DEBIDA A LA PEQUEÑA MINERIA
EN LA CUENCA DEL RIO SURATA

ETAPA DE DIAGNOSTICO

RS-8-98

INFORME

OPERACIONES DE BENEFICIO

BUCARAMANGA, OCTUBRE DE 1998

BGR

"En una bella laguna crece un lirio que cada día duplica su tamaño. En treinta días puede cubrir la laguna y asfixiar todo rastro de vida que habita en ella. Sin embargo, hasta que no alcance a cubrir la mitad de la superficie, su desarrollo no parece amenazador; hay todavía espacio suficiente y nadie piensa en cortarlo, ni siquiera el día veintinueve; aún está libre la mitad de la superficie. Al día siguiente toda el agua está cubierta."

PRESENTACIÓN

El Proyecto de Cooperación Técnica (“Reducción de la Contaminación Ambiental debida a la Pequeña Minería en la Cuenca del Río Suratá”) surge a solicitud del Gobierno de Colombia ante el Ministerio de Cooperación Económica y Desarrollo de la República Federal de Alemania, que encargó el desarrollo del Proyecto al Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania (BGR) como contraparte del Convenio Interadministrativo conformado por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, la Compañía del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga E.S.P., el Ministerio de Minas y Energía y la Gobernación del Departamento de Santander, dirigido por la CDMB.

El Proyecto inició actividades para reducir la contaminación de las aguas del Río Suratá producida por la minería, hasta los niveles permitidos por la legislación sanitaria vigentes, en mayo de 1.997, en Bucaramanga y en el distrito minero Vetás – California.

El Proyecto pretende alcanzar la reducción de los niveles de contaminantes en los efluentes de las plantas de beneficio, a través de la aplicación de técnicas adecuadas de recuperación de metales preciosos, que incrementando las utilidades disminuyen la afectación al medio ambiente.

En un taller de planificación ZOPP, con todas las instituciones y personas que estuvieron interesadas en el Proyecto, se definieron en forma participativa los siguientes objetivos:

OBJETIVO DE DESARROLLO

Asegurar una fuente esencial de abastecimiento de agua para la población de Bucaramanga y el área metropolitana por la reducción de contaminación en la cuenca del Río Suratá.

OBJETIVO ESPECIFICO DEL PROYECTO

Implementar un sistema de asistencia técnica calificada para los mineros y sus organizaciones de Vetas y California, bajo la responsabilidad de la CDMB, en el marco del Convenio Interadministrativo. El sistema de asistencia técnica calificada se refiere exclusivamente a procesos de beneficio.

CONTENIDOS

	Pag.
1. INTRODUCCION	1
2. ANTECEDENTES	2
2.1 Marco operativo	2
2.2 Sistema hídrico	4
2.3 Geología	7
3. METODOLOGIA	8
4. CARACTERIZACION DE LA MATERIA PRIMA	10
5. RESULTADOS	12
5.1 Análisis de los procesos por operaciones	18
5.1.1 Conminución	18
5.1.1.1 Trituración	19
5.1.1.2 Molienda	20
5.1.1.2.1 Molino californiano	21
5.1.1.2.2 Molino de bolas	24
5.1.2 Clasificación	28
5.1.3 Concentración gravimétrica	28
5.1.3.1 Concentración en bayetas	28
5.1.3.2 Concentración en mesas	32
5.1.3.3 Concentración en jig	36

5.1.4	Amalgamación	39
5.1.5	Cianuración	45
5.2	Diagnóstico del flujo de materiales.....	50
5.3	Aspectos generales	52
5.4	Apreciación global de la calidad de aguas.....	55
5.5	Contaminación ambiental por mercurio y cianuro.....	63
5.5.1	Contaminación por mercurio	63
5.5.1.1	Contaminación de las aguas superficiales	63
5.5.1.2	Contaminación de aire y suelo	66
5.5.2	Contaminación por cianuro	68
5.5.3	Calificación de aguas y suelos	69
6.	CONCLUSIONES	71
	BIBLIOGRAFIA	77

1 INTRODUCCION

El Proyecto "Reducción de la contaminación ambiental debida a la pequeña minería en la cuenca del Río Suratá" está integrado implícitamente a los planes de desarrollo del departamento de Santander que

- (1) estudia y evalúa la contaminación antropogénica ocasionada por las labores de la pequeña minería aurífera en el distrito minero Vetas-California mediante la cuantificación aproximada de las emisiones,
- (2) realiza análisis situacionales según las relaciones mutuas entre tecnología aplicada, recuperación de oro y descargas al medio ambiente,
- (3) pretende a mediano plazo disminuir la contaminación antropogénica por mercurio y cianuro, mediante la aplicación de tecnologías adecuadas de recuperación de oro, que además signifiquen para el minero una mejora en sus operaciones desde el punto de vista económico y
- (4) tiene como objetivo la implementación de un sistema de asesoramiento técnico en beneficio de minerales a los mineros y sus organizaciones de Vetas y California para mejorar su recuperación de oro e integrar la variable ambiental en sus operaciones.

El presente documento es la primera contribución del proyecto a la comprensión de la problemática ambiental de la zona de estudio, al dar a conocimiento la situación técnica de las labores de recuperación de oro y una aproximación a la carga real de mercurio proveniente de las actividades mineras auríferas del distrito minero Vetas-California, y está basado en los informes técnicos del proyecto RS-1, RS-2, RS-3, RS-4, RS-5, RS-6 y RS-7 que tratan de la Geología y Mineralogía de la zona, así como de las operaciones en minas seleccionadas.

El proyecto no incluye una evaluación de los efectos ecológicos de las descargas de mercurio u otros contaminantes sobre el suelo, la biota, y la salud humana, pero asume que los niveles de mercurio encontrados representan un riesgo para una importante fuente de agua potabilizable que suministra el 40 % de los requerimientos de la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana.

El objetivo de este estudio es la evaluación técnica de la manera cómo se recupera el oro en la zona de estudio, la identificación de puntos críticos, tanto desde el punto de vista productivo como ambiental, la cuantificación de pérdidas y de descargas, y la calificación de las operaciones por comparación con parámetros óptimos, una apreciación de la calidad de las

aguas superficiales y de la contaminación por mercurio y recomendaciones generales.

Este informe sólo cubre la caracterización y diagnóstico de las operaciones actuales. Las soluciones de los problemas detectados corresponden a fases posteriores del proyecto.

Es también importante indicar que el periodo de estudio estuvo afectado por dos circunstancias anormales: (1) el régimen hídrico de la región fue evidentemente influenciado por el fenómeno de "El Niño" y (2) El precio del oro en el mercado internacional sufrió un considerable descenso, habiendo llegado al mínimo de los últimos 15 años.

La recolección de muestras y los estudios de campo fueron realizados por el equipo técnico del proyecto, así como las labores de preparación de muestras y análisis de resultados. Las muestras de plantas fueron analizadas en los laboratorios ACTLABS del Canadá por activación neutrónica. Las muestras de barrileros, así como las muestras líquidas fueron analizadas en Bucaramanga, en laboratorios de la CDMB por AAS. Los análisis mineralógicos fueron realizados en la Universidad Nacional de Bogotá por microscopía y en la Universidad Industrial de Santander, en Bucaramanga, por difracción de Rayos X.

2 ANTECEDENTES

2.1 Marco operativo

El área de operaciones cubre las subcuencas de los ríos "Quebrada La Baja" y Vetas. Estas corrientes fluyen sobre yacimientos auríferos de origen hidrotermal, probablemente epitermal, que contienen además de oro, apreciables cantidades de sulfuros, y finalmente desembocan en el río Suratá. El área de captación se extiende por 50 km², y se encuentra a 40 km al NE de la ciudad de Bucaramanga.

Las operaciones de beneficio de oro se encuentran a las orillas de los ríos mencionados y las poblaciones más importantes son el municipio de Vetas, junto al río Vetas y el municipio de California, en cercanías de la Quebrada La Baja.

Las minas de la zona de Vetas se hallan a alturas que van de 4000 a 3000 m s.n.m. en dirección E-NE. El municipio de Vetas se encuentra a 7 grados y 17 minutos de latitud norte y 72 grados 52 minutos de longitud oeste, su clima es frío y húmedo, con una estación relativamente seca de diciembre a marzo. La temperatura media oscila entre 6 y 12 grados centígrados.

El paisaje de la zona corresponde completamente al de alta montaña, con relieve escarpado y ondulado, con pendientes complejas que oscilan entre 50 y 70 grados y encierran un sistema de páramos, lo que dificulta enormemente la construcción de diques de colas o depósitos de residuos minerales.

A este municipio, situado a 86 km de recorrido de Bucaramanga, se accede por la vía Bucaramanga-Cúcuta hasta Berlín y desde allí se debe tomar una carretera destapada de unos 25 km.

Las minas de California se encuentran entre 2000 y 2600 m s.n.m. y su acceso es posible por varias vías, siendo la más transitada la carretera Bucaramanga-Matanza-Suratá-California, con un recorrido de 40 km.

El municipio de California se encuentra a los 7 grados 21 minutos de latitud norte y 72 grados y 57 minutos de longitud oeste. Su clima es

templado, con una temperatura promedio de 18 grados centígrados. Su topografía es ondulosa y escarpada, y al igual que en Vetas, la adecuada disposición de residuos minerales presenta dificultades espaciales.

Los municipios de California y Vetas están unidos vialmente por una carretera de cornisa, destapada y angosta de unos 20 km.

Ambos municipios cuentan con suministro de energía eléctrica, agua potable y gozan de los servicios de la empresa colombiana de teléfonos.

La base de subsistencia de los aproximadamente 3500 habitantes de la zona es la actividad minera. En 1997, en California trabajaron regularmente 15 minas y al menos 15 barrileros, mientras que en Vetas 10 minas y 40 barrileros tuvieron actividad constante.

2.2 Sistema hídrico

El sistema hídrico está compuesto por dos ríos: Quebrada la Baja y Vetas, cuyas aguas confluyen en las proximidades de California y alimentan al río Suratá. Las subcuencas ocupan áreas de escurrimiento de 22 y 28 km² respectivamente. Asumiendo, por las características del suelo, el valor de la escorrentía, y tomando en cuenta las precipitaciones medias anuales (IDEAM*), se estima un aporte de agua meteórica de unos 1000 mm/año.

El río Suratá pertenece hidrográficamente al sistema del río Lebrija, que luego de recorrer 228 km desemboca en el río Magdalena. La cuenca del río Suratá abarca 700 km² de la zona montañosa de la cordillera oriental. Este río nace a más de 3700 m s.n.m. y hasta desembocar en el río Lebrija presenta una gradiente de 62 m/km. En las partes altas, la pendiente puede alcanzar hasta 200 m/km. Se trata de un típico río de montaña, con mucha fuerza de transporte y caudal intermitente, aspectos que se acentúan aún más en los afluentes Vetas y La Baja. A pesar de la tremenda reserva en energía hidráulica, ésta sólo es aprovechada por operadores mineros, tanto para molienda, como para remolienda y amalgamación.

* INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES

En el punto de captación de aguas para la provisión de agua potable a Bucaramanga, el caudal del río puede variar entre 3 y 65 m³/s, pero sólo se extraen 2 m³/s (CAMB S.E.P.)

Análisis analíticos de aguas de línea base y de composición química de fondo se tabulan a continuación *Tabla 1*, siguiendo el esquema de la *Figura 1*.

VALORES DE LÍNEA BASE Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE FONDO						
CODIGO	QA-1	QP-1	QV-1	SAL-1	RVT-1	RS-1
pH (Unidades de pH)	6.6	6.8	7.1	7.2	6.2	7.3
Conductividad (µS/cm)	36.1	70.2	18.3	24.2	23.5	110.2
Turbiedad (NTU)	3	15	3	3	3	140
Sólidos totales (mg/l)	48	84	76	120	96	440
Sólidos Suspendidos (mg/l)	9	33	10	9	16	272
Acidez (mg/l CaCO ₃)	3.1	4.3	2.0	2.4	3.1	2.7
Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	15.0	15.4	6.4	13.6	7.8	45.6
Dureza Total (mg/l CaCO ₃)	62	69	70	57	56	98
Dureza Cál. (mg/l CaCO ₃)	9	10	5	5	6	42
N Amoniacal (mg/l N)	0.41	0.48	0.12	0.14	0.13	0.37
Nitritos (mg/l N)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Nitratos (mg/l N)	0.02	0.05	0.37	0.16	0.13	N.D
Cloruros (mg/l Cl)	0	0	0	0	0	0
Sulfatos (mg/l SO ₄)	0	1.5	0.9	1.0	1.3	5.8
Cianuro Libre (mg/l CN)	N.D	0.008	N.D	N.D	N.D	N.D
Cianuro Total (mg/l CN)	0.009	0.01	N.D	N.D	N.D	N.D
Mercurio (µg/l Hg)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Zinc (mg/l Zn)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Cadmio (mg/l Cd)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Cobre (mg/l Cu)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Hierro (mg/l Fe)	0.08	0.28	0.14	0.23	0.25	1.22
Plomo (mg/l Pb)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D

Tabla 1 Valores analíticos de Línea Base y Composición Química de Fondo en aguas superficiales del distrito minero Vetas-California

Como puede apreciarse, la calidad de las aguas antes de la influencia de operaciones mineras es químicamente excelente.

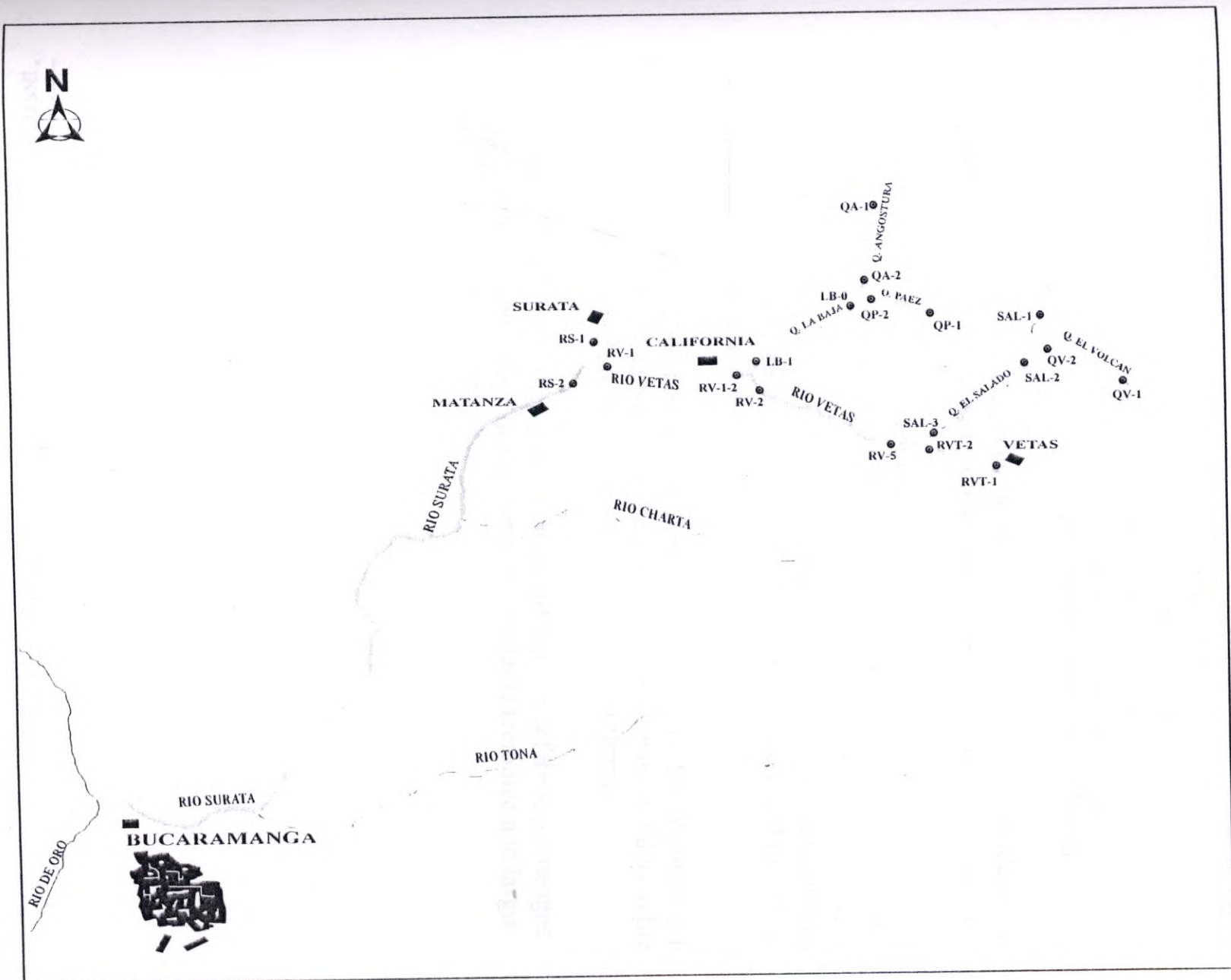


Figura 1 Localización de puntos de muestreo sobre cursos de agua

2.3 Geología

El distrito minero Vetas-California, importante por la ocurrencia de mineralizaciones de oro y plata, forma parte del Macizo de Santander compuesto por rocas metamórficas pre-Devónicas y rocas ígneas Mesozoicas. Su marco estructural está estrechamente relacionado con fallamiento regional de rumbo (Falla Bucaramanga-Santa Marta).

En Vetas las rocas encajantes de la mineralización han sido descritas como metamorfitas (neises) y rocas ígneas de composición intermedia.

En California fueron diferenciadas metamorfitas (neises y migmatitas) y rocas ígneas de composición félsica pasando por materiales de carácter intermedio en su mayoría; localmente ocurren sedimentitas del Cretáceo en contacto con rocas cristalinas del Macizo. En el área de la Quebrada La Baja las rocas encajantes de la mineralización son metamorfitas, alasquitas (leucogranitos) y el pórfido de La Baja.

Estructuralmente los rasgos más importantes para las dos regiones son diaclasamiento y fallamiento [Falla Río Vetas (en Vetas), y fallas sobre las Quebradas La Baja, San Juan y Chicagua (en California)].

INGEOMINAS* clasifica a la región de estudio, en referencia a riesgos de terremoto, con 7/10, especialmente por reciente tectónica a lo largo de la falla de Bucaramanga.

* INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES GEOLÓGICO MINERAS

3 METODOLOGIA

El trabajo consistió en la observación y documentación de la materia prima y de las operaciones de algunas plantas de beneficio seleccionadas y la colección de muestras y realización de aforos para la elaboración de balances metalúrgicos. Durante la etapa de observación fueron identificados los puntos críticos en la operación de beneficio y en la emisión de contaminantes al ambiente.

Las plantas de beneficio estudiadas pertenecen a las minas "Reina de Oro" y "Providencia" en Vetas, "La Bodega", "El Cuatro" y "La Plata" en California. Estas minas fueron elegidas por los equipos que emplean y por las características de la mena que tratan.

Adicionalmente fue efectuado un trabajo similar con barrileros.

Los métodos utilizados consideran la secuencia descrita:

observación del flujo de materiales y elaboración de un diagrama de flujo, estimación de la continuidad de operaciones y de un periodo con menores interferencias. Una vez conseguido un periodo "lo más continuo posible" fue realizado el muestreo y aforo.

Las muestras para análisis químico fueron tomadas en cantidades iguales a intervalos de una hora después del primer muestreo. Con el conjunto de muestras horarias se formó una muestra compuesta que fue transportada al laboratorio del proyecto.

Los aforos fueron realizados en forma simultánea al muestreo.

Las muestras fueron clasificadas en muestras de alimentación y muestras de proceso. Las muestras de proceso fueron, a su vez divididas entre muestras con mercurio y muestras sin mercurio, y, muestras sólidas y muestras líquidas.

Todas las muestras sólidas fueron secadas, las que presumiblemente contenían mercurio a temperatura ambiente, y las demás por exposición a la radiación de lámparas infrarojas a 105 °C aproximadamente.

Las muestras secas fueron homogeneizadas y cuarteadas y dieron lugar a tres submuestras: muestra testigo, muestra para análisis químico y muestras para análisis granulométricos y mineralógicos. No fueron realizados análisis densimétricos por carecer de un medio denso adecuado (de alta densidad, inorgánico y sin peligros ambientales).

El análisis granulométrico fue realizado por tamizado manual en húmedo, de aproximadamente 1 kg de material. Los tamaños de separación fueron: 300, 180, 106, 75 y 45 micrones.

Las fracciones granulométricas fueron filtradas, secadas, pesadas, homogeneizadas y fueron cuarteadas para producir de cada una, una submuestra destinada al análisis químico.

Todas las muestras para análisis químico fueron pulverizadas en un molino vibratorio de anillos, con mortero y molturantes de ágata. El empleo de ágata evita la contaminación de las muestras. La pulverización disminuye el efecto de concentraciones localizadas de oro, "efecto pepita". La muestra pulverizada a - 400 mallas fue nuevamente homogeneizada para, por partición, tomar una muestra para el laboratorio.

