



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Mecánica**



“USO DE BOLAS DE PIEDRA PARA UN MOLINO DE  
BOLAS EN PRODUCCION AURIFERA”

**REPORTE TECNICO**

Previo a la obtención del Título de:  
**INGENIERO MECANICO**

Presentado por:

**Alejandro Marcel Pazos Navarro**

Guayaquil - Ecuador

1989

AGRADECIMIENTO

Al ING. IGNACIO WIESNER F.  
Director de Proyecto, por  
su ayuda y colaboración pa  
ra la realización de este  
trabajo.

DEDICATORIA

A MIS PADRES, que siempre me apoyaron con su espíritu del bien para que triunfe en todos los campos de la vida.

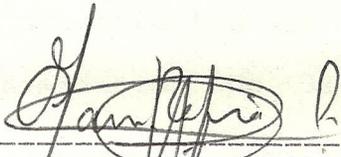
A MIS HIJOS, Patricia, Pilar y Marcel, se ha cumplido un anhelo.

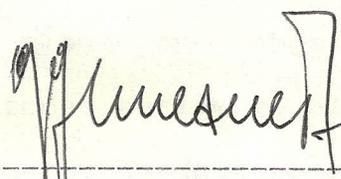
DECLARACION EXPRESA

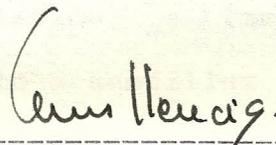
" La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas  
expuestos en este Proyecto, me corresponden  
exclusivamente; y, el patrimonio intelectual del mismo, a  
la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la  
ESPOL).

  
-----  
Alejandro Marcel Pazos Navarro

  
-----  
Ing. Marcos Tapia Q.  
SUBDECANO

  
-----  
Ing. Ignacio Wiesner F.  
DIRECTOR PROYECTO

  
-----  
Ing. Alberto Torres  
MIEMBRO TRIBUNAL

## RESUMEN

El presente trabajo investigativo tiene por objeto la optimización de la molienda en zonas auríferas al más bajo costo de producción y más altos resultados, para tal efecto, se realiza en primer lugar una selección del molino, se seleccionó un molino de bolas en base a un análisis de eficiencia de molienda con diferentes tipos de molinos, porque fue el que ofreció mayores ventajas para el tipo de inversión que se proyectó para este informe.

Luego se seleccionó las bolas de piedras para el molino de bolas, en relación a las grandes ventajas y desventajas en cuanto a sencillez y condiciones precarias de la instalación que se podría montar en la zona de explotación.

En la selección de las bolas de piedra para los molinos se tomó en cuenta el hecho de que existe una Producción Nacional muy limitada de BOLAS DE HIERRO O ACERO, y además, la producción de bolas de metal es muy costosa, y por ende los productos son caros.

## INDICE GENERAL

RESUMEN

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS

### 1.- ANTECEDENTES

- 1.1. Proceso artesanal para beneficio en zonas auríferas..... 9
- 1.2. Proceso de molienda usadas para liberación de oro..... 12

### 2.- DEFINICION DEL PROBLEMA

- 2.1. Capacidades típicas de molinos existentes.... 16
- 2.2. Análisis de eficiencias de molienda con diferentes tipos de molinos..... 21
- 2.3. Selección de molino..... 23
- 2.4. Características generales y de operación de los molinos de bolas..... 33
- 2.5. Requerimientos técnicos de los materiales de las bolas..... 36
- 2.6. Uso de bolas de piedra en molinos de bolas... 40
- 2.7. Comparación de rendimiento de molinos con uso de bolas de diferentes materiales..... 42
- 2.8. Resultados..... 43

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 45

APENDICES..... 53

BIBLIOGRAFIA..... 57

## INDICE DE FIGURAS

- Fig. 1.- Instalación clásica en el medio donde se muestra el proceso artesanal.
- Fig. 2.- Molino vasija.
- Fig. 3.- Molino de 6 pizones, movido por energía hidráulica.
- Fig. 4.- Molino Chileno.
- Fig. 5.- Molino de un compartimiento.
- Fig. 6.- Molino de tubos de tres compartimientos.
- Fig. 7.- Molino de bolas de un compartimiento usado en Ecuagausa.
- Fig. 8.- Molino de bolas y clasificador.
- Fig. 9.- Efecto en cascada de la carga de bolas en función del grado de llenado y de la velocidad crítica.
- Fig. 10. Ubicación de la carga para un molino tubular.
- Fig. 11. Molino de bolas en funcionamiento.
- Fig. 12. Llenado de bolas correctamente.
- Fig. 13. Molino de pizones y sistema de carga.
- Fig. 14. Molino Chileno y sistema de descarga.
- Fig. 15. Fuerza hidráulica utilizada en molino de pizones.
- Fig. 16. Transporte de mineral.
- Fig. 17. Transportación mecánica del mineral.
- Fig. 18. Piscinas de relaves con Leyes de 10 a 12 gr/ton.

## CAPITULO I

### ANTECEDENTES

#### 1.1. PROCESO ARTESANAL PARA BENEFICIO EN ZONAS AURIFERAS

Siendo nuestro país muy rico en metales preciosos como el ORO, PLATA, etc., con contenido de metales como el COBRE Y OTROS, ha hecho que mucha gente trabaje en una forma rudimentaria y peligrosa.

En Ecuador existen tres zonas principales de producción aurífera: NAMBIA, LA PARTE ALTA DE LA PROVINCIA DE EL ORO, ZARUMA, PORTOVELD, PADCHA, MINAS NUEVAS, PONCE ENRIQUEZ en la Cordillera Occidental del AZUAY.

En estas zonas principales, los equipos usados para la molienda también son muy diferentes como veremos más adelante; esto es, en gran parte producto de la topografía del terreno, lo difícil del acceso y la falta de apoyo económico y técnico de parte de las instituciones bancarias, financieras y gubernamentales afines con el desarrollo de los recursos naturales del país.

A continuación se presenta un diagrama de bloques que resume el proceso de producción artesanal tal como se ha podido establecer en una exploración de los sitios de trabajo antes mencionados.

Se presenta en la figura 1, una instalación clásica en el medio; en la misma se muestra el proceso

artesanal.

En el apéndice A se define algunos términos utilizados en esta Tesis.

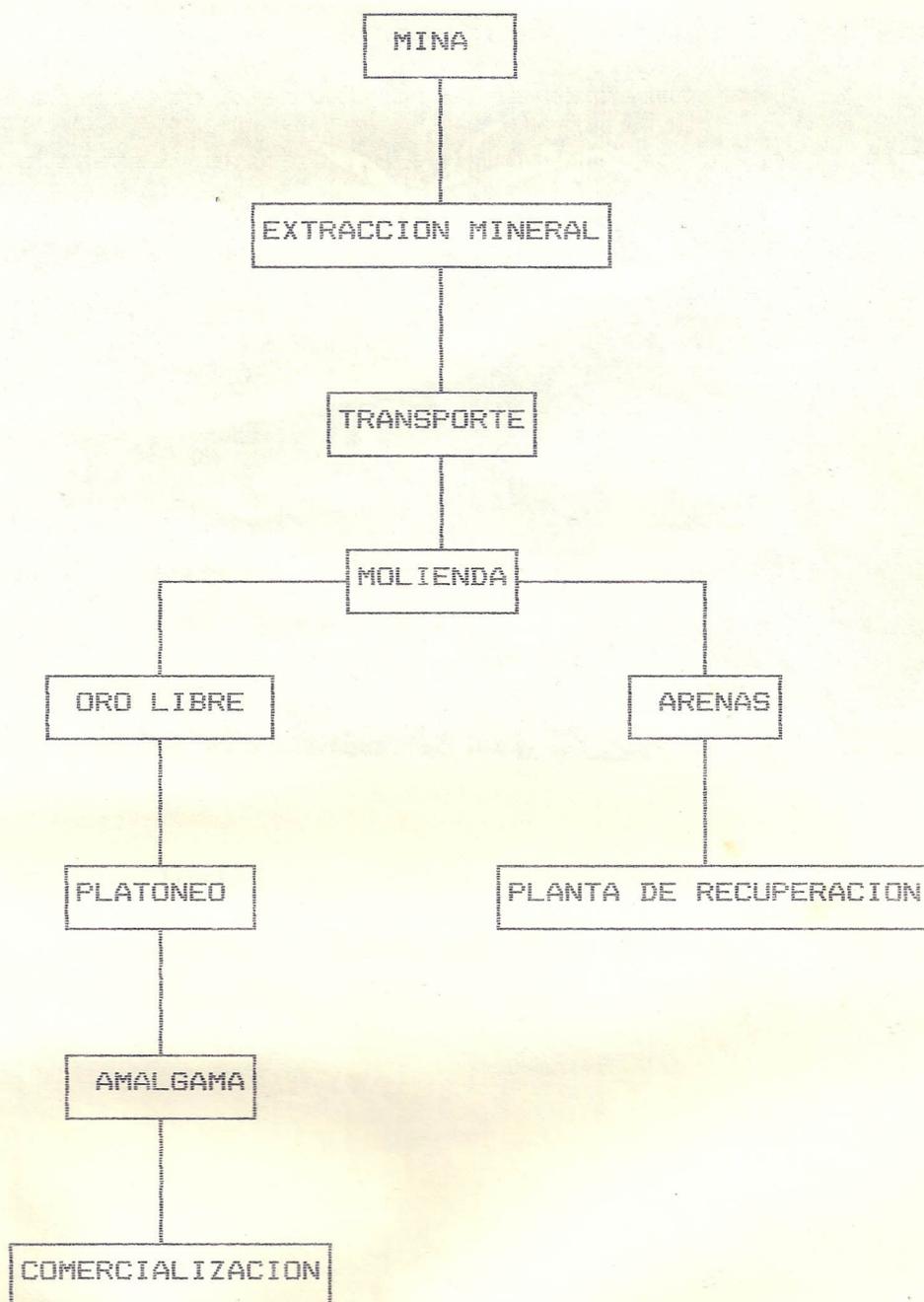


DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE PRODUCCION ARTESANAL.