Las muestras líquidas fueron colectadas en recipientes herméticos pretratados y se usaron preservantes para evitar variaciones en la concentración.

Las muestras de plantas de beneficio fueron analizadas en ACTLABS por el método de activación neutrónica

Las muestras líquidas y de "barrileros" fueron analizadas en el laboratorio de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga por AAS o métodos internacionalmente aceptados.

Las muestras para análisis mineralógicos fueron enviadas a la Universidad Nacional en Bogotá en el caso de secciones pulidas y a la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander para análisis estructural por difracción de Rayos X.

4 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La materia prima empleada en las operaciones mineras del distrito minero Vetas-California son las menas cuya mineralización presenta las siguientes características:

Consiste en filones y en material diseminado. Los filones, cuyo espesor varía desde unos pocos centímetros hasta más de un metro, presentan control estructural y alteraciones hidrotermales. En ellos es frecuente encontrar pirita, calcopirita, marcasita, galena, esfalerita, tennantita, tetraedrita, enargita, calcosina, covelina, digenita, bornita, oro y plata. El material de la ganga es físicamente duro; sin embargo, las condiciones estructurales existentes en la zona fragmentan el material disminuyendo su índice de dureza.

La materia prima para la extracción del oro es diferenciada en "material oxidado" y "material no oxidado". El primero, afectado por agentes externos, presenta minerales oxidados de hierro, oro nativo y *electrum* (aleación natural de oro y plata) pudiéndose observar granos del metal. El segundo está representado por sulfuros primarios (pirita, esfalerita, calcopirita, etc) y oro visible, microscópico y submicroscópico.

En este distrito minero fueron reconocidos cuatro sectores con características especiales: Uno corresponde a la región de Vetas, en él no se conocen diferenciaciones químicas fundamentales en mena, y los otros tres coincidentes con zonaciones geoquímicas sectorizadas en California. Este hecho marcó uno de los criterios de selección de las operaciones mineras estudiadas.

El muestreo de caracterización dio que los contenidos de **Cu**, **Pb**, **As** y **Sb** en las minas de California son mayores y con rango más amplio que en Vetas. La mineralización en California es más compleja, y muestra mayor presencia de minerales de **Cu** (calcopirita, calcosina, y bornita), de **As** (enargita) y de **Sb** (tetraedrita), mientras que en Vetas destaca el **Zn** (esfalerita).

El oro en las muestras de mena ocurre al estado nativo o como *Electrum*. El tamaño de sus granos suele ser inferior a 50 μm , siendo más frecuente entre 5 y 20 μm ; sin embargo, la experiencia práctica muestra la existencia de tamaños mayores, inclusive hasta de 2 cm. En

DE LA MATERIA PRIMA

particiones en las que el oro
se encuentra en forma de

partes
de

que

se encuentran en las

partes de

de las que se encuentran

en las partes de

de las que se encuentran

en las partes de

de las que se encuentran

que se encuentran en

de las que se encuentran

en las partes de

de las que se encuentran

en las partes de

como se ve en

que se encuentran

en las partes de

de las que se encuentran

en las partes de

general los mayores tamaños de oro se encuentran en Vetas mientras que en California predomina el oro fino. El oro crece en bordes de pirita, esfalerita, en pirita o en cuarzo; normalmente está entrecrecido y rodeado por sulfosales.

5 RESULTADOS

La minería regional tiene carácter semiartesanal. De las 25 plantas en funcionamiento durante el periodo de relevamiento de información en campo (noviembre de 1997- marzo 1998) sólo dos presentan una mecanización completa que incluye etapas típicas del beneficio de minerales de oro. En las *Tablas 2a y 2b*, se presenta un panorama del grado de mecanización de las plantas en operación del distrito minero estudiado.

Una planta típica consta de muy pocas unidades de proceso. El material run-of-mine es transportado hasta el punto de beneficio en andariveles rústicos ("breques"), o en vagonetas impulsadas por fuerza humana sobre rieles de metal, de madera o una combinación de madera y fierro. Una primera reducción de tamaños hasta aproximadamente -150 mm toma lugar a mano. Luego el material es alimentado también manualmente a un molino californiano movido por energía hidráulica o eléctrica.

El producto molido con abundante agua es sometido a una separación gravimétrica en canaletas inclinadas recubiertas con tejido de paño rústico - "bayetas"- que da como producto un preconcentrado de oro que es sometido a remolienda y amalgamación en barriles giratorios.

Las operaciones de remolienda (para liberar el oro ocluido) y de amalgamado toman lugar en forma simultánea, con producción de "harina de mercurio" que es evacuada con los lodos. De esta operación se recupera el oro en una amalgama, que es sometida a destilación, en las minas grandes en retorta y en las pequeñas o unipersonales al aire libre.

Las colas de las "bayetas" y eventualmente las de amalgamación sufren un deslodado antes de pasar a la operación de cianuración, que se realiza en tanques de cemento con volúmenes de hasta 30 m³. Los sólidos suelen ser lavados para eliminar el ácido que pudiera haberse formado, se mezclan con cal y se cargan a un tanque, por el que circula solución de cianuro de sodio. El oro pasa a la solución como complejo diciano y se recupera sobre virutas de zinc por cementación.

Un flujograma típico de tratamiento de los minerales auríferos del distrito se presenta en la *Figura 2*

PLANTA	TRITURACIÓN	MOLIENDA		CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA			AMALGAMACIÓN	CIANURACIÓN
		MOLINO BOLAS	MOLINO CALIFORNIANO	JIG	BAYETA	MESA		
LA BODEGA	X	X		X		X	X	X
CALLEJÓN BLANCO			X		X			X
LA PLATA Nº 2			X		X			X
BUENA VISTA			X		X		X	X
LA ITALA	X		X		X		X	X
SAN CRISTOBAL			X		X		X	X
EL CUATRO	X		X		X		X	X
SANTA CATALINA	X	X			X			X
LOS ANDES	X	X			X		X	X
SAN CELESTINO	X	X	X					X
SAN JUAN			X		X			X
MACHUCA II			X		X		X	X
CAJAMARCA			X		X			X
LONDRES			X		X		X	X
EL GIGANTE			X		X		X	X
TOTAL: 10	40%	26%	80%	6.7%	86%	6.7%	60%	100%

Tabla 2a *Inventario de plantas en operación y equipos empleados en California.*
(Status: Noviembre de 1.997)

PLANTA	TRITURACIÓN	MOLIENDA		CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA			AMALGAMACIÓN	CIANURACIÓN
		MOLINO BOLAS	MOLINO CALIFORNIANO	JIG	BAYETA	MESA		
REAL MINERA	X	X				X	X	X
REINA DE ORO	X	X	X	X	X	X	X	X
TAJO ABIERTO			X		X		X	X
LA PETER	X	X				X	X	X
EL DORADO			X		X	X	X	X
EL DELIRIO			X		X	X	X	X
TROMPETEROS			X		X	X	X	X
LA TOSCA			X		X		X	X
ELSY			X		X	X	X	X
PROVIDENCIA			X		X	X	X	X
TOTAL: 10	30%	30%	80%	10%	80%	80%	100%	100%

**Tabla 2b. Inventario de plantas en operación y equipos empleados en Vetas.
(Status: Noviembre de 1.997)**

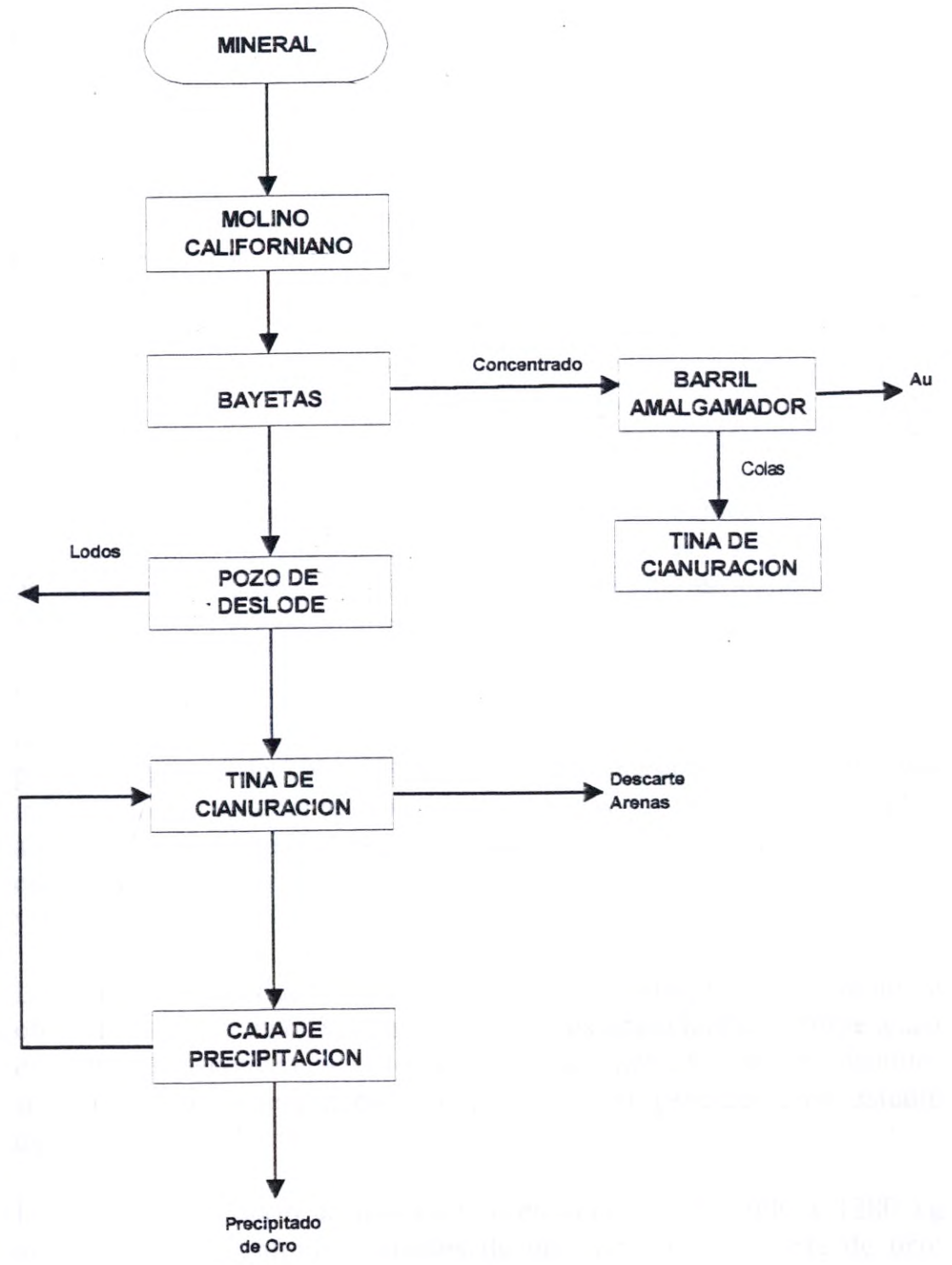


Figura 2. Flujograma de Planta de Beneficio típica en el distrito minero Vetas - California (1998)

En el presente informe sólo se tratan resultados generales, producto de la observación y estudio del funcionamiento de cinco plantas de beneficio, seleccionadas por sus peculiaridades y porque los resultados obtenidos pueden ser extrapolados al funcionamiento de otras plantas, tanto en referencia a las recuperaciones de oro, como a los vertimientos con contenidos de mercurio y/o cianuro. También se realizó el estudio de las operaciones de 17 barrileros, de cuyos resultados se supone el comportamiento de los demás. Las operaciones de barrileros se analizan en forma conjunta con la amalgamación realizada en las plantas de beneficio.

El tonelaje total tratado en el distrito minero Vetas-California fue estimado de las capacidades instaladas, de los vertimientos de arenas cianuradas registrados por los inspectores de vertimientos de la CDMB, y de la cantidad de lodos obtenida de los datos generados en las labores de muestreo. El tonelaje total tratado en el distrito asciende a 35000 - 45000 t/a, con leyes de cabeza que fluctúan entre 6 y 30 g/t Au

Por los contenidos de oro en la carga de alimentación, en los lodos desechados, y en los vertimientos de arenas cianuradas, se estimó una producción anual de 250 a 350 kg de oro. Es necesario destacar que esta información es solamente deducida, puesto que no fue posible el acceso a fuentes de comercialización, ni a balances económico-financieros. Sin embargo, las cifras resultantes dan una recuperación que oscila entre 50 y 70%.

Los aportes individuales a la carga total de mercurio al ambiente se obtuvieron de los datos suministrados por los operadores en referencia a compras de mercurio, a los contenidos de mercurio en los residuos sólidos y líquidos desechados y a la información generada en el estudio de plantas y barrileros.

La carga de mercurio al ambiente se encuentra entre 1000 y 1200 kg anuales, **¡prácticamente 4 partes de mercurio por 1 parte de oro!** que provienen en mayor proporción de plantas grandes y medianas, luego, de operaciones individuales, y una pequeña pero significativa parte del mercurio geogénico (no menos del 10 %).

A partir de la información generada sobre la producción; datos sobre costos de funcionamiento y consumos proporcionados por los

operadores, así como información sobre precios en los mercados locales tanto para insumos, como para el producto, se obtuvo que los costos de producción por onza de oro comercializada varían entre 220 y 280 USD. Esta información indica la existencia de operaciones marginales, que funcionan en los límites de una economía de subsistencia.



5.1 Análisis de los procesos por operaciones

Un proceso completo de beneficio en el distrito minero Vetas-California consta de las siguientes operaciones:

Conminución (trituración, molienda), separación gravimétrica (jigs, mesas, canaletas), amalgamación y cianuración. A continuación se presenta un análisis de los resultados obtenidos para cada operación.

5.1.1 Conminución

La conminución tiene un doble propósito: liberar el material valioso por fractura de la estructura del grano y la separación del mineral valioso de los minerales ganga asociados, y la obtención de un material de alimentación cuyo tamaño de grano sea el adecuado para los procesos posteriores de separación. La conminución debe alcanzar estos objetivos al mayor tamaño de grano posible. Se persigue esta última meta no sólo por ahorrar energía, ver *Figura 3* (Nótese que la conminución consume

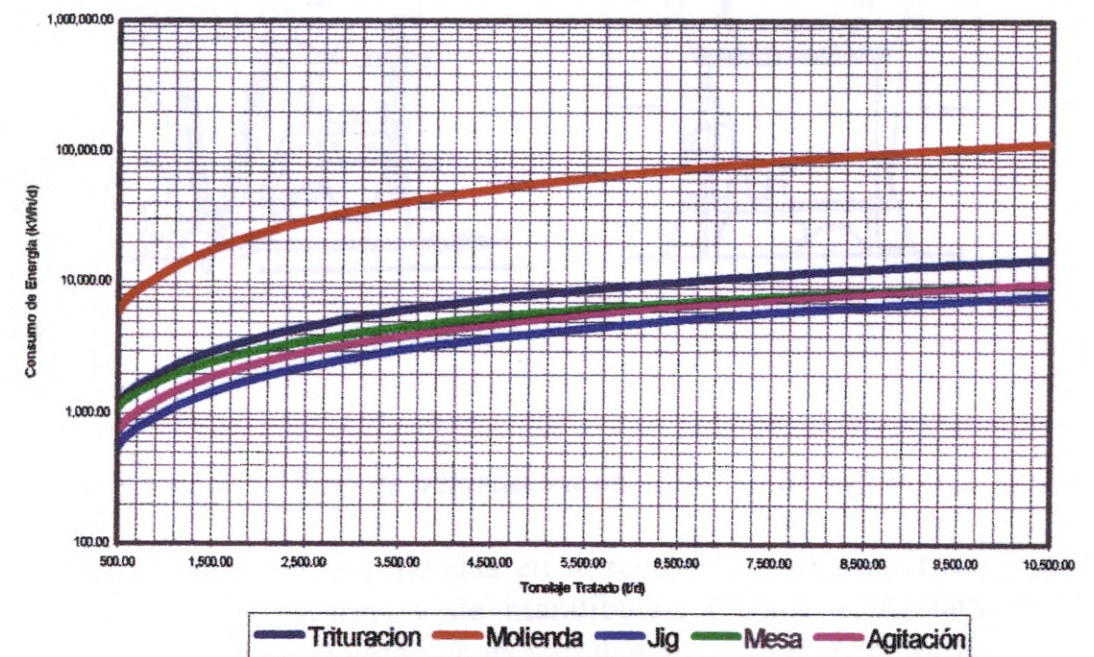


Figura 3 Consumo de energía por proceso en función del tonelaje tratado (Bureau of Mines, 1989)

generalmente más del 70 % de la energía que consume toda la planta de beneficio), sino también porque todas las etapas subsecuentes de separación física se hacen más baratas y fáciles de operar. Un proceso de conminución abarca dos etapas: la trituración y la molienda.

5.1.1.1 Trituración

Es la operación por la que el material run-of-mine sufre una reducción de tamaño hasta adecuarlo a su tratamiento en la molienda.

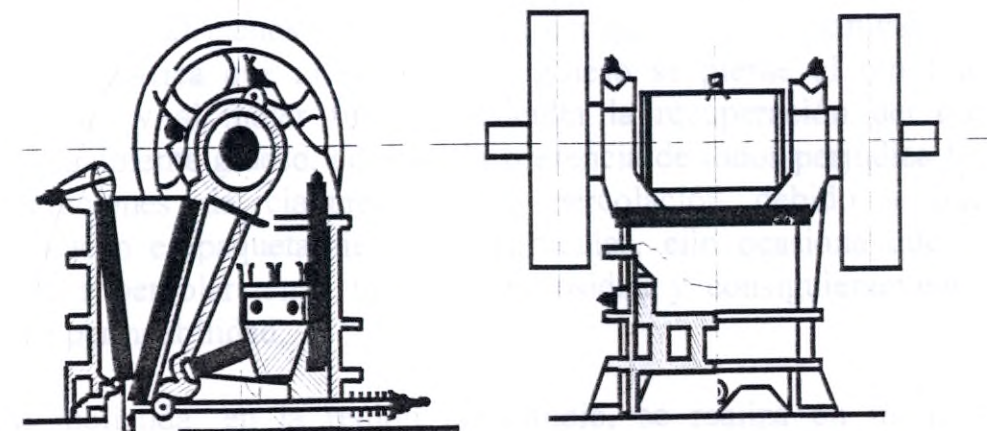


Figura 4 Tipo de trituradora utilizado en la región

Las trituradoras utilizadas en la región no son numerosas y son todas estacionarias y de mandíbulas, *Figura 4*. El tamaño de grano de la alimentación es variable y oscila en el entorno de 150 mm. El material más grueso que la boca de la trituradora es trozado a mano por el operador. No existe una separación previa de las fracciones que ya no deberían pasar por trituración al ser menores que el tamaño medio de salida.

La descarga a la tolva de alimentación al molino es generalmente discontinua. Los índices de reducción de tamaño obtenidos para las trituradoras observadas estuvieron entre 6 y 4.

Diagnóstico

Las trituradoras cumplen con la función prevista de manera satisfactoria.

5.1.1.2 Molienda

La molienda tropieza con la conjunción de varias condicionantes, muchas de ellas contradictorias: La molienda debe ser realizada de tal modo que el oro grueso, ocasionalmente en elevada proporción, no sea molido a tamaños que hagan difícil su recuperación gravimétrica, el oro medio debe alcanzar un grado de liberación adecuado para su recuperación gravimétrica, el oro fino debe ser liberado o al menos expuesto para dar acceso a su cianuración. Esto significa que al moler muy grueso se pierde el oro fino incluido y al moler fino se dificulta la recuperación del oro originalmente grueso, además, la presencia de lodos perjudica las operaciones de cianuración por percolación debido a que producen empaquetamiento de partículas, ello ocasiona que la capa a percolar tenga una baja porosidad y consiguientemente baja permeabilidad.

La molienda, en la región de estudio, se realiza en molinos californianos o en molinos de bolas. En forma muy especial, durante el periodo de trabajo de campo sólo se vio trabajar un "Arrastre" (Figura 5), unidad de molienda y amalgamación por frotamiento, que es reemplazada por el barril amalgamador.



Figura 5. Arrastre, sistema de molienda y amalgamación

5.1.1.2.1 Molino californiano

El equipo de molienda mecanizada más antiguo es el bocarte, molino californiano o molino de pisones (*Figura 6*), fue perfectamente descrito por Agrícola [2] y es asimismo el más extendido en la región estudiada. Bien operado, podría cumplir satisfactoriamente con los requerimientos para un material aurífero duro o semiduro oxidado, sin embargo, su capacidad es muy limitada. Este equipo trabaja generalmente sin trituración previa. Es movido por energía eléctrica o hidráulica. El pisón de unos 150 kg es subido mecánicamente unos 300 mm y se deja caer sobre la carga, a un ritmo de 100 min^{-1} . La carga es aprisionada y fracturada por el impacto contra una superficie dura. Los finos son arrastrados por agua a través de un tamiz de 1 mm de abertura.

Los gastos de operación son muy bajos, sin embargo, **un aspecto fundamental importancia para el desempeño óptimo de una planta de beneficio: la continuidad, no se toma en cuenta adecuadamente**, la alimentación al molino se realiza a mano, y en muchos casos prácticamente al oído*, aspecto que influye en la calidad del material producido.



Figura 6. Molino Californiano o Bocarte y bayetas

La Figura 7 presenta curvas granulométricas típicas de productos de molienda procedentes de molinos californianos en la región. Es destacable cómo se refleja la dureza del material en la distribución de tamaños de los productos. Cabe indicar que en la molienda por impacto las fuerzas de atrición o abrasión no juegan un rol importante, es decir que el oro grueso no es fraccionado en

* Cuando los pisones no impactan sobre la mena sino sobre la base, producen un sonido metálico sui generis, que indica al operador que debe alimentar al molino

partículas finas, sino maleado, aumentando la probabilidad de recuperar gravimétricamente el oro grueso.

Diagnóstico

El molino californiano es fácil de operar y sólo son manejables las variables frecuencia de golpe, cantidad de agua de lavado, apertura de criba y ritmo de alimentación [3], como prácticamente todos los molinos de la zona trabajan en forma similar, es notoria la falta de regulación especial de variables para cada caso particular, observación ratificada por la *Figura 7*.

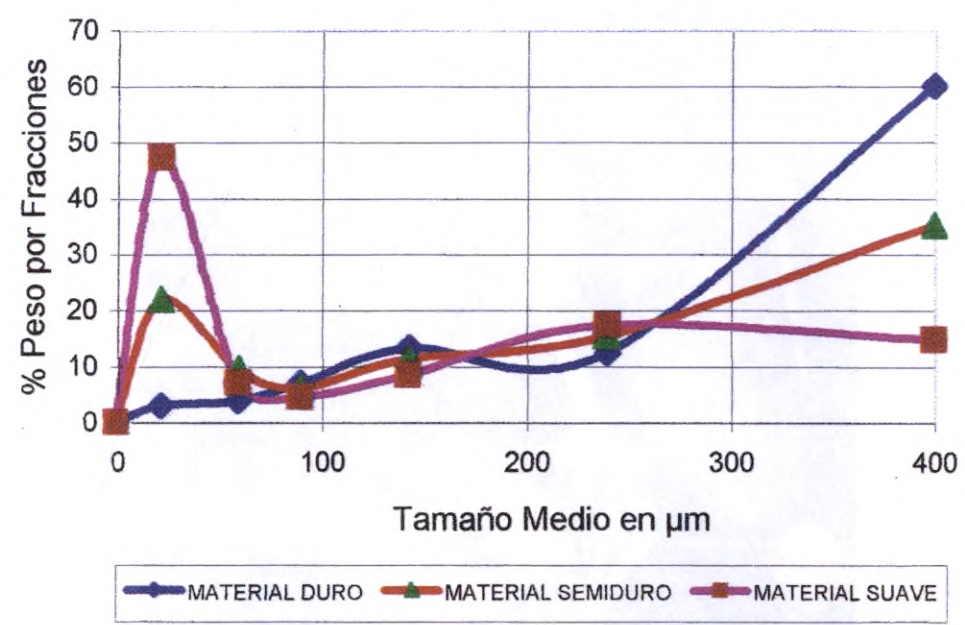


Figura 7. Curvas Granulométricas de productos de durezas diferentes molidos en Molino Californiano.

El rendimiento del molino californiano es aceptable pero podría ser mejorada la calidad del producto. El factor de reducción de tamaños varía de 135 a 1000

5.1.1.2.2 Molino de bolas

El molino de bolas, *Figura 8*, tiene forma de un cilindro rotatorio, dentro del cual bolas de acero muelen la carga por impacto, presión, atrición y abrasión.



Figura 8. Molino de Bolas en el distrito minero Vetas-California, 1998

El molino de bolas tiene gran capacidad de tratamiento, pero presenta la tendencia a producir material fino. Por su manera de moler, la sobremolienda de parte de la alimentación es casi inevitable.



El oro, en el molino de bolas, por una parte es fragmentado por atrición y abrasión y por otra es maleado por golpe y presión a láminas que se unen por aplastamiento, dando por un lado finos que quedan suspendidos en la pulpa y aglomerados de oro que no pueden abandonar el molino y son recuperados cada cierto tiempo, cuando se abre aquel con este propósito específico o cuando se cambia el revestimiento interior. La cantidad de oro retenido en un molino de bolas puede ser apreciable, en la zona hasta más de 2000 g en seis meses, y su extracción constituye un acontecimiento. Los molinos de bolas de las plantas estudiadas funcionan en circuito con un jig, para recuperación de oro grueso o sulfuros gruesos y un clasificador de tornillo (que no siempre está habilitado) para el retorno de material todavía grueso. En la *Tabla 3* se observa un ejemplo de combinación de variables de operación utilizado en la zona.

VARIABLES DE OPERACIÓN DE UN MOLINO 4'x 6'	
Velocidad de rotación	72,5% η
Velocidad crítica (η)	40 rpm
Relación líquido/sólido	2/1
Peso de cuerpos moledores	2,2 t
Pendiente	1,2%
Malla de trommel	1 mm

Tabla 3. Variables para molino de bolas en el distrito minero Vetas-California (1.998).

La información obtenida sobre la molienda proporcionó los resultados que se muestran en la *Tabla 4*, donde se ve claramente que la formación de una gran cantidad de finos es el resultado de pretender una mejor liberación, y tiene como consecuencia un descenso en la recuperación de la planta.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DESCARGA MOLINO			
Abertura de Tamiz (µm)	Peso Retenido (g)	Peso por fracciones (%)	Peso Acumulado. (%)
-45	101,04	11,58	11,58
45	61,66	7,06	18,64
75	48	5,50	24,14
106	94,92	10,87	35,01
180	160,56	18,39	53,41
300	406,72	46,59	100,00
	872,9	100,00	

Tabla 4. Análisis granulométrico de Descarga Molino de Bolas, Vetas-California, 1998.

Sin embargo, si la separación gravimétrica fuera realizada técnicamente y la lixiviación del oro por agitación, incluyendo los lodos, y no por percolación, los productos de molienda serían adecuados.

Dignóstico

En general, los molinos de bolas de la región trabajan adecuadamente.

Comparación entre el molino californiano y el molino de bolas

Una comparación entre el molino californiano y el molino de bolas, *Tabla 5*, muestra que ambos molinos cumplen con la función prevista, sin embargo, las características del material a moler, aspectos económicos y la escala de la operación son determinantes en la elección. El paulatino agotamiento de las zonas oxidadas ricas con oro grueso y el hallazgo de vetas sulfurosas con oro medio, fino y ultrafino, determina un cambio en la tecnología de recuperación. El reemplazo gradual de los molinos californianos por molinos de bolas debe ser parte de la adopción de nuevos procesos.

El molino californiano se adecua a un material oxidado, no muy duro, con oro grueso y no incluido en sulfuros. Vistas las recuperaciones reportadas para épocas en las que se trataba en la región material oxidado con molino californiano, se observó que éste molino funcionó eficientemente. Sin embargo, cuando se trabaja material no alterado, con oro incluido en sulfuros, la molienda que mayor liberación ofrece es en molino de bolas.

CARACTERISTICAS DE MOLINOS		
	Californiano	De Bolas
<u>Capacidad de tratamiento</u>	<u>Baja</u>	<u>Alta</u>
<u>Producción de finos</u>	<u>Baja</u>	<u>Alta, mayor liberación</u>
Costo de operación	Bajo	Alto
Alimentación	100-150 mm	20-40 mm
Trituración previa	No	Necesaria
Experiencia del operador	Escasa	Buena
Costos derivados	Ninguno	Clasificador, espesador

Tabla 5 Comparación de algunas características de molinos californiano y de bolas [4]

Las curvas resultantes de graficar la distribución acumulativa de masas por fracciones granulométricas en escala doble logarítmica (*Figura 9*) [5] facilitan la comparación de los resultados de campo con curvas de unidades de conminución típicas como trituradoras de mandíbulas y molinos de bolas. Las curvas obtenidas son semejantes a las de comparación; esto indica que los equipos empleados son standard y se los puede considerar como tales en cálculos de capacidades y rendimientos.

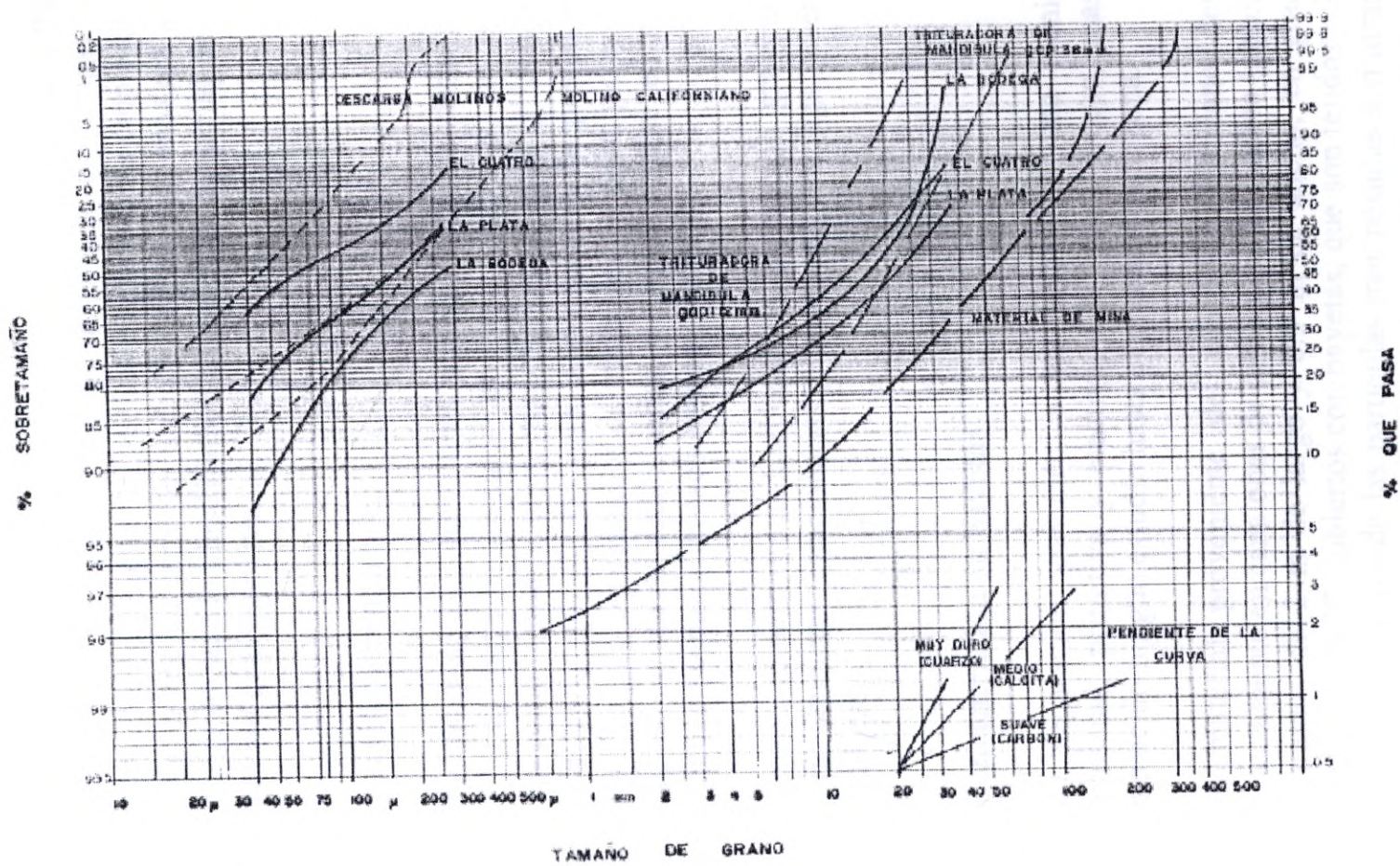


Figura 9. Curvas de molienda para diferentes equipos

5.1.2 Clasificación

Se denomina así a la separación de un colectivo de granos en fracciones por tamaños. La única clasificación observada es la que cierra el circuito de molienda junto a un jig. Los clasificadores empleados son de tornillo y el punto de corte del único en funcionamiento era aceptable. Sin embargo **no existe clasificación alguna del material destinado a la separación gravimétrica.**

5.1.3 Concentración gravimétrica

Desde el inicio de las operaciones mineras sobre la tierra se aplican métodos gravimétricos basados en los principios de separación conocidos como "estratificación en corrientes de agua" y "concentración en capa delgada" [6] [7] [8] para la producción de preconcentrados, productos finales o concentrados de minerales, en principio en canaletas estacionarias, en mesas estacionarias y posteriormente en mesas con movimiento, en cedazos de sacudimiento y en jigs.

En el distrito minero Vetas-California la separación gravimétrica se realiza en canaletas estacionarias ("bayetas"), en jigs y en mesas concentradoras.

5.1.3.1 Concentración en bayetas

La separación gravimétrica en bayetas es una técnica muy artesanal, primitiva y efectiva para grano grueso, mas no ha merecido ningún estudio hasta el presente en la zona.

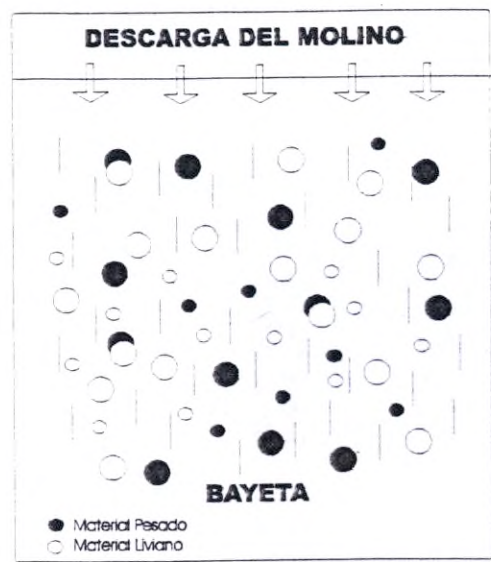
El material proveniente del molino californiano desemboca directamente en canalones de cemento o de madera (generalmente 3 tramos de 2 m de largo y 0.9 m de ancho, en gradas, con pendiente de 3°) cubiertos con bayetas, que son tejidos rústicos de lana de oveja, donde las partículas más pesadas son atrapadas en las concavidades del tejido y en las trampas que eventualmente pudiera colocar el operador (*Figura 6*).

La concentración en canales cubiertos por materiales adecuados toma lugar por sedimentación diferencial en régimen laminar, es decir con un Número de Reynolds inferior a 2100. La velocidad lineal de la pulpa, de 0.6 a 0.8 m/s es adecuada a la distribución granulométrica de la alimentación. La operación no es continua. Las bayetas son descargadas en periodos que fluctúan entre 8 y 24 horas. Mientras dura el cambio de bayetas, que varía entre 20 y 40 min, según el operador, el molino se detiene.

Se determinó por observación directa que el tiempo de saturación de las bayetas es de 30 a 60 minutos, desde la colocación de la bayeta hasta que las concavidades del tejido son cubiertas por partículas sedimentadas y empiezan a formarse canales en la capa de sedimento. La pulpa no fluye sobre el material ya depositado, sino por los canales, la velocidad de la pulpa aumenta, el flujo se vuelve turbulento, en esas condiciones las partículas de oro medias y finas no tienen oportunidad para sedimentar y sólo se puede recuperar el oro grueso, que no es arrastrado por la turbulencia. En la *Tabla 6* se muestra un balance típico de la operación.

BALANCE DE CONCENTRACIÓN EN BAYETAS (12 HORAS DE OPERACIÓN)				
PRODUCTO	PESO (t)	TENOR ORO (g/t Au)	ORO FINO (g)	% ORO (%)
Descarga del molino	3,0	7,5	22,5	100
Total ingresos	3,0	7,5	22,5	100
Preconcentrado a amalgamación	0,25	16	4	18
Material a deslode para cianuración	2,75	6,8	18,5	82
Total egresos	3,0		22,5	100

Tabla 6 Balance de una operación de concentración en Bayetas, Vetas-California, 1998



(A)



(B)

Figura 10 (A) Asentamiento de partículas en la Bayeta.
(B) Formación de canales después de la saturación

La *Figura 11* presenta las características de un material típico retenido en bayetas.

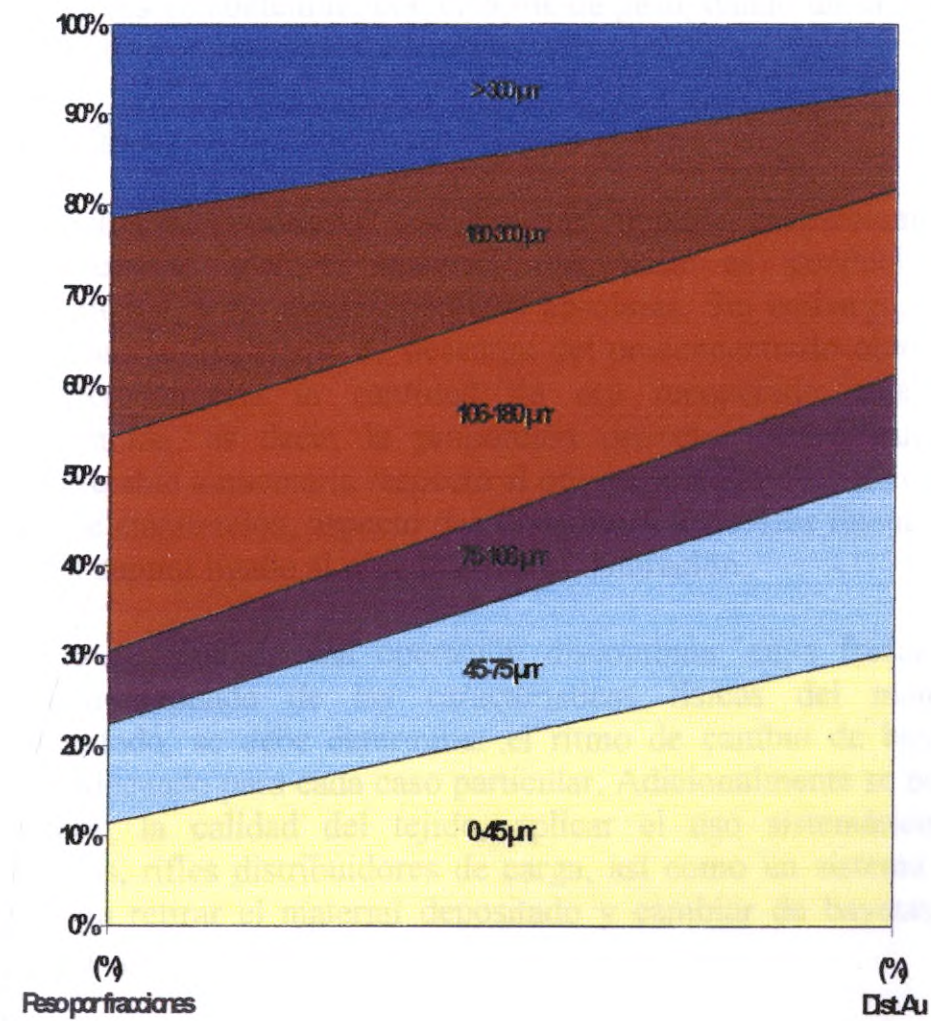


Figura 11 Distribución de masas y oro por fracciones granulométricas en un concentrado de bayetas, Vetas-California, 1998.

Adicionalmente a la elaboración de un balance, se recogieron muestras de bayetas que habían sido cargadas durante 30 minutos, justamente al iniciarse la formación de canales en el sólido retenido. Se obtuvo un preconcentrado, con un índice de concentración de 4; mientras que las muestras de bayetas cargadas durante 8 horas dieron resultados sólo escasamente superiores en contenido, con el doble de peso, dando un índice de concentración ligeramente superior a 2.

Diagnóstico

Las canaletas recubiertas con "bayetas" trabajan aceptablemente, considerando que el material que pasa es conducido a cianuración, y no existen pérdidas absolutas. Sin embargo, si se acelerara la frecuencia de descarga del preconcentrado obtenido, se incrementaría la cantidad de oro recuperado antes de cianuración, es decir, la proporción oro casi inmediatamente comerciable aumentaría respecto al oro recuperado después de 22 días de cianuración, aspecto que disminuirá los costos financieros por el capital ligado al pipe line de la cianuración.

Como se trata de una operación discontinua, cuya frecuencia óptima depende de las características físicas del material alimentado, se debe determinar el ritmo de cambio de bayetas más adecuado para cada caso particular. Adicionalmente se puede mejorar la calidad del tejido, aplicar el uso sistemático de trampas, rifles distribuidores de carga, así como un sistema que permita retirar el material depositado y cambiar de bayetas sin pérdida de tiempo [9].