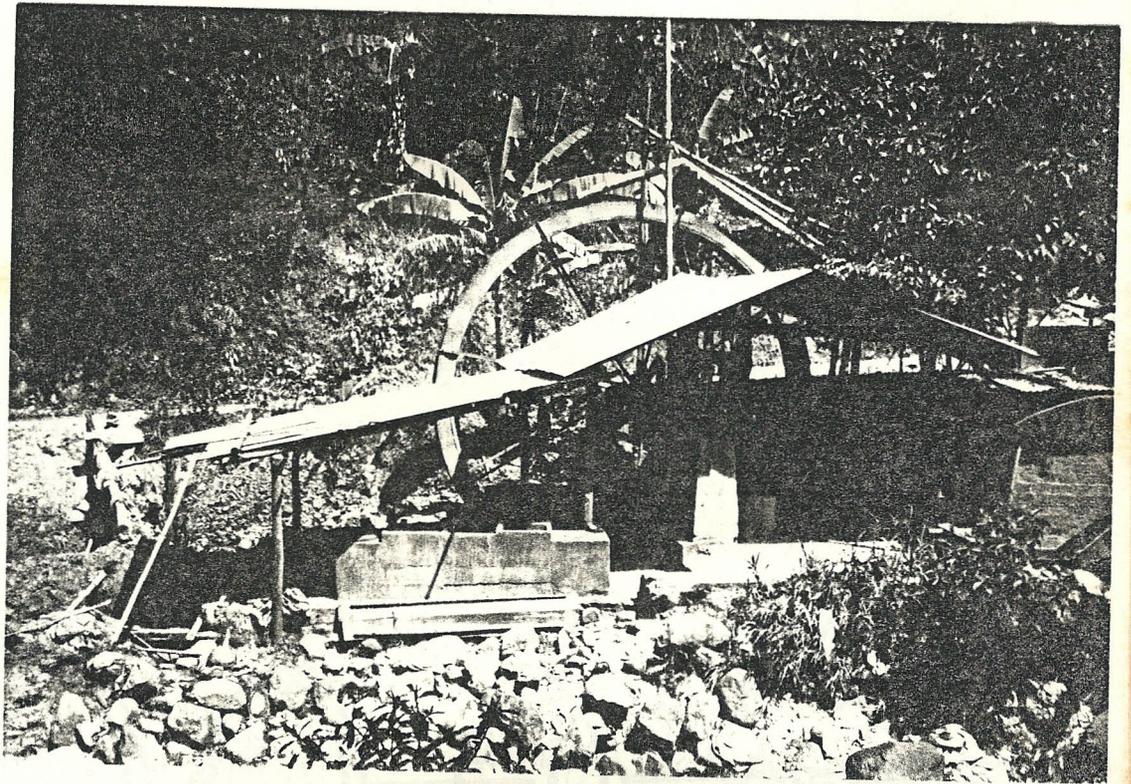


Fig. 1.- Instalación clásica en el medio; donde se muestra el proceso ARTESANAL.

1.2. PROCESO DE MOLIENDA USADOS PARA LIBERACION DE ORO.

DESARROLLO HISTORICO

Ha pasado mucho tiempo desde la época en que los Romanos hacían la molienda en vasija, hasta lograr los sistemas modernos de molienda con capacidades de 400-500 ton/h. Ver figura 2.

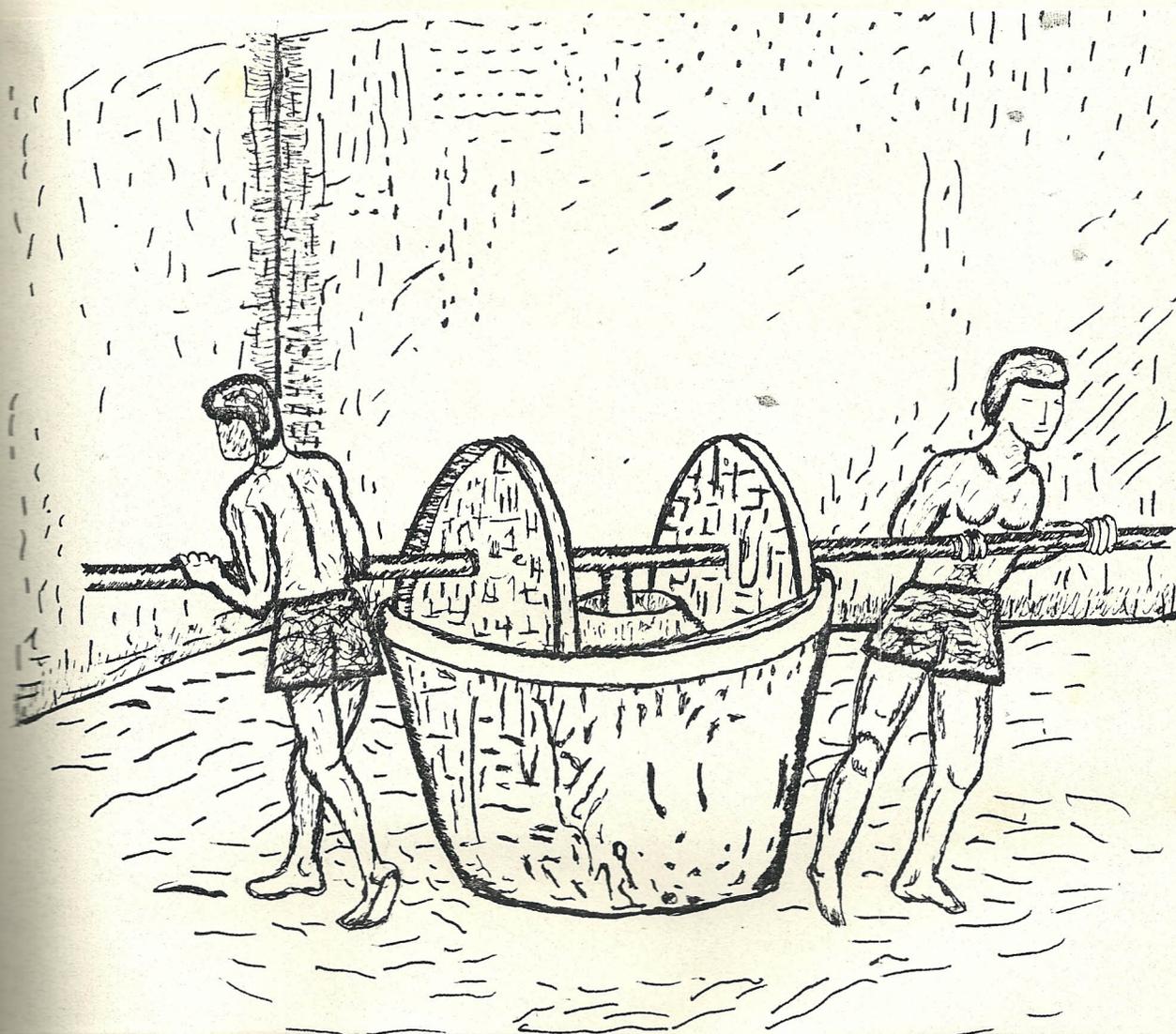


Fig. 2.- Molino Vasija.

En el siglo XIX se desarrollaron los sistemas de molienda en crudo en escala industrial. El molino tubular se introdujo entre 1890 a 1900 y posteriormente se lograron molinos de gran tamaño de aproximadamente 5 x 20 m, conforme se utilizan en las modernas fabricas de cemento.

El molino tubular es de construcción simple y comprobada y su manejo correcto no presenta dificultades. El mantenimiento de un molino tubular requiere menos tiempo muerto y menos mano de obra que cualquier otro tipo de molino.

El diseño de molinos tubulares es todavía un asunto de experiencia. No existe información completa disponible que permita diseñar en forma óptima un molino tubular. Existen muchas variables, tales como longitud y diámetro del molino, velocidad y peso de las bolas, etc., así como las características específicas del material que influyen en la producción del molino y en la finura del producto final.

Hace aproximadamente 70 años este tipo de MOLINO fue el que se instaló en la PLANTA de BENEFICIO en PORTOVELO por la compañía SIMA. Siendo la capacidad instalada de 400 ton/día (24 horas) con 5 molinos que hasta la fecha funcionan con una producción de 7 Tn/día. No por mal funcionamiento de los mismos sino por falta de recursos económicos y tecnología en la

extracción del MINERAL, a pesar de que la MINA cuenta con algunos cientos de TONELADAS de RELLENO con una LEY de 6 gr/ton.

Las chancadoras de pizones y molinos trapiche son rentables para la minería del oro cuando las leyes de cuarzo son altas, generalmente se muele en este tipo de chancadoras minerales escogidos en forma manual por los grupos de mineros que cuentan y utilizan este servicio.

En Ponce Enriquez, el 97% son de pizones, existiendo en este momento la instalación de 1 o 2 molinos del tipo chileno. En las zonas de Portovelo, Zaruma, Paccha, existen un total de 81 chancadoras y molinos de los cuales cinco son de pizones con energía hidráulica, seis con motores estacionarios con una capacidad de molienda de 3 a 5 ton/día.

El resto de molinos es del tipo de molinos chileno, existiendo una gran variedad de acuerdo a su capacidad de molienda que va de 5 a 10 ton/día.

En la tabla #1 se puede observar la comparación de las características de los molinos utilizados en la zona.

CARACTERISTICAS PRINCIPALES	TIPO MOLINO	CHANCADO CALIFORNEANO PIZONES	CHILENO	BOLAS ACERO	BOLAS PIEDRA
CONTAMINACION CON HIERRO		BAJO	BAJO	ALTO	BAJO
DE ACUERDO AL TIPO DE LEY DEL MINERAL A MOLER		ALTA	ALTA	BAJA	BAJA
MANTENIMIENTO		BAJO	BAJO	ALTO	ALTO
CONSUMO MANO DE OBRA		ALTO	ALTO	BAJO	BAJO

TABLA # 1.- CUADRO DE COMPARACION DE CARACTERISTICAS DE LOS MOLINDOS UTILIZADOS EN LA ZONA.

## CAPITULO II

### DEFINICION DEL PROBLEMA

#### 2.1. CAPACIDADES TIPICAS DE MOLINOS EXISTENTES.

##### CHANCADORAS DE PIZONES.

Muy baja capacidad de molienda con granulometría muy variable y un porcentaje de liberación de metal reducida en el rango de 20 a 25% del contenido total de oro.

Estas chancadoras con 4 o 6 pizones pueden lograr moler de 3 a 5 ton/día (10 a 12 horas). En la figura 3 se observa un molino de este tipo.

Es usado generalmente en las zonas de más difícil acceso ya que sus componentes son fáciles de transportar.

En Nambija, Ponce Enriquez, el 90% de equipos de molienda en funcionamiento pertenecen a este tipo de chancadoras.



Fig. 3.- Molino de 6 pizones, movido por energía hidráulica.

#### MOLINOS TIPO CHILENO.

De superior capacidad, con una granulometría más uniforme y liberación en el rango del 15 al 20% de metal, son más usados en las zonas de fácil acceso. En la parte alta de la Provincia de El Oro es el más comúnmente usado. Con este tipo de molino se logra moler hasta 10 ton/día (12 horas). Siendo su fuerza motriz ENERGIA ELECTRICA O MOTORES DE COMBUSTION INTERNA. Ver figura 4.

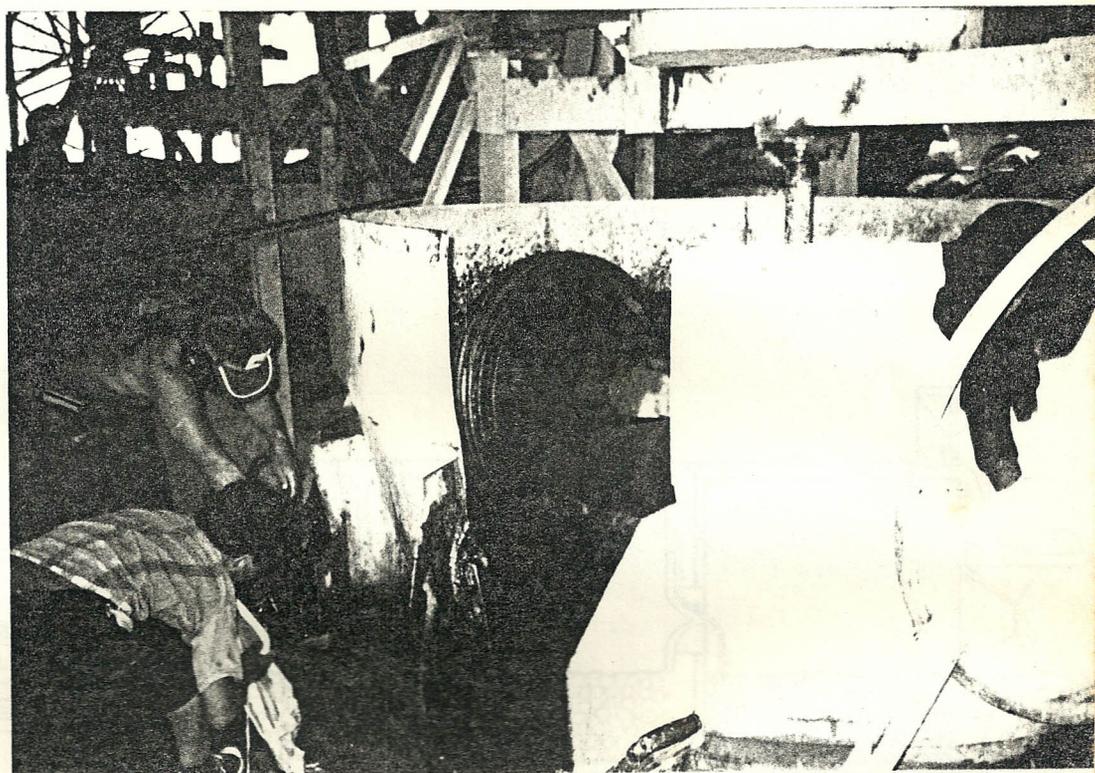


Fig. 4.- Molino Chileno.

### MOLINO DE BOLAS.

Se lo utiliza ampliamente en fábricas de cemento, donde se va desarrollando diferentes tipos de molinos tubulares desde un compartimiento hasta tres compartimientos.

En la Fig. 5 se muestra un molino de un compartimiento.

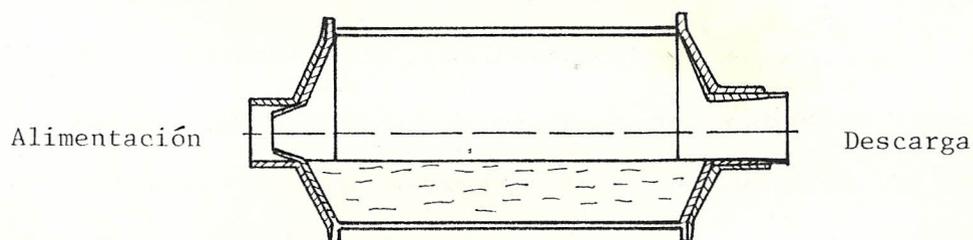


Fig. 5.- Molino de un compartimiento.

En la Figura 6 se ve un molino de tubos de tres compartimientos.

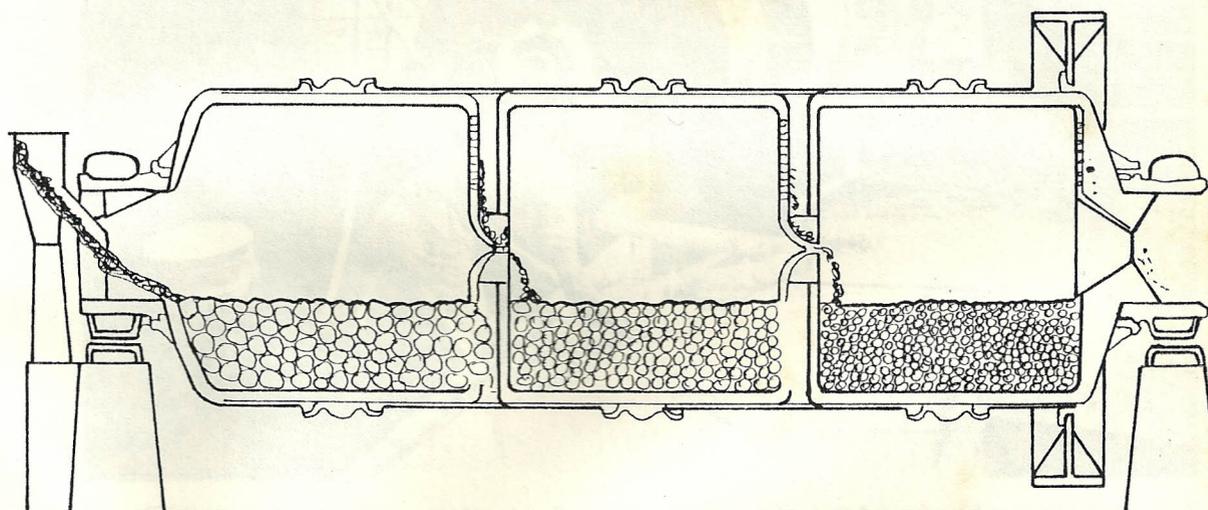


Fig. 6.- Molino de tubos de tres compartimientos.

En la industria minera debidamente desarrollada se lo utiliza, habiendo conseguido tecnológicamente lograr mayor capacidad de molienda. Pueden moler desde 35 ton/día hasta 200 ton/día, de acuerdo a su tamaño, con la gran ventaja de que permite moler minerales de baja ley que comumente son desaprovechados por los mineros que utilizan los molinos pizones y chileno con la ventaja de proporcionar una granulometría uniforme.

En el país existen 3 plantas dedicadas al beneficio del mineral, las mismas que cuentan con MOLINOS DE BOLAS, estas están ubicadas en Portovelo (INEMIN); y en Zaruma (ECUAGAUSA y SODIREC). Ver fig. 7.

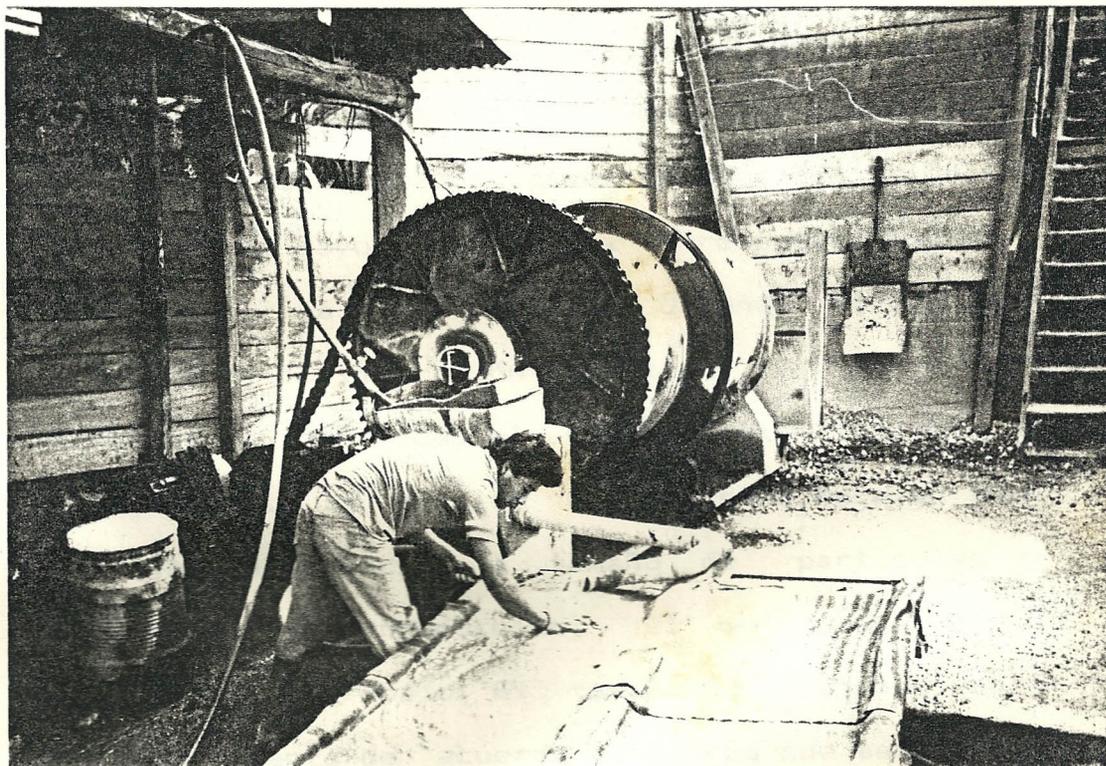


Fig. 7.- Molino de bolas de un compartimiento usado en Ecuagausa.

## 2.2. ANALISIS DE EFICIENCIAS DE MOLIENDA CON DIFERENTES TIPOS DE MOLINOS.

Hay que establecer la diferencia entre CHANCADO y MOLIENDA, para poder hacer un análisis de la eficiencia entre los molinos instalados y operando en las diferentes ZONAS AURIFERAS del país, y en el caso particular de ZARUMA.

El CHANCADO tiene por objeto reducir el tamaño del mineral para facilitar el trabajo de los molinos, además inicia la liberación de los sulfuros valiosos en la carga fina que siempre se produce en las chancadoras.

En cambio se conoce como MOLIENDA una degradación mayor del tamaño de partículas, donde principalmente se libera a los sulfuros valiosos y el oro libre. La sección de molienda está considerada como una de las secciones de mayor importancia y responsabilidad en la planta, ya que de ella depende el tonelaje producido y la liberación de metal.

Tanto la molienda como el chancado están íntimamente ligados, si la sección de chancado hace un buen trabajo en relación a tamaño de partículas y capacidad de producción, el molino hará más fácilmente su trabajo. El tamaño de chancado varía en cada planta de acuerdo al cuarzo que sale de la mina; y debe ser reducido hasta garantizar un buen proceso de molienda futura.

El molino es una máquina destinada a moler el mineral y reducir la carga a un tamaño tan pequeño donde los sulfuros valiosos quedan liberados de la ganga.

Este tamaño será tan pequeño como lo exija la liberación, por lo menos tamaño de partículas malla 200.

#### LIBERACION:

La acción de liberación está determinada por la ruptura de los granos, como ya se ha dicho y puede ser observada a través del análisis detenido de un mineral pobre, se verá que la ganga está incrustada firmemente entre los sulfuros valiosos, y los mismos sulfuros están amarrados entre ellos. Por eso antes de proceder a "separarlos" será necesario "despegar" cada uno de ellos de los demás elementos. La manera de "liberarlos" es reduciéndolos a tamaños bien pequeños. Esto lo podemos experimentar, tomando un trozo de mineral y chancándolo con un martillo hasta reducirlo a arena fina, entonces veremos que las partículas de cada sulfuro están libres de cualquier otro elemento.

Estableciendo las diferencias de chancado y molienda vemos que estos son procesos que tienen una secuencia y de ellos depende el PORCENTAJE DE LIBERACION que se logre tomando una ley de 10 gr/ton. En las minas de la zona de ZARUMA es normal

encontrar ORO de 12 a 17 kilates y de las plantas consultadas se puede establecer la tabla # 2, en la que se realiza una comparación de resultados y eficiencia en la MOLIENDA y CHANCADO.

En el apéndice B se puede observar las equivalencias de las granulometrias indicadas en la tabla # 2.

### 2.3. SELECCION DE MOLINO.

Después del estudio realizado de los molinos que operan en el país y en particular en zaruma, se seleccionó el "MOLINO DE BOLAS" que es el que representa mayores ventajas para el tipo de inversión que se proyectó para este informe. Ver figura 8.