5.1.3.2 Concentración en mesas

La introducción de mesas de sacudimiento longitudinal en plantas de beneficio se remonta a fines del siglo XIX, y desde entonces, el diseño de las mesas concentradoras se ha mantenido prácticamente sin variaciones [10], *Figura 12*.



Figura 12. Mesa concentradora Wilfley en operación. Distrito minero Vetas-California 1998

La mesa concentradora es un equipo de separación con alta efectividad de corte cuando funciona en condiciones adecuadas. Sin embargo, el rango de tamaños de grano del material alimentado debe ser estrecho. Por ello existen diseños especiales de mesas para tratar por separado “arenas gruesas”, material entre 1 mm y 3 mm; “arenas finas”, entre 0.2 mm y 1 mm y “lodos” o “arenas muy finas”, con partículas menores a 0.2 mm, que se diferencian principalmente por la amplitud y la frecuencia del golpe, por las inclinaciones de la mesa (longitudinal y transversal), y por altura y configuración de los rifles, *Tabla 7*.

CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA DIFERENTES TIPOS DE MESAS

TIPO DE MESA	ARENA GRUESA	ARENA MEDIA	ARENA FINA
Tamaño de material (mm)	1 - 3	0,2 - 1	0,04 - 0,2
Altura de rifle (mm)	20	15	10
Frecuencia (min ⁻¹)	200 - 270	220 - 300	350 - 380
Amplitud (mm)	16 - 26	14 - 15	12 - 13
Pendiente longitudinal (%)	2 - 3	0,1 - 1	0,1 - 1
Pendiente transversal (%)	0,4 - 1	0,2 - 0,4	0,1 - 0,3
Agua de alimentación (l/s,v/v)	3 - 6	3,5 - 4	3,5 - 4
Agua de lavado (l/s,v/v)	1 - 2	1 - 1,5	1 - 1,5

FUENTE: "Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe" Bd.II, Schubert,H, Leipzig, 1986.

Tabla 7. Condiciones de Operación para diferentes tipos de mesa.

En un proceso convencional de concentración en mesas, los minerales se introducen entre los rifles y sufren los efectos del flujo cruzado de agua y de una presión de repulsión del medio sobre las partículas. Esto da lugar a que entre los rifles el agua se mueva de tal manera (hacia arriba y hacia abajo) que se obtiene una estratificación de minerales livianos sobre minerales pesados. Substancialmente es un proceso de jiging determinado por la velocidad terminal de asentamiento de los minerales mismos y es muy útil para la separación de partículas con gran diferencia de densidad. Luego de la estratificación, la corriente de agua arrastra los materiales livianos, mientras que los pesados obedecen más a los movimientos de la mesa y avanzan hacia la zona sin rifles. Allí se combinan el movimiento de la mesa con el flujo laminar cruzado del agua de lavado para dar lugar a una separación bastante efectiva. Por lo general una mesa da lugar a tres productos: concentrado, medios y colas.

Las mesas que trabajan en la zona son de tipo Wilfley y sirven a dos o tres propósitos, siendo uno importante la eliminación de lodos, luego el logro de un concentrado rico y finalmente, si se da el caso, el descarte de estériles. Los productos intermedios son enviados a cianuración.

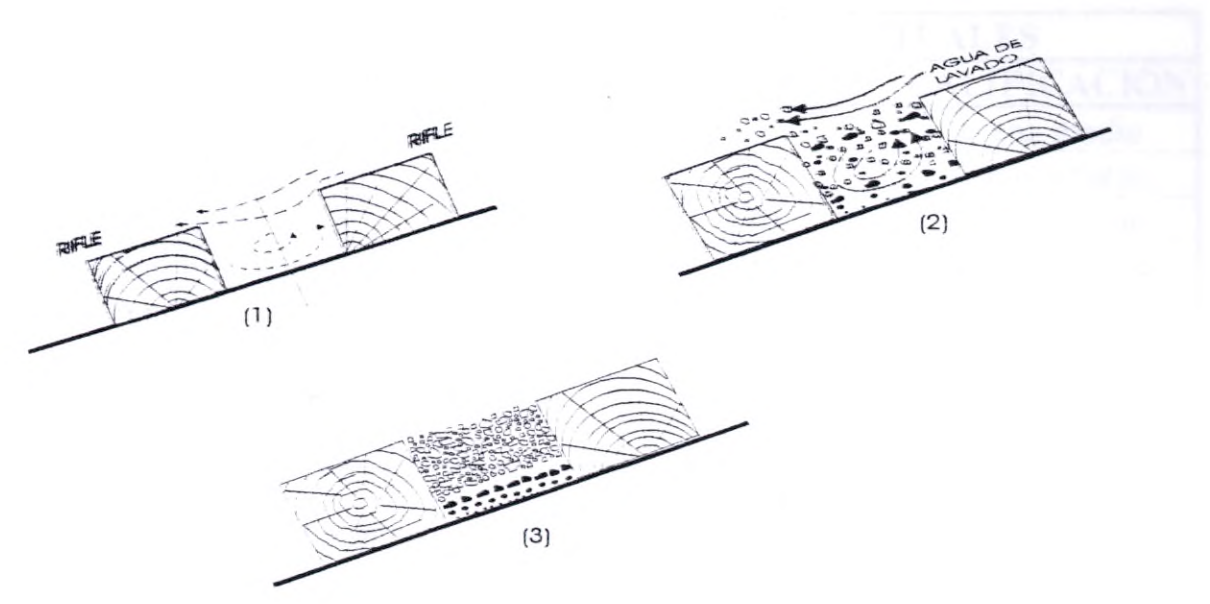


Figura 13 Comportamiento de agua y partículas entre los rifles de una mesa de Concentración. (1) Flujo del agua de Lavado, (2) Dilatación de la cama de mineral, (3) Estratificación de minerales entre los rifles.

La mesa trabaja muy bien cuando a) la alimentación ha sido previamente clasificada, b) las variables de operación: amplitud y frecuencia de golpe, pendiente longitudinal y transversal, relación líquido/sólido, han sido cuidadosamente seleccionadas según el material a tratar y c) el flujo de material corresponde a la capacidad de tratamiento de la unidad. Es importante la regularidad en la alimentación. El ritmo de alimentación y la densidad de pulpa deben mantenerse constantes una vez encontradas las mejores condiciones de operación para un determinado material. Si éste cambia, deben buscarse las condiciones apropiadas. Ni en Vetas, ni en California se hace uso de clasificadores para tener un rango de tamaños adecuado, ni de espesadores para regular la densidad de pulpa, y se cambian las variables de operación sin criterio técnico. La Tabla 8 muestra las condiciones de operación actuales calificadas respecto a las recomendadas.

PARÁMETROS DE OPERACIÓN ACTUALES		
PARÁMETRO	ACTUAL	CALIFICACIÓN
Tamaño de material (mm)	< 0,6	Arena media
Altura de rifle (mm)	17	Arena gruesa
Frecuencia (min ⁻¹)	270	Arena gruesa
Amplitud (mm)	19	Arena gruesa
Pendiente longitudinal (%)	0,8	Arena media
Pendiente transversal (%)	0,5	Arena gruesa
Agua de alimentación (l/s,v/v)	8	En exceso
Agua de lavado (l/s,v/v)	13	En exceso

Tabla 8 Parámetros actuales de Operación, mesas concentradoras, distrito minero Vetas-California, 1998.

Diagnóstico

Las mesas Wilfley de la zona trabajan aceptablemente desde el punto de vista mecánico, pero son operadas en forma completamente deficiente. **Las mesas en operación funcionan con una sobrecarga de 100 %, con un exceso de agua hasta 10 veces mayor que el volumen aconsejable, sin clasificación por tamaños, con regulación defectuosa de variables de operación y sin la continuidad necesaria en la alimentación. Las mesas tienen una recuperación total (concentrados y medios) entre 65 y 75 %.**

5.1.3.3 Concentración en jig

Un jig efectúa la separación del mineral pesado de la ganga liviana en agua pulsante. Las corrientes pulsantes de agua ocasionan que una capa de partículas de mineral se levante y caiga sobre un cedazo, resultando una estratificación de las partículas por densidades, quedando el material liviano arriba y el pesado abajo [6][7][8].

La alimentación al compartimiento de separación es continua y en un punto adecuado se añade agua. Cuando tiene lugar la concentración, el material liviano y el agua dejan el compartimiento por rebalse, mientras que el concentrado pasa por un tamiz en el mínimo de cada pulso. La *Figura 14* explica el principio de funcionamiento del jig.

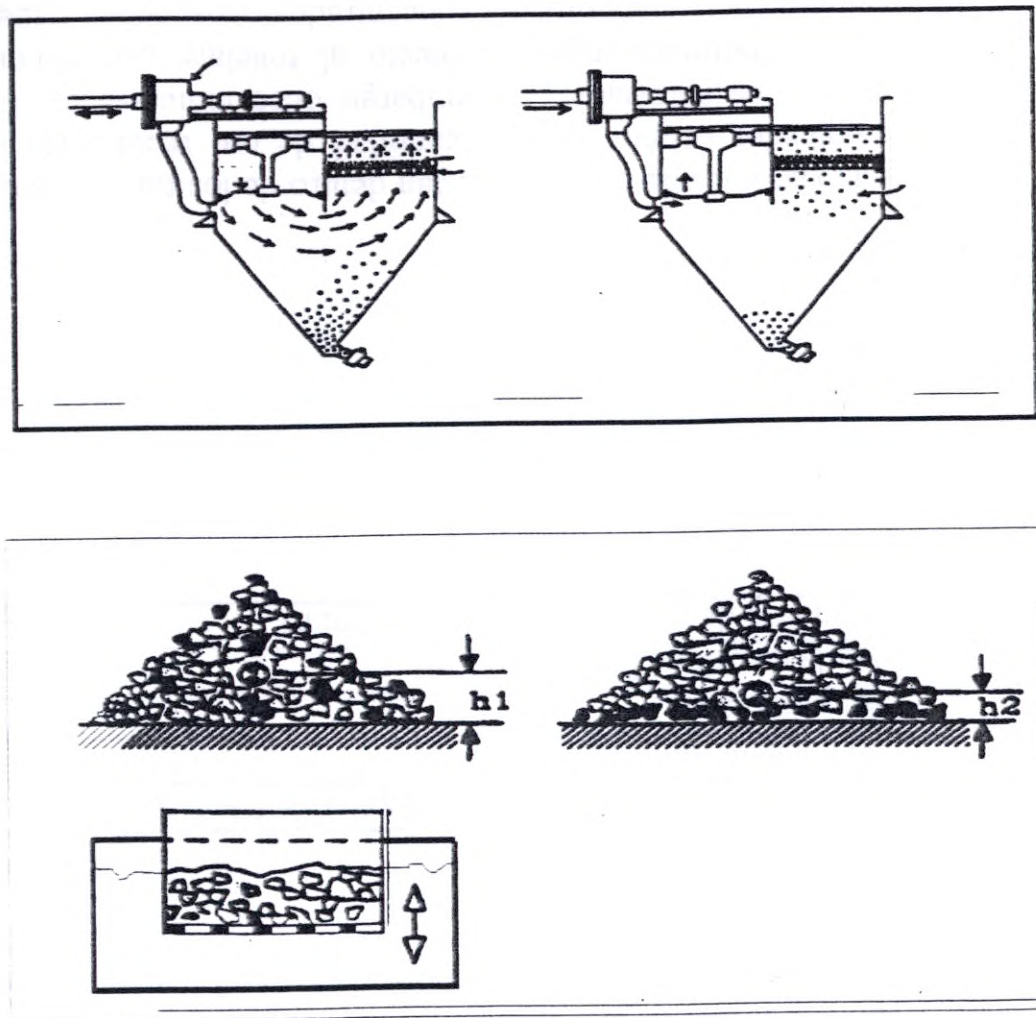


Figura 14 Funcionamiento del Jig. Arriba, ciclo de trabajo: pulsión (a) y succión (b). Abajo, ubicación del centro de gravedad de la cama antes (1) y después (2) del pulso, expansión de la cama durante la pulsión (3).

En la zona sólo se utilizan jigs en las plantas de beneficio de las minas "Reina de Oro" y "La Bodega". Debido a que en estas unidades el concentrado obtenido tiene elevados contenidos de oro, es lógico que estén bajo llave y no sea siempre posible el pesaje del producto, la toma de muestras y los aforos. Sin embargo, en base a los datos obtenidos por la brigada de campo del proyecto, parece ser que estos equipos cumplen el propósito técnico deseado. La *Tabla 9* muestra los parámetros de operación de un jig en la zona y los recomendados en la literatura [6] y por la práctica.

PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN UN JIG 4" x 12"	
Frecuencia (min ⁻¹)	198
Amplitud (mm)	10
Malla de criba (Tyler)	35
Diámetro de perdigones de plomo (mm)	7

Tabla 9 Parámetros de operación en un Jig del distrito minero Vetas-California, 1989.

Diagnóstico

Las variables de operación están dentro de los rangos usualmente empleados (*Tabla 9*) y la cantidad de oro recuperada de esta manera es apreciable, sin embargo debe indicarse que los jigs están subdimensionados respecto al tonelaje que tratan, y en consecuencia, para obtener concentrados ricos, deben trabajar con más agua adicional que la normalmente requerida, lo que dificulta el tratamiento posterior de los livianos en mesas ya que no se usan espesadores.

5.1.4 Amalgamación

En este capítulo, a los resultados de las plantas de beneficio, se incluyen en el análisis los obtenidos al estudiar las operaciones de 17 barrileros, quienes amalgaman mineral seleccionado ópticamente y escogido a mano.

Los concentrados de la separación gravimétrica o minerales ricos escogidos a mano, e inclusive minerales previamente amalgamados son remolidos y amalgamados en cilindros metálicos denominados "barriles" o "cocos". Son cilindros metálicos giratorios cargados con bolas de hierro o rodados ("Pebbles"), accionados por energía eléctrica o hidráulica. El material y agua son introducidos en el cilindro junto con una cantidad de mercurio no "activado"* dictada por experiencias personales y generalmente inadecuadas, puesto que el operador desconoce el tenor de oro recuperable por amalgamación en el material a tratar. Luego de un periodo de molienda que varía entre 3 y 24 horas, la pulpa resultante es descargada con un chorro de agua a un recipiente que sirve de trampa para el mercurio y la amalgama. En algunos casos se hace aplicación de un elutriador que recupera más mercurio que el recipiente trampa. **El mercurio que acompaña a las colas puede llegar a ser tan elevado que se acerca al 50% del mercurio originalmente introducido, dando una pérdida de hasta 20 g de mercurio por tonelada de carga alimentada a la planta. Esta cantidad es sorprendente y debe concedérsele especial atención porque pasa a contaminar el ambiente en su integridad.**

En la *Tabla 10* se presentan las condiciones de operación más frecuentes en las plantas y barrileros investigados y en la *Figura 15* una descripción esquemática de la forma de operar con los barriles en la zona

Las colas de los barriles pueden tomar caminos diversos: en ocasiones son descargadas a la corriente más próxima, en otras son devueltas al circuito, almacenadas por un tiempo y amalgamadas nuevamente, como en el Barril 17 de la *Tabla 10*, (durante un almacenamiento prolongado

* Se denomina "mercurio activado" al mercurio que por electrólisis de una solución de NaCl contiene algo de sodio. El sodio mejora la tensión superficial del mercurio haciendo que moje la superficie de contacto con otro cuerpo, además, al producir NaOH tiene un efecto de limpieza sobre una eventual existencia de grasa proveniente de la lubricación de equipos.

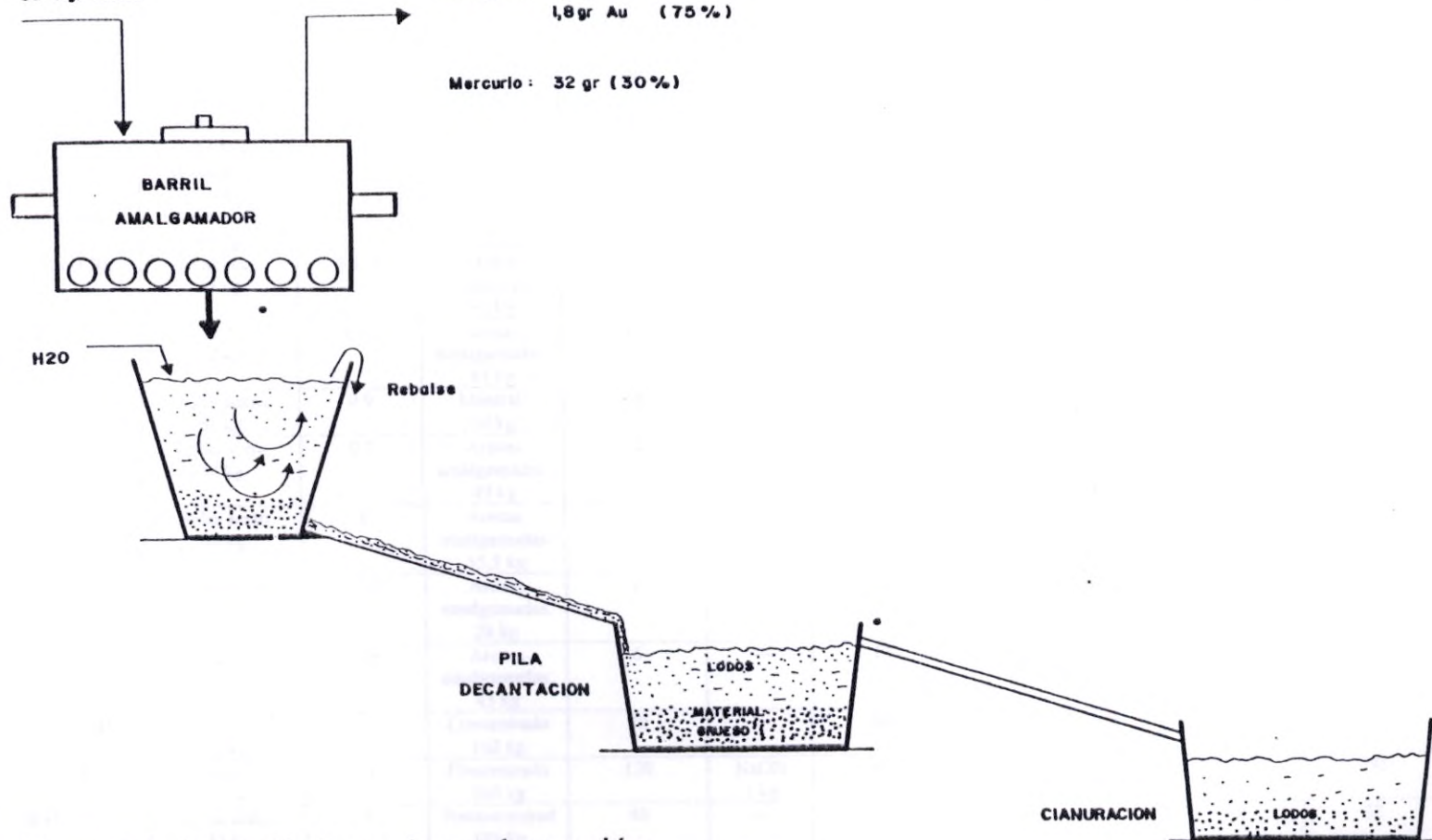
150 Kgr Min (16 gr Au/Ton.) : 2,4 gr Au

105 gr Hg

33 Kgr Bolas

Amalgama: 3,8 gr
1,8 gr Au (75%)

Mercurio : 32 gr (30%)



PARAMETROS OPERACION	
Dimensiones (m)	$\phi=0.47$ L=0.57
Velocidad (rpm)	68
Velocidad crítica	64
Tiempo	12

Figura 15. Procedimiento de amalgamación

OPERACIONES ESTUDIADAS	DIMENSIONES DXL (m)	CUERPOS MOLEADORES	VEL. DE ROTAC COMO % Vc	TIPO Y PESO DE CARGA PROMEDIO (kg)	VOLUMEN DE AGUA (l)	ADITIVO	MERCURIO ADICIONADO (g)	TIEMPO (hr)	MERCURIO EN LAS COLAS	AMALGAMA (g)	MERCURIO RECUPERADO (g)	DESTINO DE LAS COLAS
Barril N° 1	0,45 x 0,60	Bolas acero 45 kg	1,1	Mineral: 50 kg	42	Cal: 1 kg	50	2	34,2	3	15,8	Vertimiento
Barril N° 2	0,45 x 0,63	Bolas acero 29 kg	1,21	Mineral: 61 kg	30	---	35	3	18	0,9	17	Vertimiento
Barril N° 3	0,45 x 0,58	Bolas acero 33 kg	0,76	Mineral: 32 kg	24	---	20	2	4	0,7	16	Vertimiento
Barril N° 4	0,45 x 0,60	Bolas acero 28	1	Mineral: 59 kg	36	Chilco	15	3,5	6	3	9	Lavado en laberinto
Barril N° 5	0,45 x 0,64	Bolas acero 56 kg	1	Mineral: 47 kg	38	---	17	2	5	2	12	Vertimiento
Barril N° 6	0,34 x 0,56	Bolas acero 41 kg	0,87	Mineral: 38,5 kg	16	---	9,5	3,5	0,5	0,3	9	Vertimiento
Barril N° 7	0,41 x 0,48	Bolas acero 21 kg	1,25	Mineral: 45 kg	19	---	30	2,5	14	1	16	Vertimiento
Barril N° 8	0,45 x 0,6	Bolas acero 17 kg	1	Mineral: 94 kg	36	---	24,5	2,5	12,7	0,3	11,8	Cianuración
Barril N° 9	0,45 x 0,64	Bolas acero 37 kg	1	Mineral: 111 kg	42	---	25,8	1,5		1,4	18,4	Cianuración
Barril N° 10	0,45 x 0,60	Bolas acero 35 kg	0,9	Mineral: 94 kg	30	---	16,4	3	4,4	1,9	12	Cianuración
Barril N° 11	0,40 x 0,50	Bolas acero 34 kg	1,125	Arenas amalgamadas: 92 kg	4	---	6,8	12	4,6	3,9	2,2	Amalgamación Cianuración
Barril N° 12	0,40 x 0,50	Bolas acero 39 kg	1,16	Arenas amalgamadas: 81 kg	17	---	8,9	7	4,4	1	4,5	Amalgamación Cianuración
Barril N° 13	0,44 x 0,70	Bolas acero 61 kg	0,9	Mineral: 50 kg	28	---	10	4	6	1,05	4	Amalgamación Cianuración
Barril N° 14	0,33 x 0,60	Bolas acero 34 kg	0,7	Arenas amalgamadas: 49 kg	12	---	10	4	3,85	1	6,15	Amalgamación Cianuración
Barril N° 15	0,33 x 0,65	Bolas acero 40 kg	1	Arenas amalgamadas: 55,5 kg	3	---	51	3,5	7,1	7,3	43,9	Reproceso
Barril N° 16	0,25 x 0,39	Bolas acero 24 kg	0,95	Arenas amalgamadas: 28 kg	2	---	11,9	3	2,9	0,6	9	Reproceso
Barril N° 17	0,36 x 0,38	Bolas acero 29 kg	0,9	Arenas amalgamadas: 43 kg	6	---	12	5	Indet.	7	20,7	Cianuración
Planta 1	0,47 x 0,45	Bolas acero 50 kg	0,6	Concentrado 162 kg	30	---	400	10	200	---	200	Cianuración
Planta 2	0,72 x 0,66	Guijarros 70 k	0,6	Concentrado 760 kg	120	NaOH 1 kg	609	6	223	---	386	Reproceso
Planta 3	0,47 x 0,57	Bolas acero 33 kg	1	Preconcentrad 105 kg	40	---	105	12	73	3,8	32	Cianuración

Tabla 10. Operación de amalgamación en barrileros y en planta de beneficio.

la oxidación de los sulfuros puede liberar partículas de oro incluidas en ellos), o finalmente son sometidas a cianuración por percolación, ya sea en tinajas especiales o junto con las arenas a cianurar.

La amalgama separada de la pulpa es sometida a un lavado y luego prensada en un paño. La amalgama prensada es sometida a destilación de mercurio. La destilación de las amalgamas ("pelusas") en las plantas se realiza en retortas adecuadas. La cantidad de oro obtenida por amalgamación en las plantas de beneficio es cercana al 50 % del oro total recuperado en la planta.

Los barrileros, y los mineros chicos "quemán" sus amalgamas al aire libre. Cabe mencionar en este punto, que tanto mineros como barrileros conocen del uso de la retorta y de la toxicidad del mercurio y sin embargo corren el riesgo porque es incómodo y costoso utilizar la retorta para pequeñas cantidades de oro como un gramo o dos.

La operación de remolienda es simultánea a la amalgamación. Si bien esta manera de operar tiene como ventaja que superficies nuevas de oro sean expuestas al contacto con el mercurio, las desventajas son mayores.

Al moler y amalgamar simultáneamente, el mercurio es sometido a esfuerzos que conducen a la formación de diminutas gotas de este metal, tan finas que permanecen en suspensión, con escasa probabilidad de encontrar una partícula de oro y amalgamarse sobre ella. En este estado el mercurio no es recuperable en forma sencilla. Se denomina "harina de mercurio" y es la principal vía de contaminación.

Dada la elevada densidad de pulpa, tras un corto periodo de molienda (30 a 60 minutos), la pulpa adquiere las propiedades reológicas de un fluido de Bingham [11], es decir que se requiere superar un esfuerzo de corte definido para iniciar el movimiento de un cuerpo dentro de ese fluido. En consecuencia, las partículas de oro y las gotas de mercurio permanecen suspendidas en la pulpa, sin descender. Sólo el mercurio masivo tiene oportunidad de atrapar partículas gruesas de oro.

Puesto que los barriles trabajan a velocidades superiores a la velocidad crítica, los cuerpos molturantes y el mercurio permanecen adheridos a la solera del molino. La molienda no es efectiva en cuanto a energía y

Figura 10 Observación de comportamiento en retortas de los barrileros y mineros

Retorta	Temperatura (°C)	Presión (atm)	Material	Observaciones
Retorta 1	0.10 x 0.10	0.10	Mercurio	...
Retorta 2	0.15 x 0.15	0.15	Mercurio	...
Retorta 3	0.20 x 0.20	0.20	Mercurio	...
Retorta 4	0.25 x 0.25	0.25	Mercurio	...
Retorta 5	0.30 x 0.30	0.30	Mercurio	...
Retorta 6	0.35 x 0.35	0.35	Mercurio	...
Retorta 7	0.40 x 0.40	0.40	Mercurio	...
Retorta 8	0.45 x 0.45	0.45	Mercurio	...
Retorta 9	0.50 x 0.50	0.50	Mercurio	...
Retorta 10	0.55 x 0.55	0.55	Mercurio	...
Retorta 11	0.60 x 0.60	0.60	Mercurio	...
Retorta 12	0.65 x 0.65	0.65	Mercurio	...
Retorta 13	0.70 x 0.70	0.70	Mercurio	...
Retorta 14	0.75 x 0.75	0.75	Mercurio	...
Retorta 15	0.80 x 0.80	0.80	Mercurio	...
Retorta 16	0.85 x 0.85	0.85	Mercurio	...
Retorta 17	0.90 x 0.90	0.90	Mercurio	...
Retorta 18	0.95 x 0.95	0.95	Mercurio	...
Retorta 19	1.00 x 1.00	1.00	Mercurio	...

necesita mucho tiempo para llegar a la liberación, por otra parte no favorece la amalgamación, especialmente cuando se remuele durante lapsos de tiempo muy largos, produciendo finos y "harina de mercurio". La Figura 16 muestra la distribución granulométrica de la pulpa amalgamada.

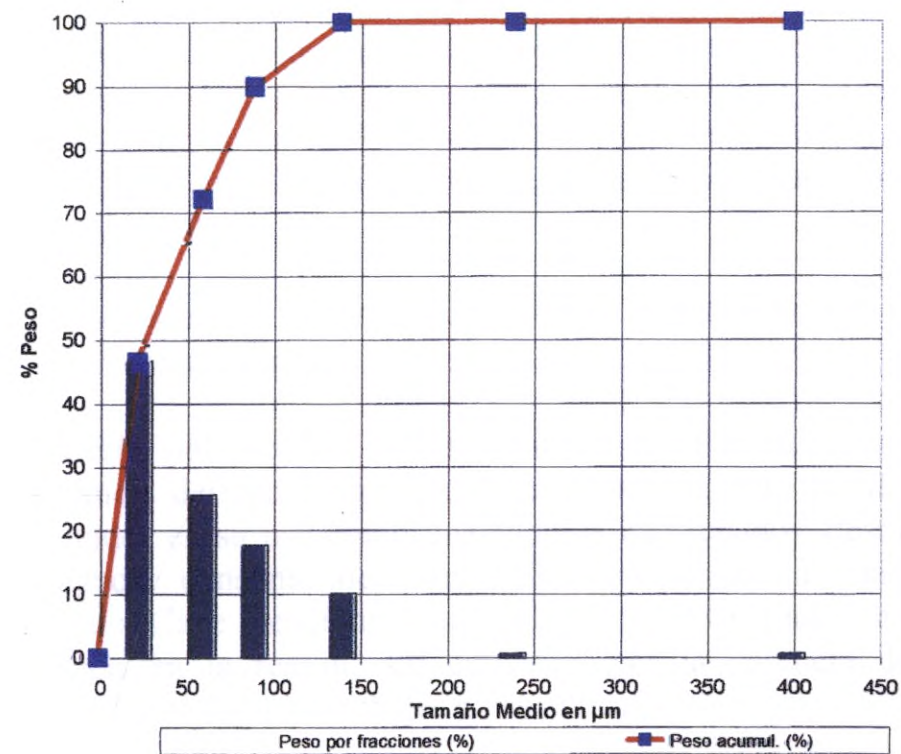


Figura 16. Distribución granulométrica de pulpa amalgamada, Barrilero, distrito minero Vetas-California, 1998.

Diagnóstico y recomendación

Las operaciones de amalgamación presentan deficiencias muy acentuadas, tanto en la recuperación del oro amalgamable como en las pérdidas de mercurio.

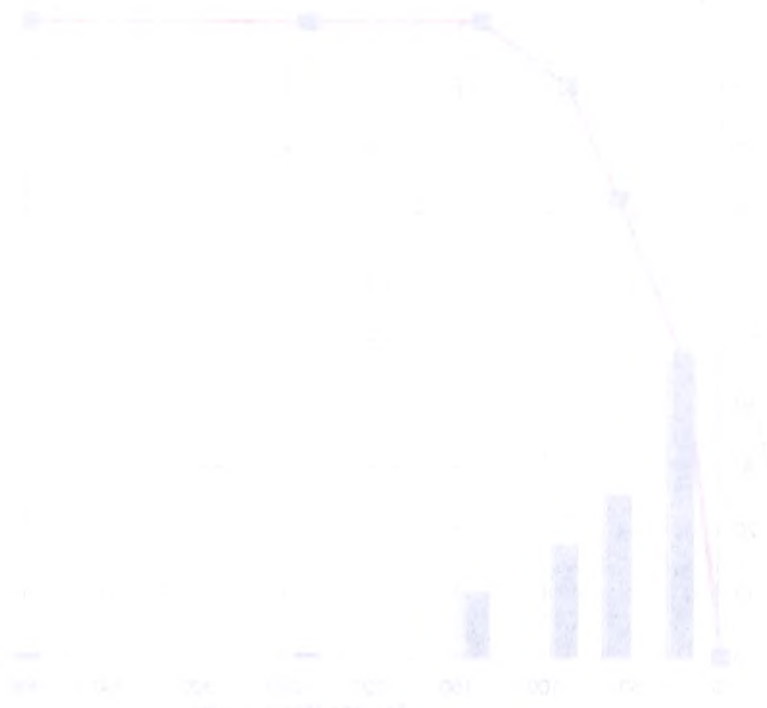
Las deficiencias son: molienda y amalgamación simultáneas, elevada densidad de pulpa, cantidad discrecional de mercurio, velocidad de rotación inadecuada, uso de mercurio no activado, cuerpos molidores que producen poco contacto y "harina de mercurio".

Para una mayor efectividad, remolienda y amalgamación deberían ser dos operaciones separadas temporalmente aunque se lleven a cabo en el mismo recipiente. La remolienda debería efectuarse con adecuada velocidad de rotación, entre 60 y 70% de la velocidad crítica.

Luego de la molienda se debería disminuir la cantidad de cuerpos moledores y agregar agua a la pulpa para reducir la viscosidad de la pulpa y, en caso de probarse la efectividad, también reactivos que disminuyan la viscosidad, como azúcar, panela, sales inorgánicas, tensoactivos. Es mejor amalgamar con barras o cadenas rígidas recubiertas de goma en lugar de bolas metálicas o rodados porque se incrementa la superficie de contacto, **la operación debería efectuarse a 10-15 rpm** [12].

Invariablemente se debería hacer uso de un elutriador para separar el mercurio de la pulpa [13].

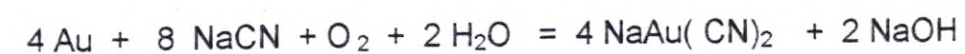
Se debería siempre usar retortas para la destilación de mercurio. La importancia del uso de las retortas es conocida, pero no se realiza por dificultades en su uso como quemadores inadecuados, destilación muy prolongada, consumo de combustible escaso en la zona y diseño incómodo. Cabe mencionar que también la activación del mercurio fue divulgada en la región, sin embargo, por la carencia de corriente continua en el lugar de trabajo, no se aplica.



Las operaciones de remolienda y amalgamación presentan diferencias muy importantes, tanto en la preparación del material como en las condiciones de trabajo.

5.1.5 Cianuración

La cianuración es el método de recuperación de oro actualmente más utilizado en el mundo y este año cumple un siglo de aplicación industrial. Se basa en la disolución de oro en forma de complejo cianurado en presencia de oxígeno según la siguiente reacción [14]:



El sistema empleado en la zona es el de percolación en tanques rectangulares de concreto, denominados tinajas. El material de alimentación -los medios de la mesa de concentración previamente desludados en un tanque adecuado al efecto- es mezclado con cal para alcanzar el pH de trabajo, y luego depositado manualmente en las tinajas de cianuración. En ocasiones cuando la oxidación de los sulfuros presentes en la carga ha generado acidez, antes del mezclado con cal se procede a un lavado con agua, con el objeto de disminuir el consumo de cal y de cianuro, así como para evitar la evolución de HCN. La adición de la solución lixivante se realiza por bombeo desde un tanque de almacenamiento de solución pobre. En el piso de la tina se encuentra un doble fondo cubierto por un medio filtrante. Cada tina está provista en una de sus paredes, de al menos dos orificios, uno tapado durante las operaciones, sobre el doble fondo, y que sirve para la descarga, y otro, más abajo, de donde la solución fluye por gravedad hacia las cajas de precipitación cargadas con virutas de zinc; allí el oro, la plata, el cobre y el mercurio disueltos se precipitan. La solución pobre es conducida al tanque de almacenamiento de solución pobre, de donde es recirculada a la tina una o dos veces por día. El proceso se repite durante 22 días, a cuyo término, las arenas de cianuración son descartadas a las corrientes de agua. El producto cementado se purifica de zinc, cobre y mercurio por vía húmeda o seca y se funde, dando un doré con diferentes proporciones de plata. La sección de cianuración por percolación de algunas plantas no tiene capacidad para tratar el tonelaje de material cianurable producido en la concentración gravimétrica.

La Figura 17 muestra una descripción gráfica de la operación.

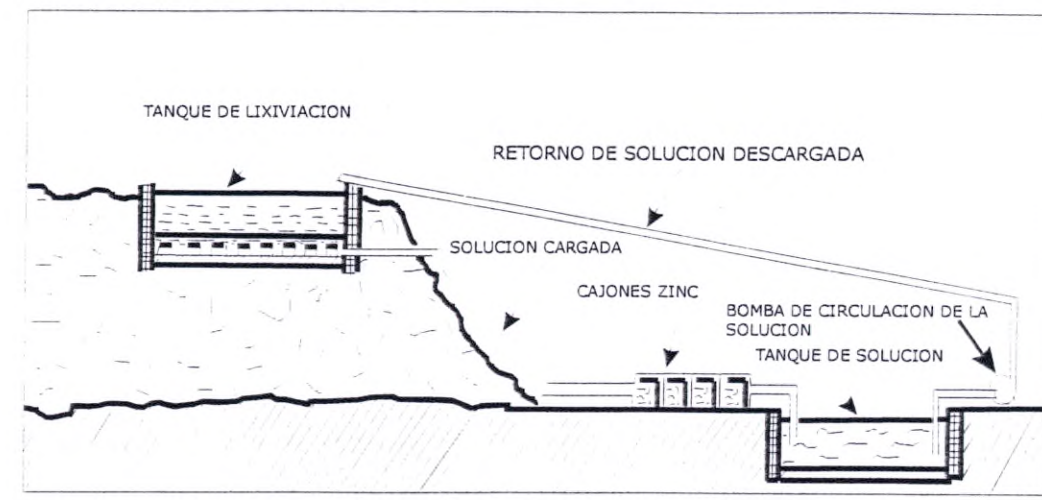


Figura 17 Sistema de Cianuración por Percolación, distrito minero Vetas-California, 1998.

La Figura 16, muestra un balance sencillo de la operación de cianuración. En la Tabla 11 se presentan los resultados analíticos de algunas soluciones de lixiviación ¡después de haber pasado por los "cajones de zinc"!

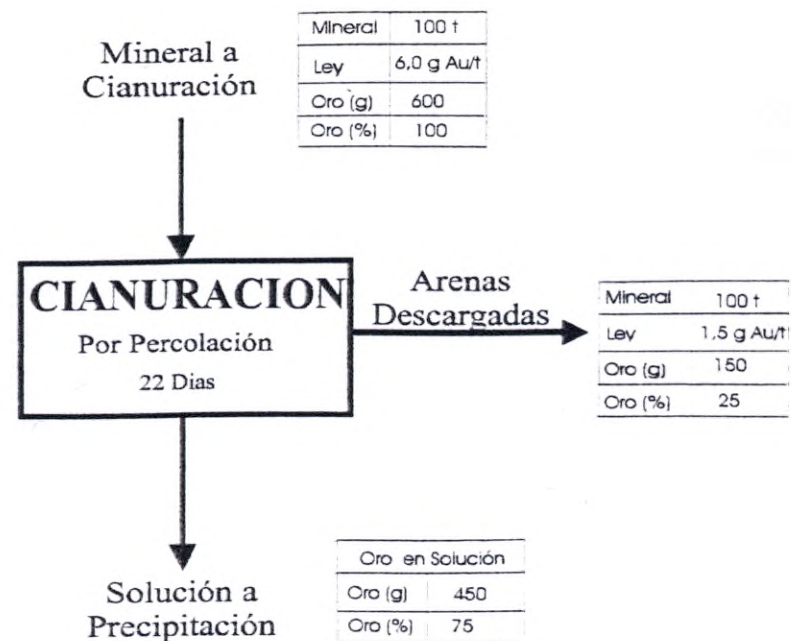


Figura 18. Balance de la operación de cianuración.

CONCENTRACIONES DE CIANURO Y METALES EN SOLUCIONES DE CIANURACIÓN DESCARGADAS							
PLANTA	CN Libre (mg/l)	CN Total (mg/l)	Au (mg/l)	Cd (mg/l)	Zn (mg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)
Planta 1	2240	5550	4.4	0.05	2780	3.8	1080
Planta 2	1736	1800	5.4	0.04	980	2525	107
Planta 3	2720	3560	5.3	0.04	2120	7.6	240
Planta 4	3120	4110	4.4	0.05	1780	11.7	680
Planta 5	3660	5850	13.5	0.08	3440	1.2	700

Tabla 11 Contenidos de cianuro y algunos metales en soluciones de cianuración, después de la precipitación de oro, Vetas-California, 1998.

Diagnóstico

Si bien la disposición de etapas es típica para micro-operaciones rentables en Latinoamérica y en Africa [12], es necesario indicar algunas deficiencias:

A fin de conseguir una adecuada porosidad en el material a percolar éste debe ser deslodado. En los lodos eliminados se pierden elevadas proporciones de oro, quedando a disposición material grueso con alto contenido de mixtos, donde el oro no siempre está expuesto, lo que ocasiona pérdidas. Se observó también la presencia en las arenas cianuradas de granos de oro parcialmente lixiviados, ratificando un reporte previo de microscopía de arenas cianuradas [15].

La reacción de oxidación de oro requiere de la presencia de oxígeno, sin embargo no existe un sistema que permita una aireación adecuada de la solución [16].

La velocidad del proceso de lixiviación, en este caso, está determinada tanto por la velocidad de reacción como por difusión, ya sea del oxígeno al punto de lixiviación, del acomplejante a la zona de oxidación o del producto al seno del fluido. En cualquier caso es necesario un cambio constante y rápido del fluido que forma la capa límite por solución nueva. Es decir, mientras mayor sea la velocidad del fluido alrededor de las partículas, más rápida será la lixiviación [17] (siempre que se pueda evitar la formación de canales).

La velocidad de lixiviación también depende de la velocidad de reacción, que a su vez es una función no lineal de la concentración de CN^- libre en la solución. La función tiene un máximo, esto significa que una concentración más alta que el valor del máximo tendrá como consecuencia una lixiviación más lenta!. Todas las soluciones muestran concentraciones de cianuro libre muy altas [17].

Los valores de pH registrados son menores a los necesarios para evitar la formación de HCN ($\text{pH} = 10$ a 10.5). El HCN no reacciona en la formación de complejos y, por tener una presión de vapor elevada, abandona la solución originando a su vez mayor formación de HCN a partir de iones CN^- y agua en busca de un equilibrio termodinámico [18].

Un pH mal regulado implica el incremento del riesgo de intoxicación por cianuro volátil y al mismo tiempo un desperdicio de reactivo [19].