En el proceso de selección del tipo de molino hay que hacer otras consideraciones, como son:

- a) carga de mineral
  - b) agua
  - c) bolas o ejes
- a. Las partículas del mineral dependen también de la dureza y tamaño de las que se suministra al molino;
  - b. El agua y la cantidad de carga del mineral son variables que están a cargo del molinero; quien las aumenta o quita según sea necesario para conseguir mayor eficiencia de su molino.
  - c. Grado de llenado (f), está definido como el volu-

CARACTERISTICAS DE LOS PROCESOS DE MOLIENDA USADOS	TIPO MOLINO	CHANCADO CALIFORNEANO	CHILENO	BOLAS ACERO	BOLAS PIEDRA
GRANULOMETRIA		70u	100u	200u	150u
PRODUCCION		4 Tn/dia	6 Tn/dia	10 Tn/dia	20 Tn/dia
LIBERACION		20-25%	20-25%	25-35%	40-50%
				hasta 70-85%	

TABLA # 2.- CUADRO COMPARATIVO DE PRODUCCION Y EFICIENCIA

Mineral al  
Molino

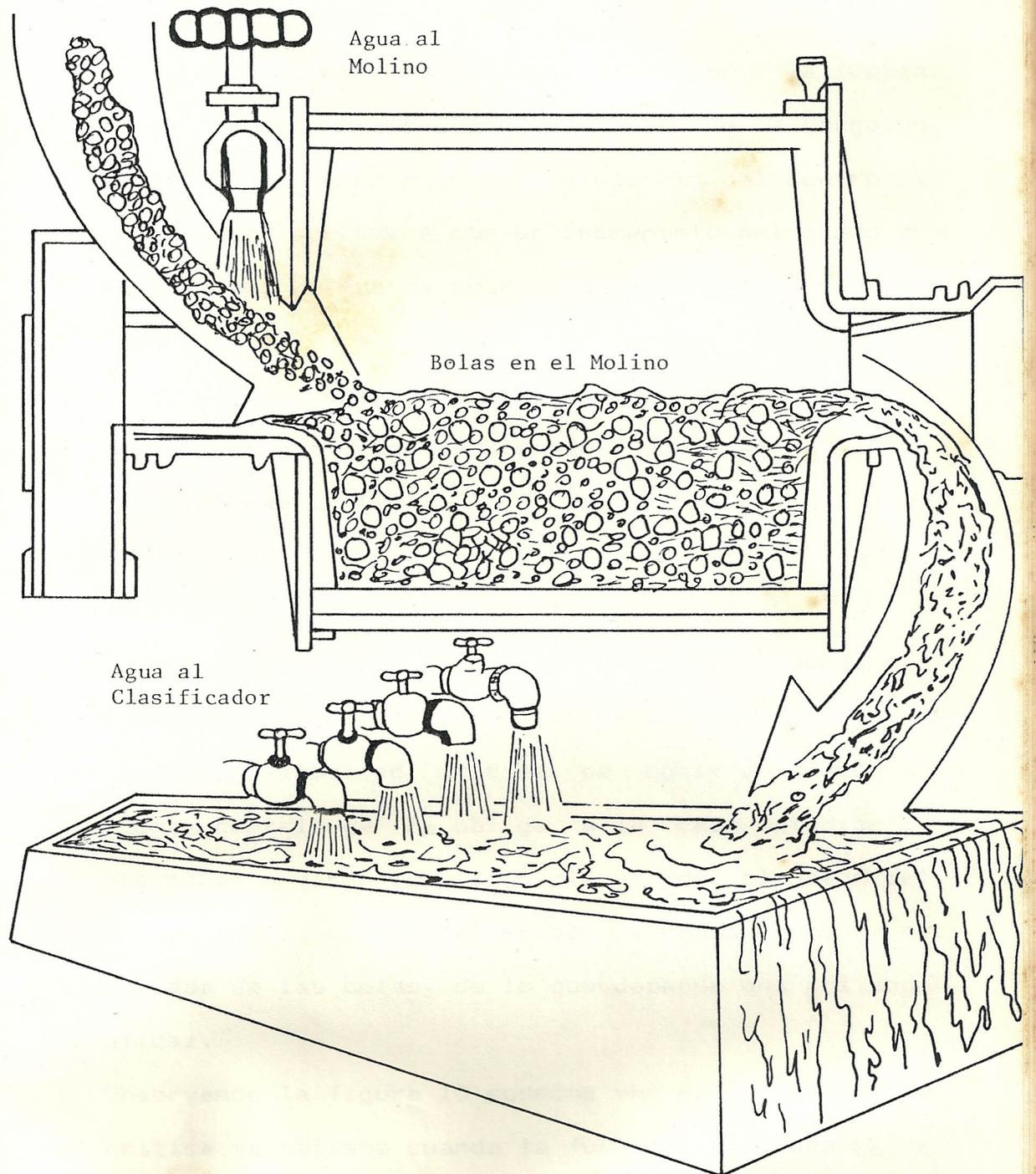


Fig. 8.- Molino de bolas y clasificador.

men  $V_G$  de la carga de bolas expresado como un porcentaje del volumen total del molino  $V_M$ .

$$f = V_G/V_M \quad [\%]$$

De acuerdo con la fórmula anterior, la fuerza motriz es proporcional al peso de la carga de bolas. Por otra parte, la distancia del centro de gravedad decrecerá con un incremento del grado de llenado. La fuerza motriz tiene un máximo entre 40 y 45% del grado de llenado. La figura 9 muestra el comportamiento de la carga de bolas en función del grado de llenado  $f$  y el porcentaje de velocidad crítica.

#### VELOCIDAD DEL MOLINO

La velocidad de operación de un molino puede ser expresada en porcentajes de la velocidad crítica del mismo. La velocidad crítica se obtiene cuando la fuerza centrífuga  $F_c$  obliga a la capa exterior de las bolas a girar con las placas de blindaje del molino. Esta condición impide la caída continua en cascada de las bolas, de lo que depende una molienda eficaz.

Observando la figura 10 podemos ver que la velocidad crítica se obtiene cuando la fuerza centrífuga  $F_c$  es igual a la fuerza de gravedad  $F_g$ :

$$F_g - F_c = m \cdot g - m \cdot \frac{D_1}{2} \cdot \omega^2_{crit} = 0$$

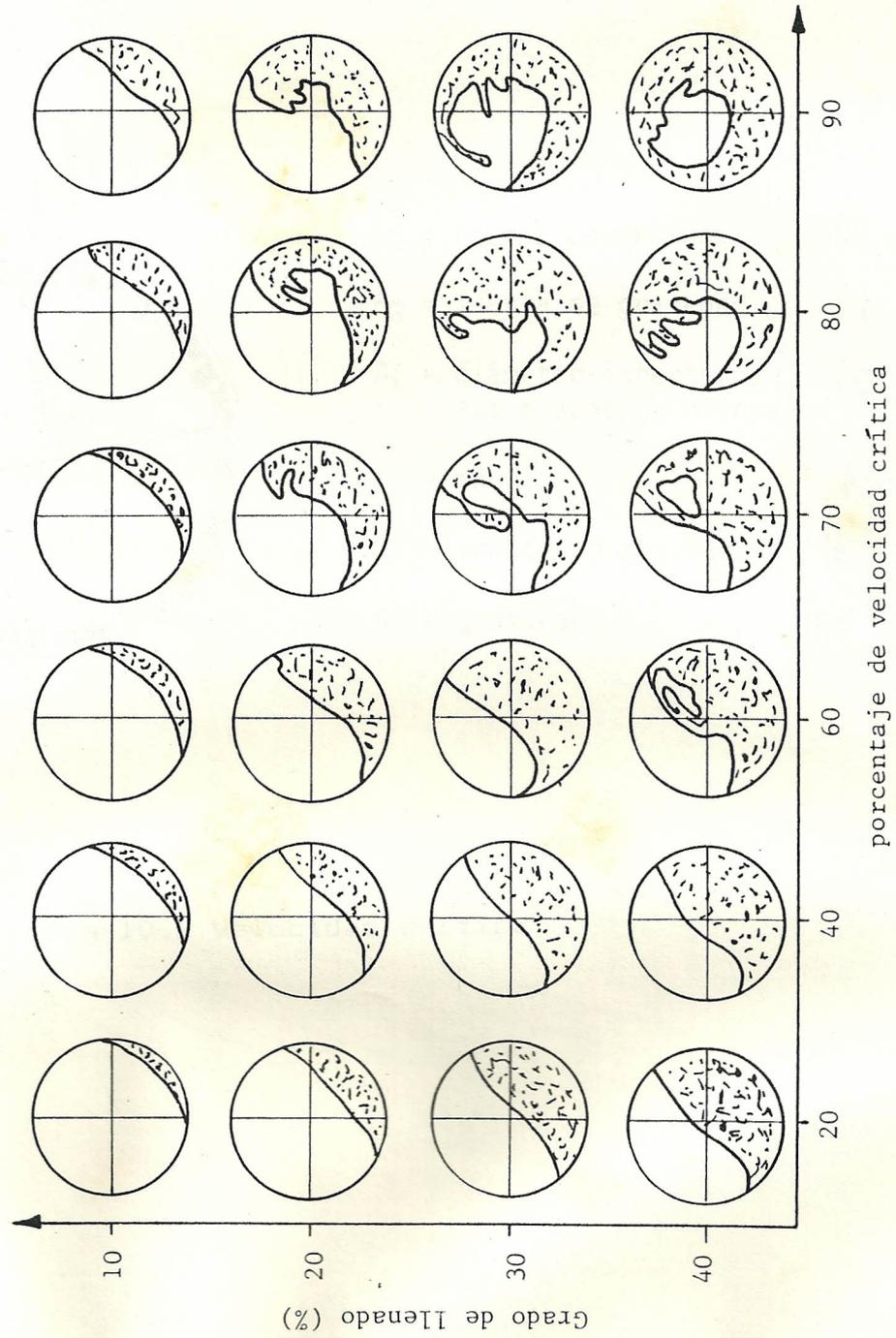
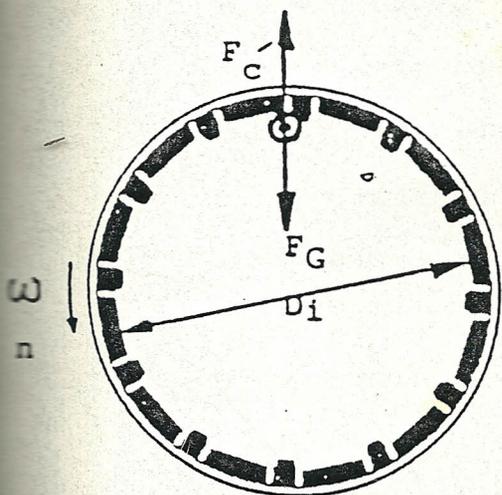


Fig. 9.- Efecto en cascada de la carga de bolas en función del grado de llenado y de la velocidad crítica.