El método empleado en la zona para la extracción de oro de la solución rica, si bien tiene amplia aplicación, no es el más adecuado. El prolongado tiempo de contacto entre la solución y la viruta de zinc produce la disolución de este metal, ocasionando pérdida tanto de zinc, como de cianuro.

Las soluciones, aún después de haber pasado por las virutas de zinc, tienen elevados valores de oro. Si se asume una concentración de 5 mg/l, en 10.000 l de solución habrían 50 g de oro inmovilizados. Las causas para la deficiente precipitación de oro sobre la viruta de zinc podrían ser el exceso de oxígeno en la solución ya que no se practica el desaireado al vacío, la pasivación de la superficie del zinc por formación de una capa aislante, o menos reactiva [20].

No se practica ningún método de eliminación del cianuro antes del vertimiento de residuos de la lixiviación al río.

Los minerales que acompañan al oro tienen diferentes efectos sobre la cianuración, algunos como la pirrotina y la calcosina son consumidores de cianuro, otros, como los sulfuros de antimonio o arsénico lo son de oxígeno, perturbando, de una manera u otra la lixiviación del oro. Esos minerales se encuentran en la mineralización tanto de la zona de Vetas como de California, en esta última zona en mayor abundancia, sin embargo, dadas las actuales condiciones de cianuración (durante el trabajo de campo), como no se cianuran los lodos ricos en sulfuros, la presencia de tales minerales no afecta en gran medida a la cianuración, aunque puede determinar la necesidad de emplear aditivos, un mayor consumo de cianuro, o variaciones en la operación.

En resumen, las operaciones de cianuración no son eficientes: no hay regulación de pH, la concentración de cianuro es mayor a la necesaria, no hay introducción adecuada de oxígeno, la relación líquido:sólido es pobre, muchas veces se lixivia material que contiene mercurio metálico, la alimentación suele contener oro grueso o no liberado.

5.2 Diagnóstico del flujo de materiales

En todas las minas visitadas se apreció la posibilidad de mejorar el flujo de materiales por reacondicionamiento del diagrama de flujo y control de operaciones. La carencia conceptual de flujos es evidente. Mientras en las plantas sencillas, la capacidad del conjunto operador-molino determina la capacidad de la planta; en las grandes, el problema es más complejo, por ejemplo: un molino que podría moler hasta 70 t/d de material suave, está en circuito con un jig subdimensionado, y la capacidad de la mesa siguiente sólo es capaz de tratar un tercio del material alimentado, o en otro caso, se tiene una mesa sobrecargada y una similar en stand by. En la línea de flujo, en ningún caso se tiene el fraccionamiento del material por tamaños, siendo que por principio, la separación gravimétrica trabaja bien sólo con material clasificado. Parece ser que el ensamble de las plantas fue el resultado de oportunidades de compra de equipos y no de una planificación y diseño de ingeniería. Este hecho se manifiesta en los resultados que sintetiza la *Tabla 12*.

RESUMEN DEL DIAGNÓSTICO SOBRE OPERACIONES DE BENEFICIO		
OPERACIÓN	DIAGNÓSTICO	INDICES**
Conminución		
Trituración	Aceptable	4 - 6
Molienda	Aceptable	
Molino Californiano	Aceptable. Alimentación irregular	135-1000
Molino de Bolas	Aceptable para cianuración por Agitación	1200
Clasificación	Inexistente	
Concentración Gravimétrica		
Jig	Mala	8
Mesa concentradora	Bien regulado excepto el agua Mal regulada, sin clasificación, exceso de agua, pérdida de finos ¡Sobrecarga! Regular. Cambios poco frecuentes	30 - 40 R=65-75 %
Amalgamación	Mala, molienda y amalgamación simultáneas, excesiva velocidad, enorme pérdida de mercurio	R=70-80 %
Cianuración	Mala, lenta, pH bajo, CN alto, sin aireación, poca solución, precipitación mala. No se tratan los residuos. Efluentes con mercurio.	R=60-80.%
Dimensionamiento y flujo	Deficiente. Plantas improvisadas. Cuellos de botella	
Manejo y Control	Malos	
Recuperación total	Mala a regular	R=50 -75 %

Tabla 12 Resumen del diagnóstico de operaciones de beneficio en el distrito minero Vetas-California (a marzo de 1998)

* Los índices más frecuentes para calificar operaciones son para la conminución la relación entre el tamaño de entrada y el tamaño de salida (generalmente se toma el tamaño medio o el tamaño que pasa 80% de los granos); para la concentración la razón entre la concentración de salida y la de la entrada y para todo proceso de separación, la recuperación, aquí R en %.

5.3 Aspectos generales que determinan la situación técnica del beneficio de oro en el distrito

Insuficiente mecanización

En la explotación minera de la región se desempeña gran proporción de trabajo manual pesado, especialmente en transporte de mineral y trituración manual. Esta situación, si bien resulta técnicamente deficiente, tiene como contrapartida un efecto social positivo considerable, por los puestos de trabajo que aseguran la subsistencia de la comunidad como tal y por la relación familiar que suele ligar a empleadores y empleados.

Escasa seguridad industrial

Existieron trabajos de capacitación en seguridad laboral por parte del estado, a pesar de ello el manejo del mercurio en general es deficiente desde el punto de vista de salud ocupacional. Sólo en las minas con alguna organización como "Reina de Oro" y "La Bodega" se maneja el mercurio con cierto cuidado. La mayor parte de los demás mineros realizan tanto el amalgamado en batea como el prensado de amalgamas con las manos desprotegidas, los barrileros, además, destilan el mercurio en circuito abierto.

Bajo nivel de entrenamiento

Los operadores manejan los equipos con que cuenta la planta casi intuitivamente, debe indicarse, empero, que las bateas son operadas con gran maestría.

Falta de conocimientos técnicos

En general el operador desconoce los principios técnicos que fundamentan el funcionamiento de sus equipos o de los procesos que emplea. Por lo general, si en la amalgamación un cierto mineral no da el resultado esperado, sencillamente es amalgamado con más mercurio y por más tiempo; de igual manera se da por cierta la relación lineal y directa (primer paso lógico del descubrimiento de una cadena causal) entre el oro recuperado y la concentración de cianuro en solución.

Con pocas excepciones (existen algunos ingenieros con formación en concentración de minerales), el minero de la zona no tiene la formación adecuada para realizar un espontáneo y efectivo cambio tecnológico.

Falta de manejo empresarial

En general, el manejo administrativo de las operaciones mineras dista mucho de tener un enfoque empresarial. Los propietarios de una mina no tienen por lo general la suficiente formación técnica o administrativa para tomar decisiones técnicas, administrativas o financieras, sin embargo no encargan la administración y la dirección técnica a entendidos; por otra parte, es frecuente que un determinado socio, en el periodo de control que le toca, regule los equipos según su criterio muy personal, que no necesariamente es el más acertado.

Insuficiencia crónica de capital

Al margen de que algunas minas puedan tener en ocasiones utilidades apreciables, en la minería de la zona parece ser habitual la falta de capital, tanto para operaciones y mantenimiento, como para inversiones.

Es frecuente, por ejemplo, que algún equipo no opere por falta de repuestos, o que el responsable deba improvisar soluciones (como cargar al molino cilindros de hierro cortados de una barra en lugar de bolas).

Un cambio tecnológico en las condiciones actuales tropezará con esta dificultad.

Problemas con compra de explosivos

La situación del país y particularmente de la zona, en relación a problemas de orden público, dificulta el oportuno acceso a este importante insumo.

Dificultades para compra de equipos

Si se pudiera suponer la existencia de capital y la voluntad de inversión, de todas maneras existiría el problema de conseguir en el mercado local

el equipo adecuado. Ninguna de las plantas trabaja con un tonelaje mayor a 60 t/d. La tecnología moderna rara vez ofrece equipos para microminería; sin embargo, la fabricación local de los equipos requeridos es factible. Por lo general, se adquieren maquinarias de segunda mano reacondicionadas.

Falta de capacidad técnica para la concepción del circuito, y para el dimensionamiento, planificación, montaje y optimización del equipo

Las minas tradicionales (aquellas que trabajan con molino californiano, bayetas, amalgamación y cianuración por percolación) no han llegado a optimizar el uso de los recursos técnicos con que cuentan (no regulan el tamaño de grano del producto, no cambian las bayetas en tiempos óptimos, muelen y amalgaman al mismo tiempo, etc.), y las minas en proceso de cambio de tecnología no han dimensionado, montado, ni optimizado sus equipos (la concentración gravimétrica está subdimensionada, se usa molino de bolas pero se continúa cianurando en tinas, etc.)

Carencia de espacio para disposición de residuos sólidos

La topografía de pendientes agudas y terreno ondulado hace dificultosa la habilitación de espacios destinados a la disposición de residuos. Es destacable la voluntad de los mineros de Vetas que consiguieron un terreno relativamente plano destinado a la formación de un dique de colas, aunque los costos de transporte y construcciones imposibiliten por el momento concretar la idea.

5.4 Apreciación global de la calidad de las aguas superficiales en la zona de estudio

A fin de observar la calidad de las aguas en ausencia de vertimientos, como si de pronto cesara la actividad minera, y como una referencia a los valores de inmisión, en octubre de 1998 se tomaron muestras en los puntos indicados en *Figura 19*, en lo posible, antes de descargas de contaminantes a la corriente. Dado que sólo un monitoreo continuado durante por lo menos un año meteorológico, con cuidadosas determinaciones de caudales podría dar resultados útiles para calcular masas y cargas, los resultados presentados a continuación, *Tabla 13*, no pueden ser concluyentes, sin embargo, son buenos indicadores para verificar la afectación de la calidad de las aguas por contaminantes derivados de la actividad minera pequeña.

Las aguas de los tramos no afectados por las labores mineras (Línea Base y Composición Química de Fondo) muestran una excelente calidad, perturbada solamente por contaminación bacteriana, de fácil eliminación. Las aguas de los puntos QA-1, QP-1, QV-1, SAL-1 y RVT-1 pueden ser potabilizadas con la simple purificación por coliformes. Conforme las aguas avanzan, la contaminación antropogénica derivada de las actividades en las minas se hace patente.

En todos los casos, las aguas originalmente puras, después de pasar por las minas, muestran valores de mercurio que las inhabilitan para consumo humano, ya sea como agua potable, agua segura e inclusive como agua cruda. No se realizaron análisis de especiación, y no se puede saber la forma de presentación de mercurio, sin embargo se presume que se trata de mercurio metálico muy fino, suspendido en el fluido y quizás removilizado de sedimentos por la turbulencia. Esto significaría que en algunos puntos del recorrido hay acumulación de este metal, al menos estacional.

Los resultados de los análisis de cianuro muestran un tramo afectado en la Quebrada La Baja, sin embargo, la acidez de las aguas - probablemente de origen pluvial-, la aireación obligada por la pendiente y el tortuoso recorrido, hacen presumir que la degradación de este tóxico sea más bien rápida [17]. Esta presunción se asienta además en

CODIGO DE MUESTRA	QA-1	QA-2	QP-1	QP-2	LB-0	LB-1	RV-2	RV-1-2	RV-1	QV-1	QV-2	SAL-1	SAL-2	SAL-3	RVT-1	RVT-2	RV-5	RS-1	RS-2
PARAMETRO																			
Temperatura del agua °C	9.1	10.2	11	11.1	11	14.4	13.8	14.5	18.1	10.9	11.5	12.1	11.8	12.5	10.1	11.7	12.5	17.9	18.7
pH (Unidades de pH)	6.6	6.7	6.8	6.4	6.3	7.2	7.3	6.9	7.0	7.1	4.3	7.2	5.2	5.7	6.2	7.0	7.1	7.3	7.3
Conductividad (µS/cm)	36.1	39.9	70.2	80.8	82	162	72.4	102.6	135.3	18.3	104.3	24.2	47.5	52.7	23.5	135.8	73	110.2	144.9
Turbiedad (NTU)	3	33	15	225	225	475	80	190	165	3	140	3	70	44	3	263	165	140	175
Sólidos totales (mg/l)	48	176	84	746	656	1330	306	630	544	76	976	120	394	360	96	1340	808	440	554
Sólidos Suspendedos (mg/l)	9	66	33	474	564	1068	224	448	290	10	512	9	214	208	16	598	536	272	330
Acidez (mg/l CaCO3)	3.1	3.5	4.3	4.9	3.7	4.5	2.9	3.1	3.1	2.0	21.6	2.4	6.8	3.7	3.1	4.1	3.9	2.7	2.7
Alcalinidad (mg/l CaCO3)	15.0	16.0	15.4	48.8	10.0	28.2	8.4	11.2	33.6	6.4	0	13.6	1.4	4.0	7.8	10.8	2.8	45.6	31.0
Dureza Total (mg/l CaCO3)	62	74	69	77	80	96	74	82	120	70	72	57	69	78	56	105	82	98	100
Dureza Cálcaica (mg/l CaCO3)	9	16	10	16	20	33	14	35	40	5	7	5	4	9	6	32	13	42	40
Nitrógeno Amoniacal (mg/l N)	0.41	0.47	0.48	0.39	0.32	0.29	0.8	0.62	0.22	0.12	0.05	0.14	0.12	0.08	0.13	0.06	0.1	0.37	0.28
Nitritos (mg/l N)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Nitratos (mg/l N)	0.02	0.09	0.05	0.14	0.08	N.D	N.D	N.D	N.D	0.37	0.87	0.16	1.16	0.44	0.13	0.48	0.37	N.D	0.16
Cloruros (mg/l Cl)	0	1.2	0	3.3	3.1	0	1.46	0	0	0	0	0	1.86	0	0	0	0	0	1.19
Sulfatos (mg/l SO4)	0	13.8	1.5	20.8	21.1	39.7	22.5	25.2	26.9	0.9	30.7	1.0	14.6	14.8	1.3	30.9	27.5	5.8	25.8
Cianuro Libre (mg/l CN)	N.D	0.009	0.008	N.D	N.D	8.20	0.01	1.02	0.46	N.D	0.006	N.D	0.004	N.D	N.D	0.056	0.014	N.D	1.36
Cianuro Total (mg/l CN)	0.009	0.014	0.01	0.015	0.01	9.80	0.016	1.25	0.53	N.D	0.024	N.D	0.012	N.D	N.D	0.064	0.025	N.D	1.45
Mercurio (µg/l Hg)	N.D	3.35	N.D	1.17	3.15	10.14	1.29	4.35	2.48	N.D	4.0	N.D	2.07	4.42	N.D	2.67	4.26	N.D	2.44
Zinc (mg/l Zn)	N.D	0.02	N.D	0.02	0.10	1.75	0.16	0.40	0.21	N.D	0.27	N.D	0.10	N.D	N.D	0.26	0.20	N.D	0.25
Cadmio (mg/l Cd)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Cobre (mg/l Cu)	N.D	0.25	N.D	0.20	0.46	3.20	0.04	0.63	0.44	N.D	0.06	N.D	0.02	0.03	N.D	N.D	0.05	N.D	1.08
Hierro (mg/l Fe)	0.08	0.77	0.28	2.06	3.62	2.84	2.85	2.35	2.25	0.14	3.98	0.23	2.47	2.89	0.25	10.3	5.5	1.22	1.29
Plomo (mg/l Pb)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	230	750	230	0	0	11000	0	4300	2300	36	0	430	36	36	4300	110000	4300	24000	11000
Coliformes Totales (NMP/100 ml)	430	750	230	0	230	11000	4300	4300	9300	430	910	2100	91	36	46000	240000	9300	24000	24000

Tabla 13. Análisis químico y bacteriológico de aguas superficiales en la cuenca del distrito minero Vetas-California

los bajos valores de cianuro libre y total del punto RV-1, cuyas aguas, por circunstancias de campo, fueron muestreadas durante una lluvia.

Debe indicarse además, que las aguas del Río Suratá, más abajo de la confluencia con el Río Vetás, RS-3, fueron muestreadas después de un vertimiento de arenas. Los valores de las concentraciones de cianuro expresan más que cualquier argumento.

Es notoria la relación entre la concentración de cianuro total y la concentración de cobre. Esta relación se hace más evidente cuando se observa la concentración de cobre en las soluciones de cianuración (*Tabla 11*). Esto muestra que los elevados contenidos de este metal se deben a las actividades de recuperación de oro.

La tendencia creciente de los valores analizados de sulfatos, conforme las corrientes van encontrando actividad minera, sugiere que ya se tienen incipientes manifestaciones de Drenaje Acido de Roca (DAR)*. La concentración de sulfatos es pequeña, porque en la zona no existen aún muchos depósitos de residuos minerales con sulfuros, sin embargo, si la explotación de oro en sulfuros crece, será necesario implementar sistemas de control del DAR, éste no solamente produce un descenso en los valores de pH, sino también moviliza iones de metales pesados y no metales tóxicos. Los iones de metales pesados, incluyendo al mercurio, tienen mayor posibilidad que átomos con valencia cero de combinarse con material orgánico para producir organometálicos. Las previsiones para la disposición segura de residuos minerales sólidos deben considerar esta circunstancia. Si se verifica la tendencia a incrementar la explotación de sulfuros portadores de oro, debe implementarse el control del Drenaje Acido de Mina (DAM)* [18], que eventualmente podría ser útil en la neutralización de vertimientos con cianuro.

Como apoyo técnico a la Autoridad Ambiental para la evaluación de impactos ambientales y categorización del problema por su magnitud y coincidiendo con el objetivo del proyecto: "Garantizar una fuente de

* Drenaje Acido de Roca (DAR) y Drenaje Acido de Mina (DAM), son términos internacionalmente adoptados para definir el drenaje que resulta de la oxidación natural de minerales sulfurosos contenidos en rocas expuestas a la acción del aire y del agua, fuera de la mina o dentro de ella. Los principales ingredientes en el proceso de drenaje ácido son sulfuros minerales, oxígeno y agua. Las reacciones de oxidación suelen acelerarse por actividad biológica y producen un pH bajo con potencial para movilizar metales pesados, ocasionando detrimentos en la calidad del agua del cuerpo receptor.

agua potable a la población de Bucaramanga y el área metropolitana...", es aconsejable un monitoreo sistemático de las corrientes afectadas, considerando las fases del ciclo climático, el posible efecto de lavado de las primeras lluvias después de un periodo de estiaje, así como la influencia de rápidos y remansos sobre la degradación o sedimentación de contaminantes. Aparentemente, según la *Figura 20*, donde se muestra la intensidad de las precipitaciones pluviales mes a mes durante varios años, sería suficiente un monitoreo trimestral en enero, abril, julio y octubre.

Los datos que hasta el presente genera la CDMB [19], y que son necesarios para el control de calidad de las aguas superficiales dentro de su jurisdicción, ratifican la tendencia general descrita por el muestreo del proyecto. La *Figura 19* proporciona una imagen cualitativa sobre la afectación de las aguas superficiales de la zona por el desarrollo inadecuado de las actividades mineras. El color azul representa a las aguas limpias, el rojo a las muy contaminadas y el naranja a las aguas que sufren la presencia de mercurio, cianuro o ambos.

VALORES ANUALES DE MERCURIO Y CIANURO EN EL RIO SURATA				
Año	Mercurio ($\mu\text{g/l Hg}$)		Cianuro (mg/l CN)	
	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio
1990	3.50	0.30	0.400	0.0075
1991	10.70	0.38	0.700	0.0090
1992	24.80	0.98	0.585	0.0096
1993	16.70	0.51	0.466	0.0024
1994	23.20	0.63	0.480	0.0058
1995	15.80	0.99	0.280	0.0050
1996	14.00	0.87	0.160	0.0032
1997	13.80	1.30	0.085	0.0020

Fuente: Informe Control de Calidad, 1997 CAMB E.S.P.