$F_C$  = fuerza centrífuga [N]

$F_G$  = fuerza de gravedad [N]

$D_i$  = diámetro interior de las placas de blindaje [m]

$m$  = masa [kg]

$\omega$  = velocidad angular [ $s^{-1}$ ]

$g$  = gravedad [ $ms^{-2}$ ]

Figura 10.- Velocidad crítica

La velocidad angular crítica  $\omega_{crit}$  será entonces:

$$\omega_{crit} = \pi n_{crit}/30$$

La velocidad crítica del molino  $n_{crit}$ , por lo tanto, puede ser calculada en función del diámetro del molino  $D_1$ .

$$n_{crit} = 42.3/(\sqrt{D_1}) \quad [\text{min}^{-1}]$$

La velocidad de operación del molino se calcula entonces como:

$$n = k \cdot n_{crit} \quad [\text{min}^{-1}]$$

$n$  = velocidad de operación del molino  $[\text{min}^{-1}]$

$n_{crit}$  = velocidad crítica del molino  $[\text{min}^{-1}]$

$k$  = relación  $n/n_{crit}$  [%]

$D_1$  = diámetro interno  $[\text{m}]$

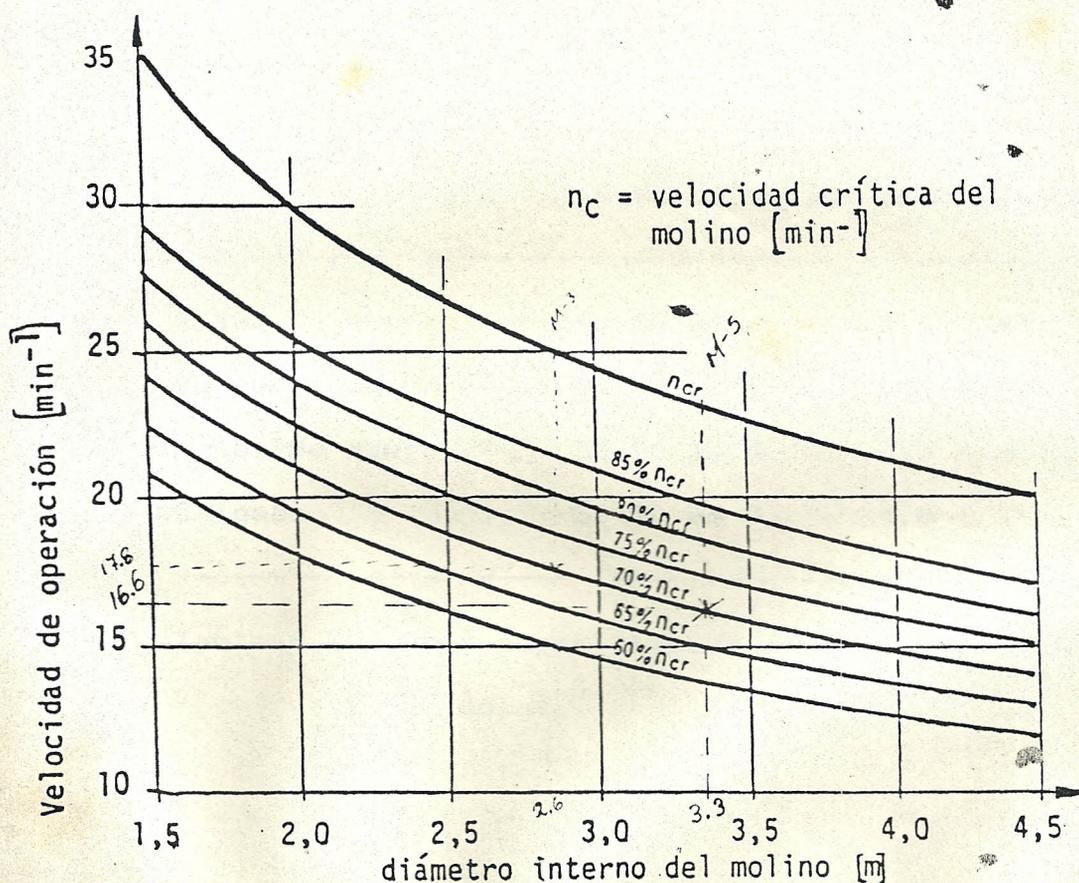


Fig. 11 Porcentaje de la velocidad crítica en función del diámetro del molino.

PESO DE LA CARGA DE BOLAS

El peso de la carga de bolas puede ser calculado de la siguiente forma:

$$Q = (\pi/4)(D_1)^2 \cdot L_1 \cdot f \cdot \tau_0 \quad [t]$$

en donde:

$L_1$  = longitud interior del molino o del compartimien  
to.

$f$  = grado de llenado

$\tau_0$  = peso específico de la masa de las bolas

$D_1$  = diámetro interior de las placas de blindaje

$Q$  = carga de bolas

Los valores específicos de masa de las bolas aparecen en la tabla siguiente:

	Tamaño de bolas	peso específico
Bolas de acero	100-60 mm Ø	4.4 t/m <sup>3</sup>
Bolas de acero	50-30 mm Ø	4.6 t/m <sup>3</sup>
Bolas de acero	30-20 mm Ø	4.8 t/m <sup>3</sup>
Cylpebs	30-20 mm Ø	4.8 t/m <sup>3</sup>

Tabla # 3.- Peso específico de la masa de la carga como guía de bolas.

### LONGITUD A DIAMETRO DE UN MOLINO

La relación de longitud a diámetro de un molino tubular depende de varios factores.

Los más importantes son los siguientes:

- Producción por hora
- Dureza del material (molturabilidad)
- Finura del producto final
- Molienda en circuito abierto o cerrado
- Tamaño de materia prima con que se alimenta el molino
- Sistema de molienda

Por una parte, la producción por hora dependerá ciertamente del corte transversal y por consiguiente, del diámetro del molino. Por otra parte, la finura del material en la salida del molino depende principalmente del tiempo de retención del material en el molino. El factor más determinante para el tiempo de retención es la longitud del molino. Por lo tanto, la relación de longitud a diámetro de un molino constituye un factor importante para el diseño óptimo del mismo. Los valores dados a continuación pueden considerarse como guía para la relación de longitud a diámetro  $\phi$  de un molino.

Sistema de molinos	Relación $\phi$	Observaciones	
M o l i n o	Molinos de circuito abierto	3.0-6.0	$\emptyset$ 2.0-2.4: $\phi$ 6.0 $\emptyset$ 2.6-3.0: $\phi$ 5.0 $\emptyset$ 3.0-4.0: $\phi$ 4.0 $\emptyset$ >4.0: $\phi$ 3.0 3.5
d e c e m e n t o	Molinos de circuito cerrado	3.0-3.5	molinos grandes $\phi$ = 3.0-3.2 una relación $\phi$ baja da una carga circulan- te más alta.

Tabla #4.- Relación de longitud a diámetro de un molino.

#### 2.4. CARACTERISTICAS GENERALES Y DE OPERACION DE LOS MOLINOS DE BOLAS.

En esencia estos molinos están constituidos por un cilindro dispuesto horizontalmente al que se hace girar alrededor de su eje.

En el interior se ha depositado previamente una carga de bolas (o barras de pequeña sección y hasta guijarros). La entrega de la materia prima a moler y su salida son continuas y se efectúan por uno y otro extremo del cilindro: generalmente por los apoyos (que son huecos para el efecto). De este modo, tenemos interiormente bolas y material. La rotación del cilindro tiende a elevar la carga hasta cierta altura desde la cual caen las bolas en cascada, percutiendo sobre la parte de la carga que queda en la parte inferior, efectuando la molienda. Además, las bolas tienden a resbalar unas sobre otras por la intensa agitación a que están sometidas, efectuando la molienda en este caso, por rozamiento. La primera depende del peso de la bola y la segunda de la superficie de estas (mientras más pequeñas las bolas mayor superficie), presentando condiciones contrapuestas. Hay que elegir, el tamaño de bola adecuado.

Si las bolas grandes reciben la alimentación (acción de percusión) las pequeñas hacen el molido fino (efecto de rodadura).

Cuando la rotación es baja, las bolas no ascienden mucho en el molino y cuando es grande se adhieren a la carcasa, por la fuerza centrífuga. En ambos casos no hay una molienda adecuada. Esta se logra cuando las bolas caen desde una cierta altura en cascada igualándose el peso con la fuerza centrífuga.

La fuerza motriz total necesaria para un molino tubular es igual a la suma de la potencia neta necesaria para mantener el centro de gravedad de la carga en una posición de equilibrio cinético e incluye las pérdidas de potencia por fricción y por transmisión. Ver Fig. 12 y 13.



Fig. 12.- Fuerza motriz para molinos tubulares.

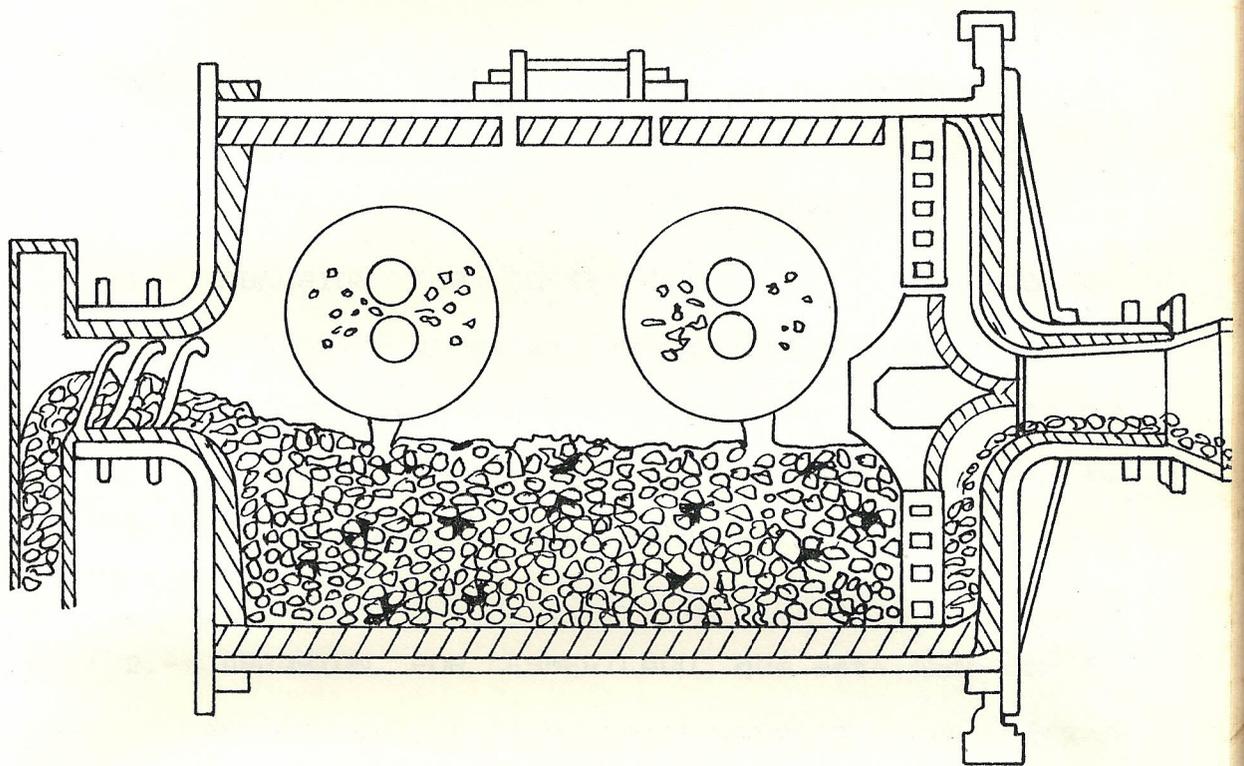


Fig. 13.- Molino de bolas en funcionamiento.

## 2.5. REQUERIMIENTOS TECNICOS DE LOS MATERIALES DE LAS BOLAS DE DIFERENTES MATERIALES.

El tipo de desgaste más preponderante en la molienda de minerales es denominado desgaste abrasivo por contactos de partículas más duras que la superficie del metal.

De acuerdo con AVERY dividió el desgaste abrasivo en tres tipos fundamentales:

- 1.- ABRASION POR CORTE que involucra remoción de partículas groseras de la superficie del metal de forma similar que lo hace una herramienta de corte, lo cual ocurre frecuentemente en la molienda grosera (molino de martillos).
- 2.- ABRASION POR ESMERILADO que está dado por la acción de pulido microscópico con cargas elevadas en combinación con deformación plástica localizada (MOLINOS DE BOLAS).
- 3.- ABRASION POR EROSION, que se manifiesta con bajos esfuerzos por rozamiento leves de partículas abrasivas afiladas. Generalmente ocurre en piezas sujetas a flujo de gases o líquidos con sólidos en suspensión.

Hasta 1.930 en U.S.A. y EUROPA prácticamente solo se usaban aceros austeníticos de alto Mn. (HADFIELD) para revestimientos de molinos de bolas y de barras por impacto. La importancia de estos aceros se debe a que poseen gran tenacidad y son insustituibles en aplicaciones que exijan 40% de alargamiento.

A partir de 1.930 estos aceros fueron sustituidos por aceros perlíticos, inicialmente sin aleación y posteriormente con baja aleación (CROMO, MOLIBDENO) para obtener durezas BRINELL de 350-420. Estos materiales poseen más resistencia a la abrasión que los aceros Hadfield en los molinos de bolas.

Otra de las líneas de materiales que están siendo utilizadas actualmente para revestimiento del molino de bolas y bolas son los aceros martensíticos de alto carbono, conteniendo ligas de Cr, Mo y eventualmente Ni.

En relación a las fundiciones de hierro históricamente fueron usados en primer lugar los hierros blancos, aunque fueron rápidamente reemplazados por la deficiencia manifiesta en cuanto a la baja resistencia al impacto.

Una evolución en la concepción de estos materiales

para aplicaciones de cuerpos moledores fue el desarrollo de los hierros blancos de MATRIZ MARTENSITICA conseguidos por medio de la incorporación de Cr y Ni a la fundición blanca normal, con lo que se puede conseguir dureza Brinell de 575 hasta 700, aunque persiste en ellos lo tendiente a la baja tenacidad.

Una respuesta positiva a este problema de los hierros blancos ha sido corregido en los últimos años con el uso de alta aleación de Cr, que son de amplia aceptación para cuerpos moledores.

Existen tres familias de materiales metálicos para uso en aplicaciones de molienda de minerales y que tienen características elevadas de resistencia a la abrasión, a saber:

- Aceros austeníticos al Manganeso.
- Aceros al Carbono o aleados con tratamientos térmicos.
- Hierros fundidos blancos.

Una ampliación de esta clasificación es mostrada a continuación:

MATERIALES RESISTENTES A LA ABRASION

ACEROS AUSTENITICOS AL MANGANESO (HADFIELD)

ACEROS AUSTENITICOS DE BAJO MANGANESO "LEAN Mn"

ACEROS PERLITICOS DE ALTO CARBONO

ACEROS PERLITICOS DE ALTO CARBONO CONTENIENDO Cr Y Mo

ACEROS MARTENSITICOS DE MEDIO CARBONO TIPO "CROMOSIL" (TIPO S)

ACEROS MARTENSITICOS DE ALTO CARBONO (TIPO A)

HIERROS FUNDIDOS BLANCOS PERLITICOS

HIERROS FUNDIDOS BLANCOS MARTENSITICOS TIPO (Ni-HARD)

HIERRO FUNDIDO BLANCO DE MEDIO Cr, CONTENIENDO Mo, I/O Cu, I/O Ni

HIERRO FUNDIDO BLANCO DE ALTO Cr TIPO (ILLIUM 28)

## 2.6. USO DE BOLAS DE PIEDRAS EN MOLINOS DE BOLAS.

A pesar que en la tabla # 2 comparativa de eficiencias observamos que con bolas de materiales ferrosos se obtienen mejores resultados que con las bolas de piedra, en este caso particular hubo necesidad de hacer selección de bolas de piedra (RIOLITA), en vez de otro tipo de material por los varios considerandos y que son grandes desventajas en relación a sencillez y condiciones precarias de las instalaciones que se pueden montar en la zona de explotación.

- a. Existe producción nacional muy limitada de bolas de hierro o acero.
- b. Las ferroaleaciones usadas en la producción de bolas de metal es de un alto costo y por ende los productos son caros.
- c. Es imprescindible la importación.
- d. Las bolas metálicas contaminan el ORD con materiales ferrosos.
- e. De la consideración anterior se deduce que producciones a gran escala demandan un proceso adicional de separación de magnética para limpiar los residuos ferrosos.
- f. Alto costo de reposición de las cubiertas del molino, por mayor desgaste abrasivo.
- g. Mayor mantenimiento.

El uso de las bolas de piedra se implantó como una

experiencia bajo las dificultades y ventajas anteriormente enumeradas, encontrándose en los resultados que se relata en este informe bajo los parámetros de capacidades y eficiencias; siendo estos de gran ventaja técnica y económica.

En la Figura 14 se puede observar el correcto llenado de bolas.

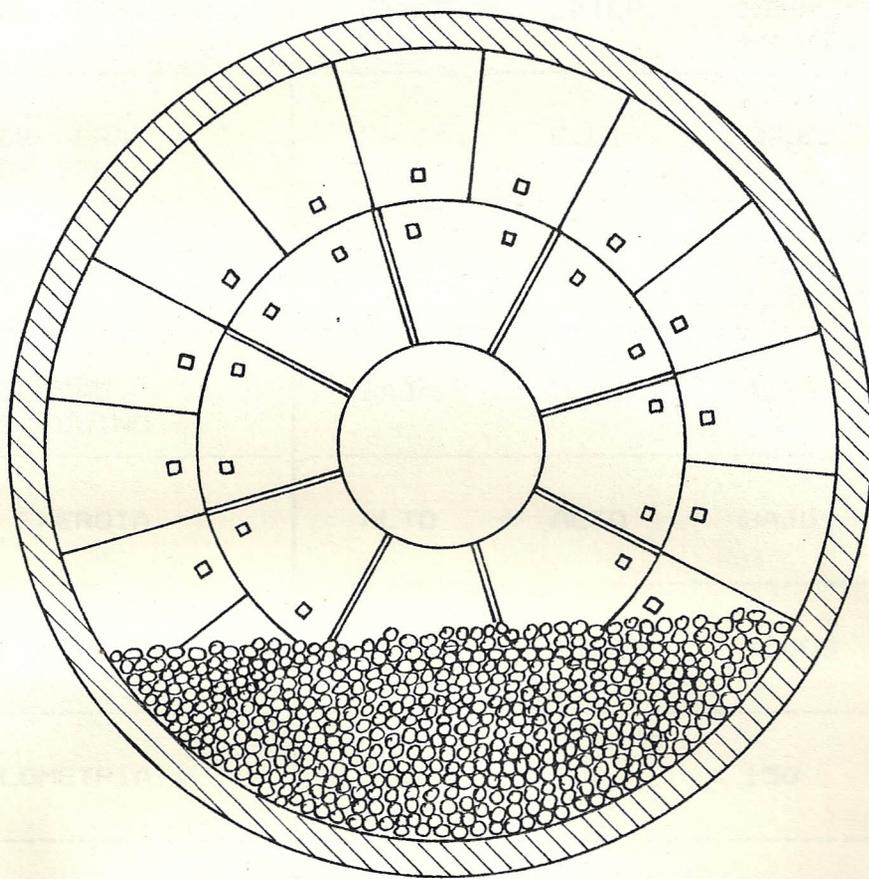


Fig. 14.- Llenado de bolas correctamente.

2.7. COMPARACION DE RENDIMIENTO DE MOLINOS CON USO DE BOLLAS DE DIFERENTES MATERIALES.

CARACT. FISICAS	TIPO MOLINO	MOLINO BOLLAS ACERO	MOLINO BOLLAS HIERRO	MOLINO BOLLAS PIEDRA
COSTO MANTENIM. BOLLAS		ALTO	ALTO	BAJO
FREC. REPOSICION BOLLAS		BAJA	MEDIAN.	ALTA
MERCADO-ABASTECIM.		EXTER.	EXTER.	MINA PROPIA
MANO DE OBRA FAB. DE BOLLAS		CALIF.	CALIF.	ARTES.
INVENT. BODEGA		ALTO	ALTO	DE ACUER NECESID. Y DEMAN.
DURABILIDAD MUELAS MOLINO		BAJA	MEDIAN.	ALTA
COSTO ENERGIA		ALTO	ALTO	BAJO
TIPO MINERAL A UTILIZAR		TODOS	TODOS	TODOS
GRANULOMETRIA		200	200	150
PRODUCCION		20 T/d	20 T/d	14 T/d
CONTAMINACION		ALTA	ALTA	BAJA

#### RESULTADOS:

De la selección del molino de bolas y el uso de cuerpos moledores de reolita se han logrado resultados técnicos y eficiencia en el beneficio del mineral en comparación con los procesos artesanales utilizados en la zona de Zaruma.

Esta aplicación ha sido efectuada en la Planta Industrial ECUAGAUSA y para visualizar los logros alcanzados se exponen a continuación resultados obtenidos, donde se destaca la importancia de la granulometría (150 u) obtenido en la molienda y más tarde en el porcentaje de recuperación del mineral.

La operación de amalgamación se la efectúa en un molino revestido de caucho, una boca para carga y descarga, cierre hermético y trabaja de 18 a 20 RPM. La carga de bolas puede ser de cristal o porcelana; no se usan de hierro porque sus residuos dificultan en el amalgamado; en nuestro caso utilizamos piedras de río debidamente seleccionadas por los operadores.

#### OPERACION:

- a. Carga del concentrado.
- b. Agua en cantidad adecuada.
- c. 10 a 9 gr. de mercurio de la calidad que se consigue en el medio.
- d. 1 gr. de soda cáustica para neutralizar la solución.

- e. Tiempo de 1 1/2 a 2 horas dependiendo del mineral tratado.
- f. PANELA, que es un elemento de limpieza de residuos de grasa o aceite, residuos ferrosos y láminas de Cu, etc.

VENTAJAS:

- a. Se obtiene una mejor remolienda.
- b. Se libera más ORO.
- c. Menos operación manual.
- d. Se evita el robo.
- e. Mayor cantidad de concentrado obtenido en las bayetas y en el platóneo.