Tabla 14 *Valores anuales de mercurio y cianuro en el Río Surata, planta de tratamiento Bosconia*

Si bien los resultados anteriores son sólo indicativos, no puede ignorarse que aguas de muy buena calidad son alteradas por un inadecuado manejo de residuos de la pequeña minería y errores en los sistemas de

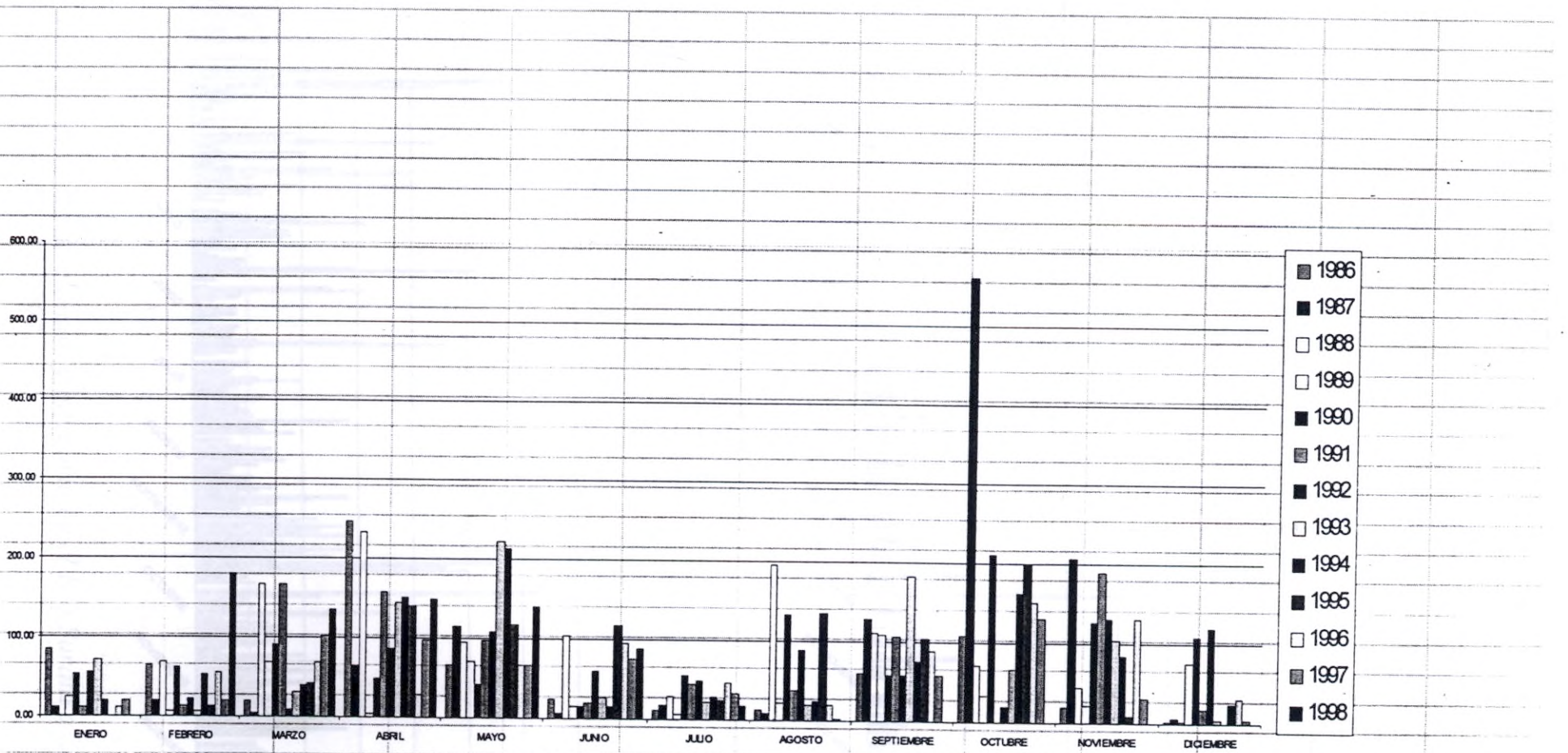


Figura 20. Precipitaciones pluviales anuales en la estación de Suratá.

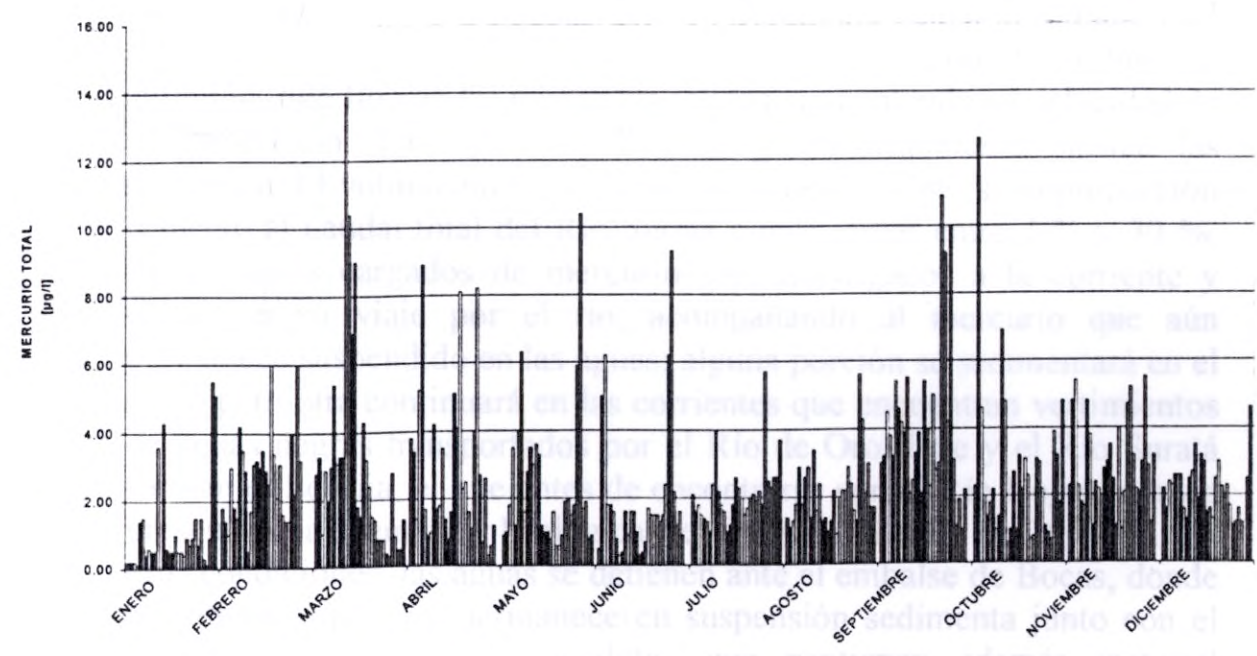
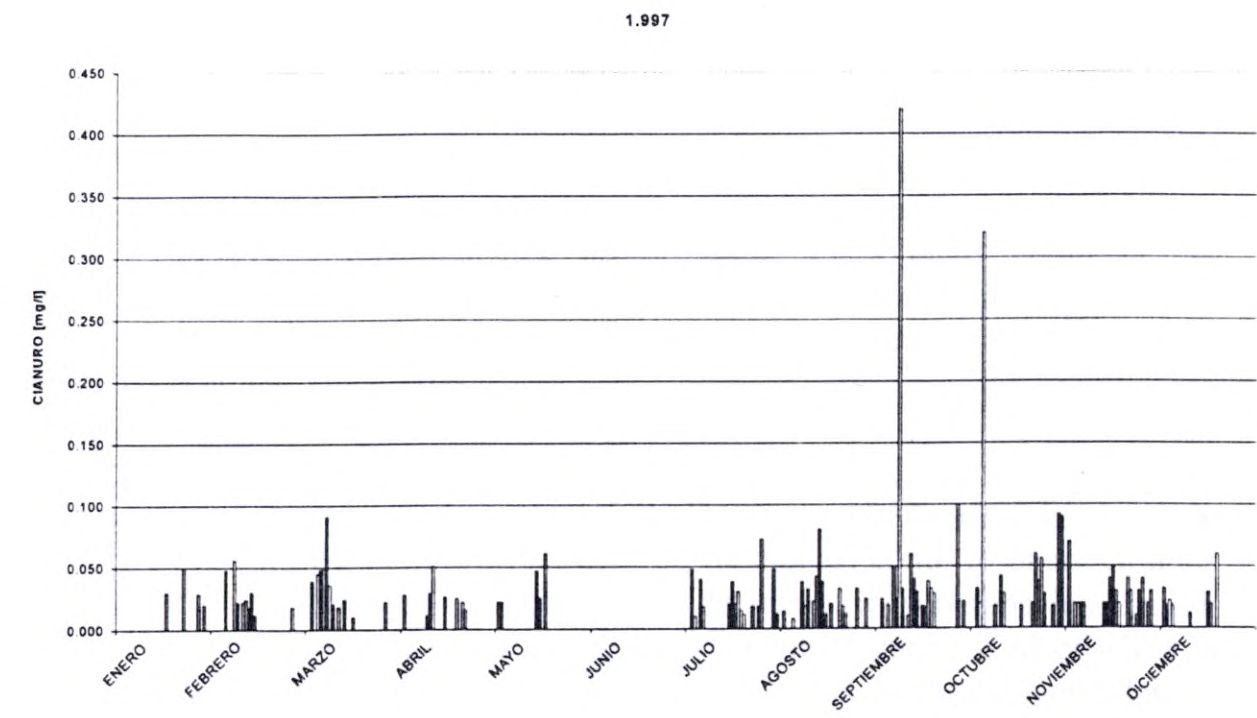


Figura 21. Valores máximos de cianuro y mercurio en el Río Suratá a la altura de Bosconia del año 1997.

producción de oro. Las consecuencias, debidamente documentadas como producto de un monitoreo adecuado, llevado a cabo por la CAMB, se reflejan en los registros de concentraciones de mercurio y cianuro de las aguas del Río Suratá a la altura de la planta de tratamiento Bosconia [20], *Tabla 14*.

En la *Tabla 14* y en la *Figura 21* se puede apreciar la tendencia creciente de la carga de mercurio, mientras la carga de cianuro disminuye gradualmente y no presenta tantos picos como la del mercurio. Esta positiva evolución en el caso del cianuro se debe a la programación y control de vertimientos que practica la CDMB respecto a las arenas cianuradas.

A pesar del incremento en las concentraciones de mercurio en el Río Suratá a la altura de la captación de Bosconia, el año 1997 la planta de tratamiento de la CAMB no dejó de funcionar, como lo hacía en años anteriores, cuando la concentración de mercurio superaba los $2 \mu\text{g/l}$. Como el mercurio, ya sea por estar finamente disperso o adsorbido a la superficie de arcillas activas, se encuentra en los sólidos suspendidos, es suficiente su remoción para obtener drásticos descensos en los **contenidos de mercurio, que técnicamente no están en el agua sino en los sólidos que la acompañan**, teniendo como resultado final, luego de un tratamiento convencional, un agua potable de excelente calidad. Actualmente, cuando las aguas del Río Suratá contienen más que $2 \mu\text{g/l}$ Hg, los sólidos suspendidos se eliminan por adición de sulfato de aluminio, que floccula las partículas sólidas, aumentando su velocidad de sedimentación. Las aguas se limpian y un tratamiento clásico las potabiliza. El volumen de agua potabilizada es de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, su proporción respecto al caudal total del Río Suratá puede variar entre 3 % y 30 %. Los flóculos cargados de mercurio son descargados a la corriente y continúan su viaje por el río, acompañando al mercurio que aún permanece suspendido en las aguas; alguna porción se sedimentará en el lecho pero otra continuará en las corrientes que encuentran vertimientos de aguas negras transportados por el Río de Oro. Este y el Río Suratá forman el Lebrija, el que antes de encontrarse con el Río Negro todavía presenta una Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) de 30 mg/l . En esas condiciones, las aguas se detienen ante el embalse de Bocas, donde el mercurio que aún permanece en suspensión sedimenta junto con el resto de los sólidos suspendidos que contienen además material orgánico. Están dadas las condiciones para la formación del peligroso

5.5 Contaminación ambiental por mercurio y cianuro

5.5.1 Contaminación por mercurio

5.5.1.1 Contaminación de las aguas superficiales

La contaminación de los recursos hídricos superficiales del distrito minero Vetas-California por mercurio puede ocurrir en forma directa o en forma indirecta.

Contaminación directa

La contaminación directa se da cuando el cuerpo receptor recibe la carga de contaminantes sin intermediarios naturales y sucede de diferentes maneras

1. La contaminación principal toma lugar con los lodos de la amalgamación. **El mercurio está en estado metálico y finamente dividido.** Se estima que hasta el 50 % del mercurio cargado al barril puede llegar al cuerpo receptor y es el mayor aporte contaminante. Es posible que la elevada presencia de sulfuros y el medio básico proporcionado por la adición de NaOH durante la amalgamación, o por la reacción del Na amalgamado, si se emplea mercurio activado, den lugar a la formación de iones sulfuro y éstos a sulfuro de mercurio, que tiene una solubilidad mínima y probablemente acompañe y rodee al mercurio metálico volviéndolo menos reactivo.
2. Existe también un aporte a la carga de mercurio en las soluciones de lixiviación gastadas o que acompañan a las arenas ya tratadas. **El mercurio está en estado de oxidación II y disuelto.** Es frecuente que colas de amalgamación sean cianuradas. En tales casos el mercurio se disuelve en forma de un complejo cianurado que permanece en solución hasta el cambio de las condiciones electroquímicas. En el proceso de cementación, por su posición en la serie electroquímica, el mercurio se deposita sobre las virutas de cinc acompañando al oro, a la plata y al cobre, aunque no cuantitativamente. **El mercurio residual en solución llega al cuerpo receptor en forma oxidada junto con los vertimientos de arenas.**

3. Eventualmente pueden existir soluciones resultantes del tratamiento de los precipitados, con mercurio disuelto. Los precipitados procedentes de los cajones de zinc son sometidos a purificación ya sea por vía húmeda o por vía seca. En el caso de la vía húmeda se someten los precipitados a la acción de un ácido que disuelve principalmente cinc, cobre y mercurio. Las soluciones se vierten al cuerpo receptor. **El mercurio en esos efluentes se encuentra oxidado.**

Si la purificación de precipitados se realiza por vía seca, **el mercurio es eliminado en forma de vapor metálico** y contamina las aguas en forma indirecta.

4. Cuando la mena contiene mercurio geogénico y es cianurada, también puede darse el caso de que el mercurio llegue al cuerpo receptor en forma oxidada y disuelta. Como caso anecdótico, una empresa que no realiza amalgamación, también produce contaminación por mercurio debido al contenido de este metal en la mena. El aporte del mercurio geogénico a la contaminación sería mayor a un 10 % de la carga total.

Contaminación indirecta

La contaminación indirecta de los recursos hídricos toma lugar en las a través de la atmósfera y del suelo en las siguientes situaciones:

1. Cuando se realiza la destilación de mercurio en circuito abierto a la atmósfera (sin retorta), los vapores de mercurio, por su elevado peso específico y su bajo punto de rocío se condensan sobre los primeros núcleos que encuentran. Las precipitaciones pluviales arrastran parte del mercurio al suelo y luego al cuerpo receptor. Investigaciones en áreas semejantes muestran que la dispersión del mercurio por vía atmosférica puede incrementar los valores de inmisión en suelo y biota en áreas tan alejadas como 50 km [24], e inclusive 110 km [25]
2. Los vapores de mercurio provenientes del tratamiento de precipitados corren la misma suerte que los vapores de destilación sin retorta.

3. La esponja de oro, producto de la amalgamación y destilación, contiene mercurio residual (hasta 20 g/kg) [26] que es evacuado a la atmósfera durante la fusión, con la misma suerte que los vapores indicados anteriormente. Si la esponja no es fundida en el lugar de producción, llega a las joyerías de Bucaramanga y el mercurio se libera en la ciudad.

Si los precipitados son comercializados sin tratamiento, el mercurio llega a las empresas fundidoras de Bucaramanga y sale del proceso, como en el anterior caso, en forma de vapores. La experiencia muestra que en estas circunstancias, el mercurio se deposita generalmente en las áreas próximas a la fundición [26].

De los argumentos anteriores se desprende que el **mercurio que contamina las aguas del Río Suratá por efecto de la pequeña minería se encuentra en estado metálico y en estado oxidado, parte del mercurio que sale del proceso llega a Bucaramanga con el metálico.**

Los valores de mercurio obtenidos de aguas del Río Suratá por la Compañía del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga muestran que valores altos de mercurio ($> 2 \mu\text{g/l}$) suelen coincidir con valores altos de turbidez ($> 1500 \text{ NTU}$) que se presentan en la época de lluvias. Esta observación condujo a la idea de que el mercurio contaminante se encuentra sólo al estado metálico y finamente dividido. Por otra parte, análisis de sedimentos de los ríos Vetas y La Baja muestran frecuentemente mayor contenido de mercurio en las fracciones granulométricas más finas. Al haberse comprobado la presencia de mercurio oxidado en las descargas contaminantes, se puede suponer que éste es adsorbido por el material arcilloso que ocasiona la turbidez, encontrándose, en consecuencia, en los granos más finos del sedimento que pueden ser movilizados cuando el agua cobra suficiente velocidad.

Según publicación de la CAMB [20], esta compañía habría encontrado soluciones al elevado contenido de mercurio en las aguas el año 1997 (aplicadas también el 1998, según información directa), un pretratamiento simple de floculación con sulfato de aluminio para la separación de sólidos suspendidos pondría a las aguas del Río Suratá dentro de la calidad de Agua Cruda potabilizable respecto al mercurio ($\text{Hg} < 2 \mu\text{g/l}$) y con tratamientos convencionales se garantizaría la

calidad del agua potable suministrada a Bucaramanga, sin paradas eventuales de la planta de Bosconia que trata las aguas del Río Suratá. (Antes del 1997, cuando las aguas presentaban valores de mercurio mayores a 2 µg/l la planta suspendía operaciones). Sin embargo, la tendencia de las concentraciones de mercurio en el Río Suratá es ascendente y podría ser que en algún momento la solución actual deje de ser efectiva.

Por otra parte, si bien el proyecto fue concebido en torno al saneamiento de las aguas del Río Suratá a fin de garantizar una fuente de agua potable para la ciudad de Bucaramanga, las aguas contaminadas por efecto de la pequeña minería en el distrito minero Vetas-California continúan su curso más allá de Bucaramanga, portando además los floculados resultantes del proceso de potabilización.

5.5.1.2 Contaminación de aire y suelos por mercurio

No se realizaron mediciones de mercurio ni en aire, ni en suelos, por no estar contempladas en el programa de actividades del proyecto. Sin embargo es pertinente indicar los siguientes aspectos:

La actividad minera aurífera en la zona tiene siglos de antigüedad y décadas de explotación continua con el uso de mercurio.

Los trabajos de barrileros, y algunas plantas de beneficio se realizan en zonas muy próximas a viviendas. Allí se destilan amalgamas sin ninguna protección ni del operador, ni del entorno inmediato.

La convergencia espacial y temporal de los factores anteriores en el "aquí y ahora", implica que algunos suelos de la zona se encuentran contaminados. Este aspecto puede ser de suma importancia para la población si se quiere dar al suelo algún uso productivo o de asentamiento humano. Además **es presumible que algunos suelos domésticos ya se encuentren contaminados y sea necesaria la remediación urgente.**

El mercurio está catalogado en Holanda entre las sustancias con potencial de daño probado a las funciones del suelo en zonas amplias, mientras que los cianuros corresponden a las sustancias con potencial

de daño comprobado de significación localizada [27]. El mercurio, además es un contaminante persistente en el sistema Suelo-Planta-Animal-Hombre.

Para la evaluación de la contaminación de suelos por sustancias inorgánicas, especialmente metales pesados, existe gran cantidad de publicaciones, que en la práctica podrían servir de referencia, sin embargo un punto de vista inmediato y comprensible es el basado en niños que pasan parte de su tiempo en actividades lúdicas sobre el suelo. Según la WHO (Organización Mundial de la Salud), la ingestión diaria permisible para mercurio es 0.71 µg/kg de peso corporal [28] y para metilmercurio sólo 0.47 µg/kg de peso corporal (Límites permisibles para metales pesados y sus compuestos, WHO, 1972, 1983, 1987) [29][30].

La ingestión oral de contaminantes contenidos en el suelo, por ejemplo: de jardines, campos deportivos, patios, huertas, es casi insignificante en el caso de adultos. Por el contrario, para niños que juegan al aire libre se debe contar con una ingestión por el vehículo de contacto mano-boca. Las cantidades que llegan al tracto digestivo pueden ascender a 10 g/d en niños de 1.5 a 3.5 años según el CDC de Atlanta (Center for Disease Control). La División de Control de Substancias Tóxicas del Departamento de Servicios de Salud de los Estados Unidos recomendó en 1989 tomar el valor de 0.6 g/d para niños menores de 6 años. Para estar dentro de un margen de seguridad, el Consejo de Expertos para Cuestiones Ambientales de la República Federal de Alemania, en el Informe Especial para Pasivos Ambientales de diciembre de 1989 recomienda tomar el valor de 1 g/d para niños en edad preescolar. Se recomienda también tomar en cuenta que un niño "pica" (que tiene la tendencia a comer tierra) puede ingerir hasta 10 g de suelo de una sola vez [31].

Con estos datos, y tomando como base de cálculo un niño de 10 kg de peso corporal, los suelos con una concentración de mercurio mayor a 7 mg/kg deben ser saneados, o al menos resguardados del acceso infantil.

Atendiendo a la argumentación anterior, los suelos sospechosos de contaminación con mercurio donde jueguen niños en edad preescolar deberían ser investigados. En caso positivo, la medida de remediación

más rápida y económica es la cobertura con asfalto o concreto, pero al menos se debería resguardar su acceso.

Por otra parte, el valor umbral de mercurio para suelos agrícolas es de 2 mg/kg, especialmente por su toxicidad sobre los humanos, aunque también posea zootoxicidad y cierta fitotoxicidad indirecta (al afectar el desarrollo bacterial en el substrato). El valor umbral para suelos agrícolas indica la concentración del contaminante por encima de la cual se deberá realizar una investigación sobre el contenido del contaminante en los cultivos. Es recomendable el análisis de algunos suelos agrícolas ubicados dentro de la pluma estimada según un modelo simple de Gaus, de la dirección e intensidad de los vientos.