CONCENTRACION POR PLATON

RECUPERACION %

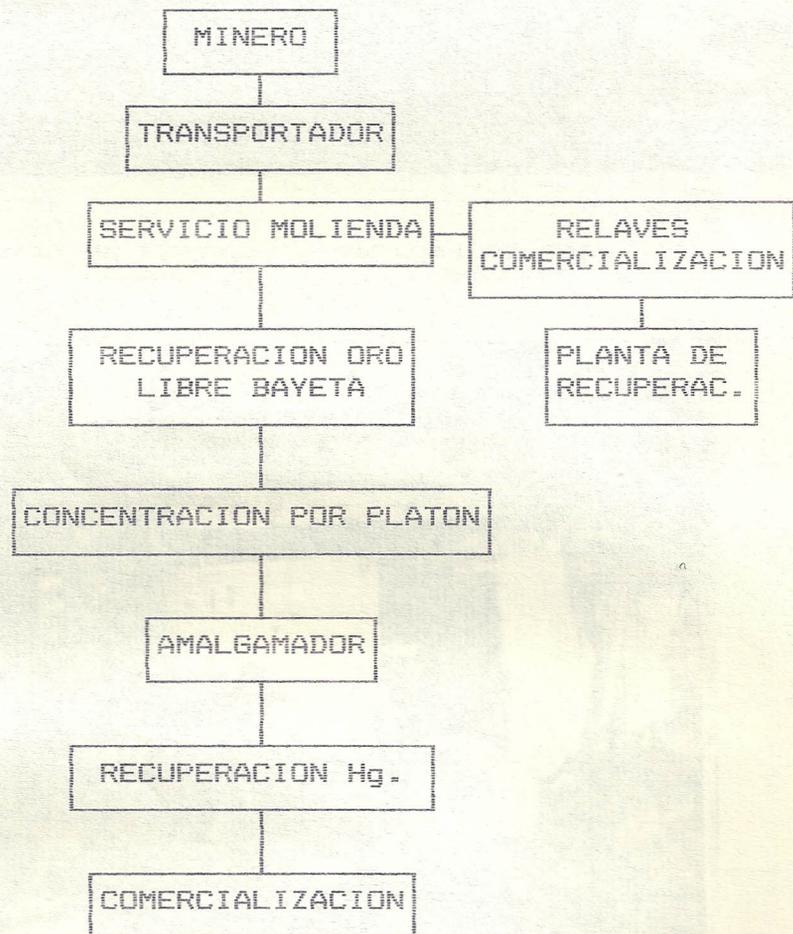
COMERCIALIZACION

### CAPITULO III

#### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tomemos la LEY PROMEDIO en las minas en la zona de Zaruma como "15 gr/ton."

#### A.- PROCESO MAS COMUN UTILIZADO



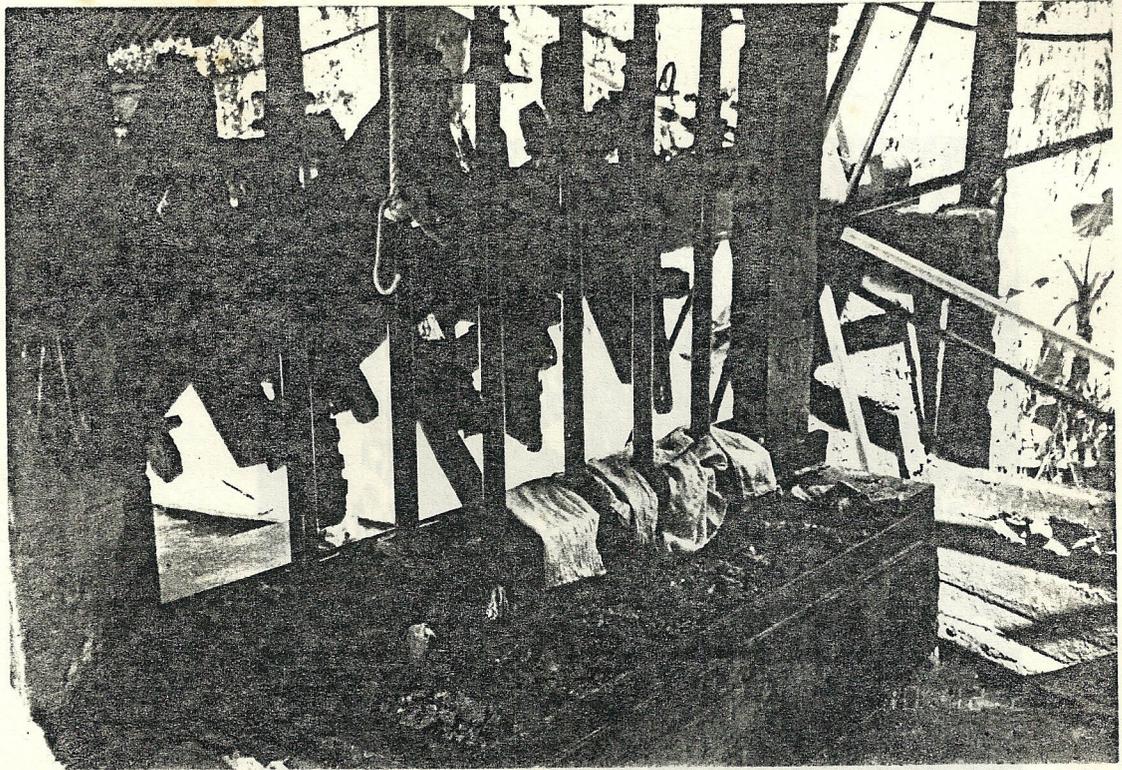


Fig. 15.- Molino de Pizones y sistema de carga.



Fig. 16.- Molino Chileno y sistema de descarga.

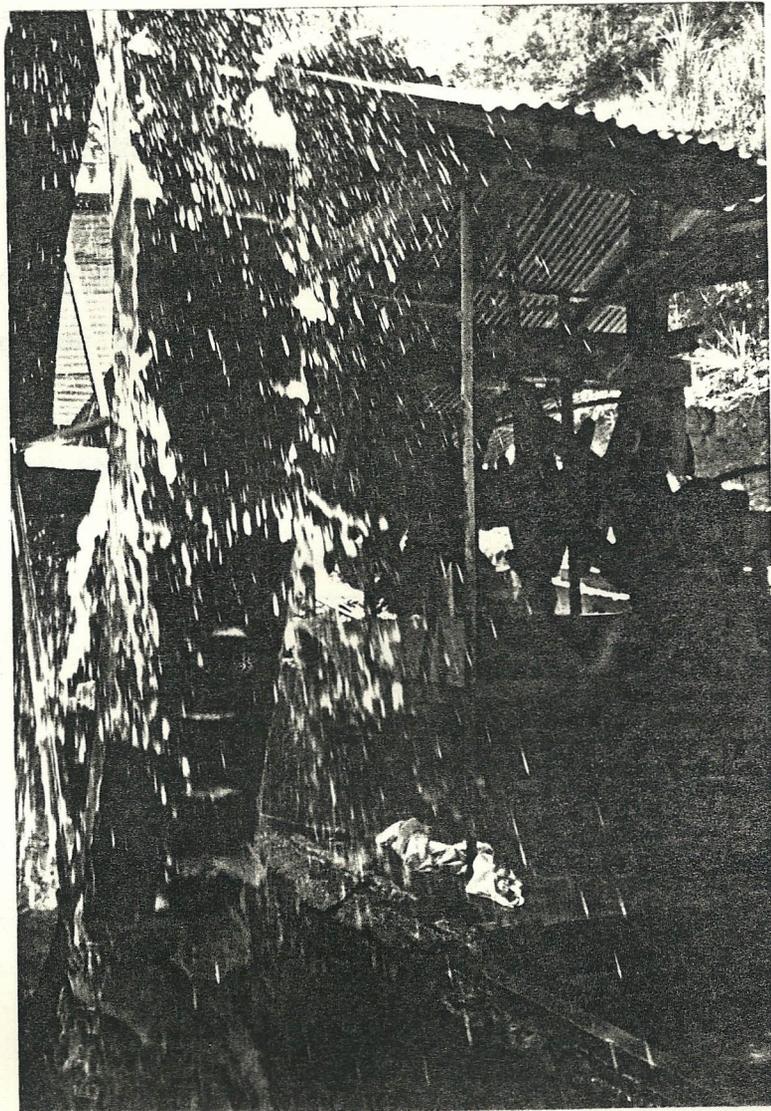
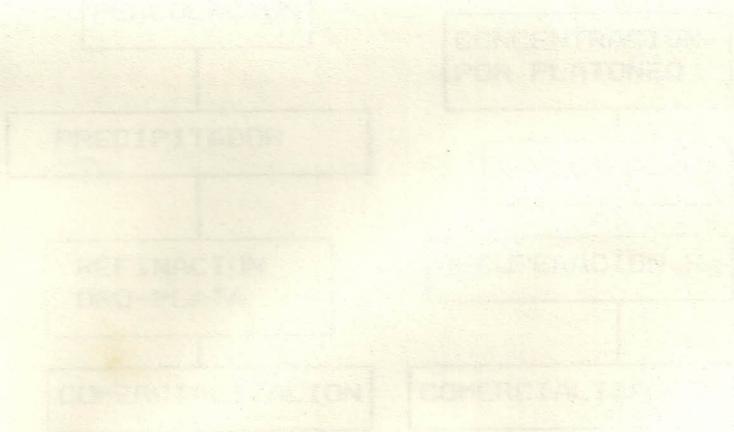
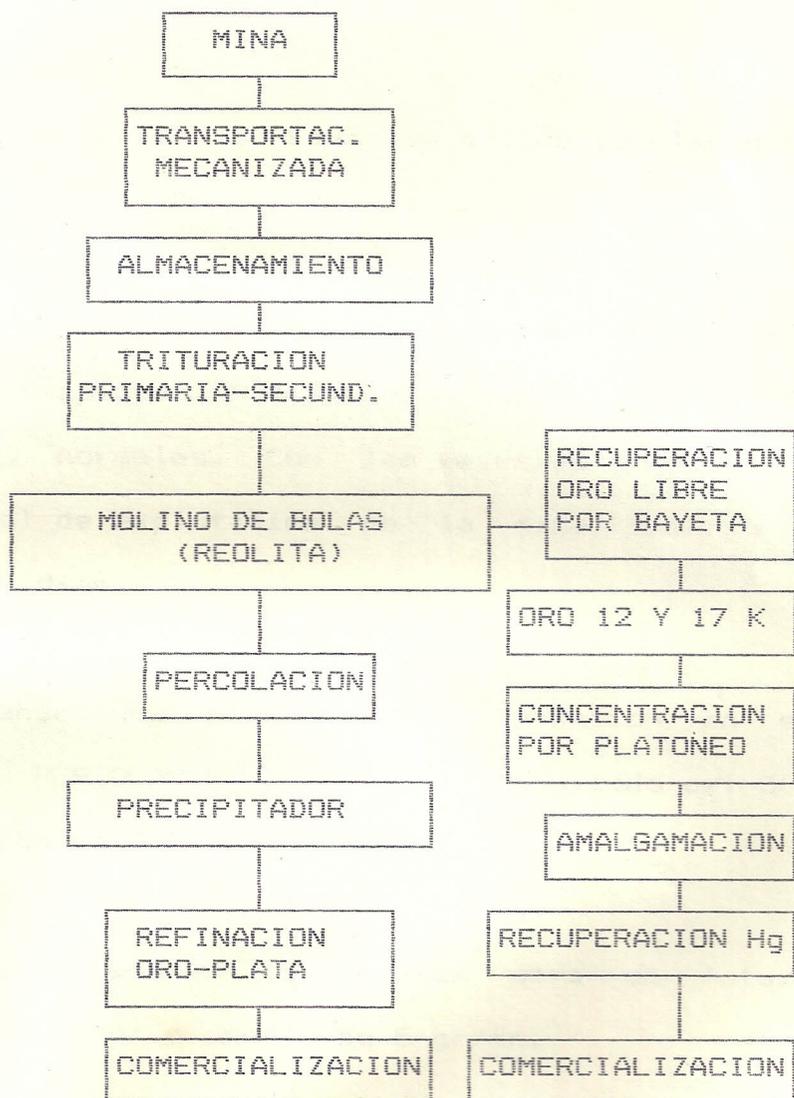


Fig. 17.- Fuerza hidráulica utilizada en molino pizones.