5.5.2 Contaminación por cianuro

La contaminación de aguas superficiales con cianuro se debe exclusivamente a los vertimientos de residuos de cianuración. Cuando éstos se descargan al cuerpo receptor, las aguas son afectadas inmediatamente, sin embargo, la concentración de Cianuro disminuye rápidamente por degradación natural. Aparentemente se detectan concentraciones no permitidas de este reactivo, a la altura de Bucaramanga cuando se vierten simultáneamente residuos de más de una operación o cuando se descargan soluciones gastadas.

Los valores indicativos de inmisión en la zona minera presentados en la *Tabla 19* muestran valores de pH ácido, probablemente de origen pluvial, que pueden actuar positivamente en la neutralización de vertimientos de arenas cianuradas, desplazando el equilibrio CN/HCN hacia el ácido. El HCN, por su baja presión de vapor inicia el abandono del medio acuoso a valores de pH inferiores a 10.3 [32] incrementándose el paso a la fase gaseosa con el descenso del valor de pH. Este hecho indica que la contaminación por cianuro es más fácil de manejar que la contaminación por mercurio. El reemplazo de la amalgamación por una cianuración rápida puede ser una salida técnica al problema.

5.5.3 Calificación de aguas y suelos

Para realizar un juicio sobre un contaminante en aguas superficiales próximas a una fuente puntual no existen valores de orientación o de prueba que tengan validez general para cualquier lugar o para cualquier región, debido a las diferentes circunstancias geológicas, pero también porque las influencias antropogénicas en la fuente y fuera de ella determinan en gran medida la utilización posterior del agua. La Lista de Holanda es frecuentemente empleada como información básica de referencia para análisis de situaciones ambientales anómalas. No es una directriz absoluta, pero sus valores, tomados de la experiencia, sirven al menos como guía, así, la referencia holandesa para agua cruda coincide con la norma colombiana.

Por otra parte, los valores directrices alemanes para corrientes de Clase II, para potabilizar, indican entre muchos parámetros físicoquímicos que la concentración de mercurio debe ser menor o igual a $0,5 \mu\text{g/l}$ (LAWA, 1976), cuatro veces menos que el valor anteriormente indicado.

A --- Valor de referencia B --- Valor para investigación más profunda C --- Valor para saneamiento o para investigar necesidad del saneamiento						
Origen	Suelos (mg/kg de masa seca)			Agua potabilizable ($\mu\text{g/l}$)		
Sustancia/concentración	A	B	C	A	B	C
Mercurio	0.3	2	10	0.05	0.5	2
Cianuro libre	1	10	100	5	30	100
Cianuro total	5	50	500	10	50	200

Fuente: VROM NL, 1988 (Lista de Holanda, 1988)

Tabla 15 Mercurio y cianuro en la lista de Holanda

A pesar de lo indicado, la calidad de las aguas a potabilizar plantea una cuestión que no es puramente ambiental o legal, sino más bien técnica y económica. Mientras más contaminada el agua cruda, más costará potabilizarla por el mayor esfuerzo tecnológico. Sin embargo, el problema de la contaminación por mercurio en el Río Suratá no es solamente de costos o de esfuerzos para potabilizar sus aguas.

Se trata más bien de la evaluación del impacto ambiental derivado del mercurio y del cianuro.

Una fracción de las aguas del Río Suratá es tratada para la cobertura de aproximadamente 40% del requerimiento de agua potable en Bucaramanga. Los residuos de la purificación vuelven al río, la carga total se mantiene pero el caudal disminuye, hecho que presumiblemente afecta la calidad del agua corriente abajo. No existe una descripción actualizada de calidades de agua, según el curso del río, que determinen su uso para baño, pesca, riego, abrevado de ganado o aplicación industrial y la norma correspondiente aún no fue publicada.

Además de esta carencia, relacionada directamente con el uso del agua, se tiene la falta de información sobre valores de inmisión de mercurio, cianuro y otros elementos y sus efectos ecotoxicológicos sobre la biota acuática y terrestre de la región. Es necesaria la calificación de los suelos presuntamente afectados respecto a su contenido de mercurio. Este aspecto, si bien no corresponde al proyecto, puede ser de mucha importancia en la determinación de la afectación de la naturaleza y las medidas a tomar para protección de la población y de los recursos.

6 CONCLUSIONES

Las operaciones de recuperación de oro en el distrito minero Vetas-California pierden aproximadamente 30 % del oro que ingresa en la alimentación.

Las pérdidas se deben a la falta de regulación de operaciones, a desaprovechamiento de las oportunidades del propio equipo, a la discontinuidad de la alimentación, a no fijar parámetros adecuados de trabajo y mantenerlos, al inadecuado dimensionamiento de equipos y a la falta de un concepto cabal de flujos de material.

Las mayores pérdidas de oro están en los lodos. No es despreciable la pérdida en arenas cianuradas.

La mayor parte de las pérdidas en lodos se deben a la falta de clasificadores hidráulicos, espesadores, a la carencia de control de operaciones y al desconocimiento del flujo de materiales.

Las cuantiosas pérdidas de mercurio toman lugar en la descarga de los productos de amalgamación, el mercurio finamente dividido abandona el circuito con los lodos de la operación.

Si no lo abandona yendo directamente al río, es cianurado y luego se deposita sobre el zinc durante la precipitación de oro y es evacuado durante la limpieza de los materiales precipitados **o con las soluciones de cianuración que acompañan a las arenas ya tratadas.**

La cantidad de mercurio volatilizado sin retorta no es la más grande, sin embargo, por la manera de operar, es la que puede ocasionar los efectos más directos y fuertes sobre la salud de la población.

La cianuración no es operada técnicamente. Carece de todo tipo de control de operación. No se detoxifican ni vertimientos ni efluentes.

Las aguas puras de las nacientes se ven afectadas por la actividad minera sin técnica adecuada y la afectación no cesa en Bucaramanga.

Los problemas del Acueducto de Bucaramanga parecen minimizarse con el uso de la presedimentación. Los flóculos residuales deben disponerse en manera segura.

Es muy probable que el mercurio llegue a la represa de Bocas, donde habrían las condiciones para la formación de metilmercurio.

Debe comprobarse la contaminación de suelos, especialmente domésticos y donde se realizan actividades infantiles, tomar los recaudos necesarios. Se debe comprobar también si los suelos agrícolas irrigados por el Río Suratá han llegado al valor umbral.

Debe verificarse si existe incidencia de los contaminantes sobre la salud humana, y si la cadena trófica, incluido el hombre, se ha visto afectada.

Deben tomarse todas las medidas necesarias para que las comunidades mineras adopten técnicas adecuadas de amalgamación y destilación de mercurio. Con sólo esas medidas, la contaminación por mercurio puede reducirse sustancialmente.

Recomendaciones inmediatas para las operaciones

En general puede mejorarse el rendimiento de todas las plantas atendiendo los siguientes aspectos:

Evitar tiempos muertos

Los molinos californianos presentan, por la irregularidad de su alimentación, tiempos muertos que reducen la capacidad de la planta. Del mismo modo, las variaciones en la alimentación de las mesas no sólo dan como resultados tiempos muertos, sino también pérdidas de material.

El tiempo muerto originado en la acumulación de material para la amalgamación o tiempos en los cuales la solución lixiviante no circula por las tinas es una pérdida de ingresos.

Evitar la sobremolienda

En el caso de molinos de bolas, la molienda de material fino ya liberado, denominada sobremolienda, se puede reducir por adecuación del tamaño de grano alimentado, cambio en el número y cantidad de bolas, regulación del agua, de la forma de descarga y el adecuado manejo del clasificador de tornillo.

Para los molinos californianos la variable más influyente suele ser la cantidad de agua, pero el ritmo de alimentación y la frecuencia de golpe pueden ser muy relevantes.

Las soluciones son individuales para cada planta, dependen del equipo y del mineral a moler. Un operador capacitado debe ser capaz de resolver los problemas.

Aplicar la hidroclasificación

A pesar de ser el mejor método de preparación para la concentración gravimétrica, por sus ventajas técnicas, mantenimiento casi cero y costo bajo, la hidroclasificación no se aplica aún en la región.

Producir preconcentrados

La producción de preconcentrados es el mejor método de disminuir el volumen de material a tratar, ampliando así la capacidad de la planta de beneficio. En ocasiones, es preferible el descarte de material relativamente pobre con el fin de reducir la cantidad de mineral que ingresa a etapas intensivas y de buena recuperación, pero con unidades de poca capacidad. Sólo se practica la preconcentración en bayetas

Es mejor desechar mucho material grueso con poco oro, que poco material fino con mucho oro. Una mesa de finos bien regulada puede recuperar oro libre de hasta 25 micrones.

Clasificar el material a concentrar en mesas y usar espesadores.

Amalgamar adecuadamente, como se indica en el capítulo correspondiente. La modalidad de la amalgamación puede afectar considerablemente los resultados. A tiempo de mejorar la recuperación de oro se puede reducir la cantidad de mercurio empleado, la cantidad de mercurio finamente dividido y la cantidad de mercurio que va finalmente a cianuración, mediante la adopción de medidas sencillas como separar la remolienda de la amalgamación, amalgamar a velocidades muy bajas, a baja densidad de pulpa, con mercurio activado, **usar siempre un elutriador para separar mercurio y amalgama del resto del material y usar siempre retorta para destilar la amalgama**

(Es probable que una de las metas del proyecto se alcance en forma relativamente sencilla, cuando las operaciones de amalgamación en el distrito minero Vetas-California sean llevadas a cabo en forma adecuada: Remolienda sin mercurio a 60-70 % de la velocidad crítica. Disminución de bolas o cambio de ellas por pocas barras y adición de agua. Carga de mercurio activado en pequeña cantidad. Amalgamación a 10-15 rpm. De esta manera se recuperará más oro y se perderá menos mercurio).

Evitar la presencia de oro libre grueso o medio en los "medios" a cianurar.

La existencia de medios en concentración gravimétrica se debe a dos causas: a la poca selectividad de las mesas por mala operación y a la liberación incompleta. Si la separación gravimétrica fuese adecuada, los medios estarían constituidos solamente por materiales mixtos y las pérdidas en cianuración por existencia de oro no lixiviado en las arenas residuales disminuirían.

Aumentar en lo posible la frecuencia de bombeo de la solución cianurada.

Cianurar también los lodos.

El oro fino es difícil de amalgamar, pero su cianuración es más rápida que la del oro grueso. Se tendría una recuperación mayor de oro y de plata si se llegara a cianurar todo el oro medio y fino.

Recomendaciones generales

Las estrategias de lucha contra la contaminación del mercurio por su uso en la pequeña minería del oro tienen invariablemente acciones sucesivas comunes, que por sus éxitos en otras regiones, como Venezuela, Brasil y Zambia, así como Bolivia y Ecuador, deberían seguirse, buscando superarlas.

La primera acción es la prevención. Se trata de evitar por consenso la instalación o la expansión de prácticas mineras con efluentes de mercurio. Las tácticas para llegar a los involucrados pueden ir por la vía individual o sistémica. La vía individual se refiere a las campañas que van dirigidas a las personas en particular (folletos, afiches, etc.). La sistémica corresponde a la llegada institucional a grupos sociales. Se aplica en las escuelas, asociaciones, etc. y parte de las autoridades de gobierno.

La segunda acción toma lugar cuando la actividad minera ya tiene consecuencias en el medio ambiente y se trata de reducir las emisiones por vía sistémica o individual mediante una asistencia técnica que permita mejorar la recuperación de oro reduciendo la contaminación por mercurio, eso es mejorar los procesos existentes dentro de los criterios de desarrollo sostenible. A esta medida se debe unir el monitoreo

constante de agua y biota. Tanto operadores como autoridades deben reconocer que el mercurio es contaminante y no sólo un insumo necesario para recuperar oro aunque conlleva algunos riesgos.

Si el caso lo amerita, cuando el monitoreo muestra valores fuera de la norma, la tercera acción es la remediación, como cubrir o retirar y tratar pasivos ambientales, cubrir suelos contaminados, removilizar sedimentos, instalar sistemas de adsorción de mercurio en corrientes y además, clasificar aguas y suelos según la seguridad que presenten para su uso, el monitoreo debe realizarse intensivamente hasta comprobar una situación estable dentro de las normas, luego debe ser de control de cumplimiento de normas. El monitoreo permite decidir, por ejemplo, si es necesario tomar alguna acción respecto a los hábitos alimenticios de quienes se nutren con fauna acuática de zonas presuntamente contaminadas, cuándo y dónde las aguas sirven para riego o abrevado de ganado, etc.

Finalmente, se debe buscar la introducción de procesos tecnológicos alternativos a la amalgamación tradicional, como la flotación, la electrólisis en cloruro de sodio, la cianuración por agitación, el uso de placas amalgamadoras especiales con pérdida nula de mercurio, procesos gravimétricos especiales, combinaciones de procesos y otros. Siempre que se empleen correctamente, todas las técnicas tienen éxito en mayor o menor grado, dependiendo del mineral, del grado de preparación de los operadores, de la existencia de financiamiento. Más importante que variedad técnica de la solución es la disposición de los involucrados a cambiar y a invertir.

El proyecto trabaja solamente en las áreas de reducción de la contaminación e introducción de procesos alternativos. Sin embargo, los otros campos no deben dejarse de lado. Corresponde a los involucrados desarrollar, quizás alrededor del proyecto, un trabajo integral que no excluya ningún nivel. A través del presente diagnóstico se han mostrado los problemas. Las soluciones no sólo serán técnicas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bureau of Mines Cost Estimating System Handbook. Bureau of Mines Information Circular/1987 United States Department of the Interior, 1987
- [2] Agricola: "De Re Metallica" Editorial Potosí, Potosí, 1965]
- [3] Priester, M., Hentschel, T., Benthin, B.: Pequeña minería - Técnicas y Procesos. GATE, GTZ, Vieweg, 1992
- [4] Priester, M., Hentschel, T.: Technology and problems of smallscale mining in South America. Raw materials Report Vol 8 No 1, 1991
- [5] Gründer W.,: Aufbereitungskunde, Band II, Herman Hübener Verlag, Wilhelmshaven, 1963
- [6] Schubert, H.: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, VEB, Leipzig, 1967
- [7] Weiss, N.L.: SME Mineral Processing Handbook, AIME, Kingsport Press, Kingsport, 1985
- [8] Taggart, A.: Handbook of Ore Dressing, John Wiley & Sons, Inc. 1927
- [9] Vargas, J.: Metalurgia del Oro y de la Plata . Ed. Universitaria, Oruro, 1977
- [10] Wasmuth, D., Hahn, C.: Schaking Table with Hydraulic Drive - a New Approach to Well-Proven Gravimetric Separation Unit, KHD Humboldt Wedag AG Köln, XVII International Mineral Processing Congress, Dresden, 1991
- [11] Córdova, J.F.: Comportamiento reológico de pulpas., II Simposio Internacional del Estaño, La Paz, 1997
- [12] SADC, Small-Scale Mining Technology for SADC Member States, Lusaka, 1994, GTZ, Eschborn, 1994

- [13] MEDMIN, Manejo integrado del Medio Ambiente en la Pequeña Minería, Equipos y Métodos para la recuperación de oro, Guía Técnica, La Paz, 1996
- [14] Habashi, F.: Extractive Metallurgy, Vol 2, Hydrometallurgy; Gordon and Breach, New York, 1970
- [15] Pantorrilla, A.: Estudio Calcográfico de muestras de mena y arenas cianuradas S.M. La Bodega, 1996
- [16] Habashi, F.: Kinetics and Mechanism of Gold and Silver Dissolution in Cyanide Solution; Montana Bureau of Mines & Geology, Bull. 59, April, 1967
- [17] Day, E.L.: Some Factors influencing the Rate of Dissolution of Gold in Cyanide Solutions; Can. Min. Journal, August, 1967 p.55-60, Dec 1967]
- [18] Smith, A., Mudder, T.: Tratamiento de Residuos de Cianuración; Mining Journal Books, 1991
- [19] Gannon, D. G. : Toxicity of Cyanide Solutions, Proceedings from Cyanide and Gold Mining Industry Seminar, Environment, Canada Ottawa, Ontario, Jan, 1981
- [19A] Gonzalías, A.: Informes anuales de Monitoreo de Sedimentos y Control de Vertimientos, CDMB, Bucaramanga, 1995, 1996, 1997
- [20] Schnabel, C.: Handbuch der Metallhüttenkunde Band I. Julius Springer Verlag, Berlin 1900
- [20A] Pallares, J.: Informe Control de Calidad CAMB, 1997
- [21] Stokes, P., Wren, C.: Bioaccumulation of Mercury by Aquatic Biota in Hydroelectric Reservoirs, John Wiley, New York, 1987
- [22] Stummeyer, J., Wippermann, T., Zinner, H.-J., Harazim, B., Tacke, K.-D.: determination of total mercury and speciation of inorganic and organic mercury in river sediments of a gold mining area in Colombia, South America, BGR, Mercury as a Global Pollutant-Fourth International Conference, Hamburg, 1996
- [23] Wippermann, Th.: Reporte Interno BGR-Proyecto Río Suratá, 1995

- [24] Hacon, S., De Casia, M., Alves, R., *et al.*: Atmospheric dispersion of mercury in the Amazon Basin, Mercury as a Global Pollutant-Fourth International Conference, Hamburg, 1996
- [25] Tümpling, Jr., W. Von, Wilken, R.-D., Einax, J.: Mercury deposition resulting from the setting on fire of the grasslands - Estimation of the total annual mercury deposition of the tropical northern Pantanal region, Central Brazil, Mercury as a Global Pollutant-Fourth International Conference, Hamburg, 1996
- [26] Veiga, M.: Introducing New Technologies for Abatement of Global Mercury Pollution in Latin America, Rio de Janeiro UNIDO/UBC/CETEM/CNPq, 1977
- [27] Moen, J. E. T., Bodenschutz in den Niederlanden, TNO/BMFT-Kongress Altlastensanierung; Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, Bd. 2, 1988
- [28] WHO (World Health Organisation): Evaluation of Certain Food Additives and the Contaminants Mercury, Lead and Cadmium, 16th Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives; Geneva, WHO Tech. Rep. Ser. 505, 1972
- [29] WHO (World Health Organisation): Evaluation of Certain Food Additives and the Contaminants Mercury, Lead and Cadmium, 27th Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives; Geneva, WHO Tech. Rep. Ser. 609, 1983
- [30] WHO (World Health Organisation): Evaluation of Certain Food Additives and the Contaminants Mercury, Lead and Cadmium, 30th Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives; Geneva, WHO Tech. Cambridge, Cambridge University Press, 1987
- [31] Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen: Altlasten, Sondergutachten 1989, Metzler-Poeschel Stuttgart, 1990

[32] Finkelstein, N. P.: The Chemistry of the Extraction of Gold from its Ores, Gold Metallurgy in South Africa, Ch. 1°, Adamson, Chamber of Mines of South Africa, Johannesburg, 1972

AGRADECIMIENTOS

Quienes trabajamos en el Proyecto "Reducción de la Contaminación Ambiental debida a la Pequeña Minería en la Cuenca del Río Suratá" agradecemos al Instituto de Geociencias y Recursos Naturales de la República Federal de Alemania (BGR), al Convenio Interadministrativo dirigido por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, y compuesto además por la Compañía del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga E.S.P, el Ministerio de Minas y Energía (Regional Bucaramanga) y la Gobernación de Santander, a las autoridades de los municipios de Vetás y California y a sus comunidades mineras por haber hecho posible el trabajo cuyos resultados se presentan.

Especial mención merecen los propietarios de las sociedades mineras "La Bodega", "Reina de Oro", "La Providencia", "La Plata" y "El Cuatro"; los barrileros que facilitaron mediciones y pruebas, así como el Laboratorio Químico de la CDMB por toda la colaboración prestada.

Nuestro reconocimiento a los miembros del Comité Técnico que con sus aportes individuales y colectivos estimularon el trabajo del Proyecto y a todas las personas que directa o indirectamente participan en actividades de apoyo técnico a los mineros y de defensa del medio ambiente y nos dieron su apoyo.

Participaron en la elaboración del presente informe:

Lothar Hahn, Codirector del Proyecto Geólogo (BGR)

José Fernando Córdova, Experto Metalurgia y Medio Ambiente (Editor/BGR)

Erwin Wolff, Coordinador Técnico Geólogo (CDMB)

Juan Manuel Pinzón, Ingeniero Metalurgista (CDMB)

Orlando Landazábal, Técnico Metalurgista (CDMB)

Johnier Quintero, Técnico Químico (CDMB)

John Jairo Gómez, Ingeniero de Sistemas (CDMB)

Lina María Gómez, Secretaria Diagramadora (CDMB/BGR)

Proyecto reducción de la contaminación ambiental debida a la pequeña mineria en la cuenca del rio Surata: etapa de diagnostico/Informe operaciones de beneficio/Cooperación Técnica

338.2 C778p Ej.1

CATALOGADO POR: HELP FILE LTDA

FECHA

FECHA

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA



01004929

BIBLIOTECA