- 1.- Chancadora de 5 o 6 pizones
- 2.- Producción 4 Tn/día (10 horas)
- 3.- Granulometría 70 mallas
- 4.- Liberación 20-25% del contenido al mineral (3 a 3.5 gr/tón)
- 5.- Pago 3.500 a 4.000 sucres por tonelada de MOLIENDA
- 6.- Hay alrededor de 80 plantas que utilizan este sistema

B.- PROCESO IMPLEMENTADO POR ECUABAUSA



- 1.- Molino de bolas (reolita).
- 2.- Producción 14 Tn/día (16 horas).
- 3.- Granulometría 150 mallas.
- 4.- Liberación 40-50% del contenido del mineral (8-10 gr/tn).
- 5.- Hay tres plantas que utilizan este sistema. Gracias a la selección del molino se ha logrado un desarrollo parcialmente integral.

- 1.- Mina con reservas probadas de 44.000 toneladas de mineral con Ley de 20 gr/tn.

Contenido de metales preciosos	880000 gr de oro
	2211300 gr de plata

Ritmo de explotación actual 10/20 tn/día en condiciones normales. Con las reservas probadas al ritmo actual de explotación de la mina tomaría 10 años de 250 días.

- 2.- Implementando una planta de recuperación en el sistema de PERCOLACION que da un resultado del 50% del contenido de ORO en los RELAVES.

- 3.- Formar una reserva de relaves para un futuro tratamiento con un promedio de 5 gr/tn.

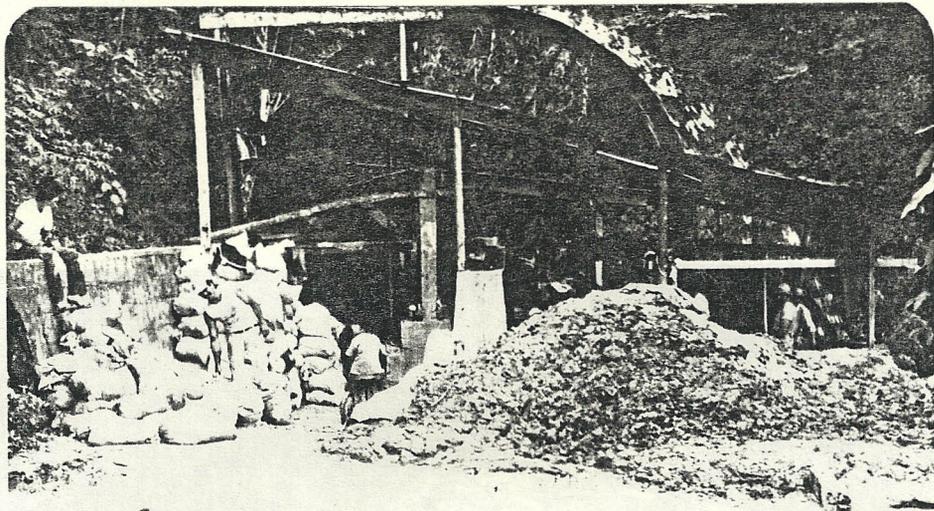


Fig. 18.- Transporte mineral.

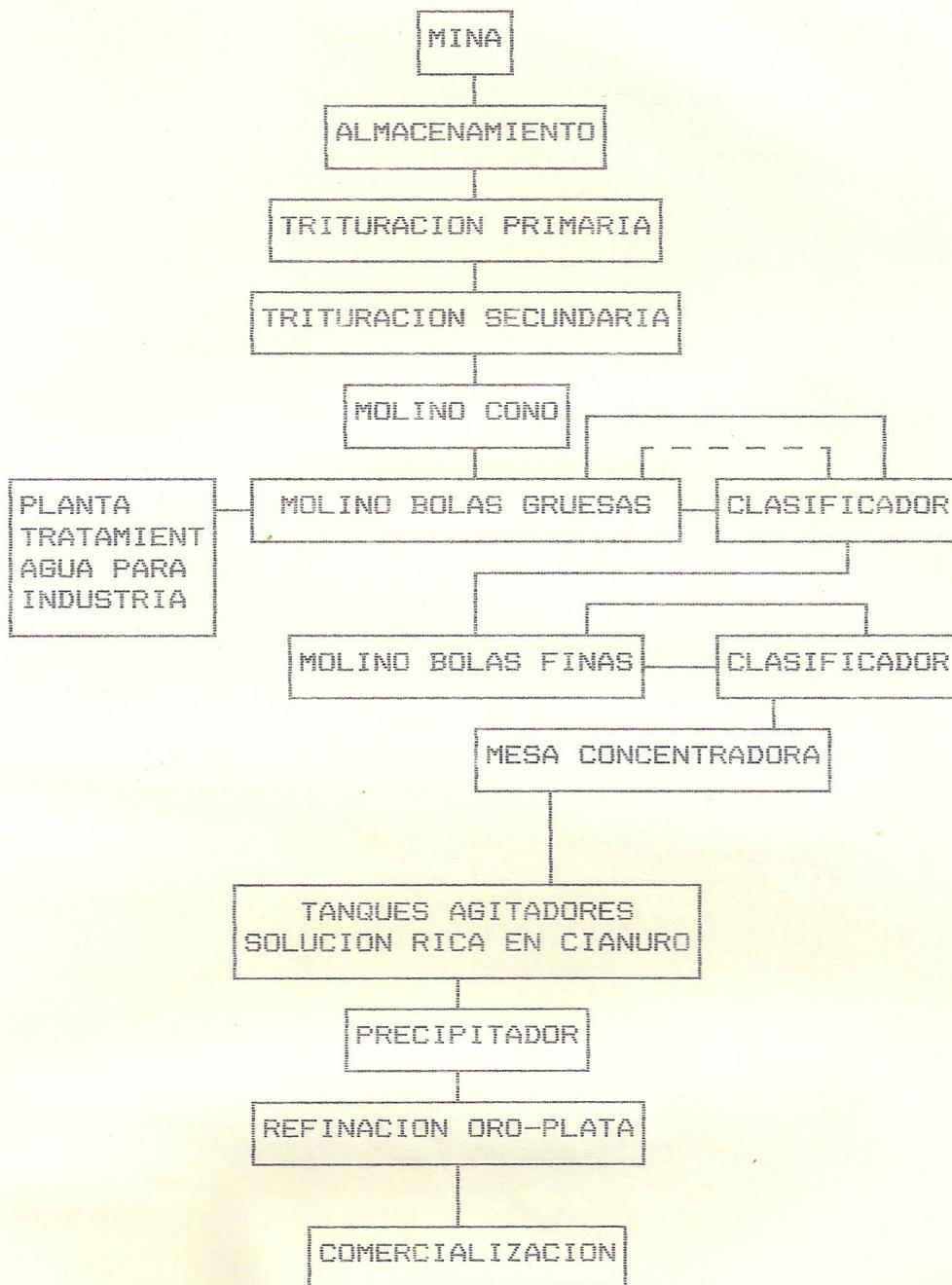


Fig. 19.- Transportación mecánica del mineral.



Fig. 20.- Piscinas de relaves con Leyes de 10/12 gr/tn.

## RECOMENDACIONES:



Con una planta con este diagrama de bloques se logró una recuperación de 97-98% del contenido total de ORO y PLATA de 24 kilates y 9.25 respectivamente.



**MINERAL:** El mineral es el producto bruto de la mina tal como sale, el cual es arrancado mediante el uso de explosivos.

El mineral contiene en todo caso dos partes:

- a. Parte valiosa
- b. Parte estéril, ganga o relave.

**PARTE VALIOSA:** Es la parte del mineral que tiene valor industrial o comercial, de allí nace la posibilidad de hacer un medio de sustentación para algunos cientos de familias ecuatorianas.

**PARTE ESTERIL, GANGA O RELAVE:** Es la parte del mineral que no tiene valor comercial y es necesario separar de la parte valiosa. La ganga está formada por sulfuros de hierro, roca, desmonte o insoluble.

**MINERAL RICO:** Es el que contiene el mineral de primera o de "VETA MADRE" y tiene una LEY ALTA.

**MINERAL POBRE:** Es el que contiene mineral de LEY BAJA y gran cantidad de GANGA.

**LEY:** Es el contenido de metal (ORO) que se encuentra en el cuarzo desprendido de las minas.

1950

11-501

1950	mm	1951	mm
1	6.35		
2	6.35		
3	6.35		
4	6.35		
5	6.35		
6	6.35		
7	6.35		
8	6.35		
9	6.35		
10	6.35		
11	6.35		
12	6.35		
13	6.35		
14	6.35		
15	6.35		
16	6.35		
17	6.35		
18	6.35		
19	6.35		
20	6.35		
21	6.35		
22	6.35		
23	6.35		
24	6.35		
25	6.35		
26	6.35		
27	6.35		
28	6.35		
29	6.35		
30	6.35		
31	6.35		
32	6.35		
33	6.35		
34	6.35		
35	6.35		
36	6.35		
37	6.35		
38	6.35		
39	6.35		
40	6.35		
41	6.35		
42	6.35		
43	6.35		
44	6.35		
45	6.35		
46	6.35		
47	6.35		
48	6.35		
49	6.35		
50	6.35		
51	6.35		
52	6.35		
53	6.35		
54	6.35		
55	6.35		
56	6.35		
57	6.35		
58	6.35		
59	6.35		
60	6.35		
61	6.35		
62	6.35		
63	6.35		
64	6.35		
65	6.35		
66	6.35		
67	6.35		
68	6.35		
69	6.35		
70	6.35		
71	6.35		
72	6.35		
73	6.35		
74	6.35		
75	6.35		
76	6.35		
77	6.35		
78	6.35		
79	6.35		
80	6.35		
81	6.35		
82	6.35		
83	6.35		
84	6.35		
85	6.35		
86	6.35		
87	6.35		
88	6.35		
89	6.35		
90	6.35		
91	6.35		
92	6.35		
93	6.35		
94	6.35		
95	6.35		
96	6.35		
97	6.35		
98	6.35		
99	6.35		
100	6.35		

APENDICE B

1) Numero de calles por año  
 2) Numero de calles por año

ASTM E11-60		DIN 4188	
MALLA 2)		AFNOR NFX 11-501	
	mm	No. 1)	mm
3	6.35		6.0
4	4.76		5.0
5	4.00		4.0
6	3.36		3.0
8	2.38		2.5
10	1.68	16	1.5
12	1.41		
14	1.19	25	1.2
16	1.00	36	1.04
20	0.85		
25	0.71	64	0.75
30	0.60	100	0.60
35	0.50	144	0.50
40	0.425	196	0.43
45	0.355	256	0.38
50	0.300	400	0.30
60	0.250	576	0.25
70	0.212	900	0.20
80	0.180		
100	0.150	1600	0.15
140	0.106	3600	0.100
170	0.090	4900	0.090
200	0.075	6400	0.075
230	0.063	10000	0.060
270	0.053		
325	0.045		
400	0.038		

- 1) Numeros de mallas por cm2  
2) Numeros de mallas por pulgada

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- A. F. Taggart, Handbook of Mineral Dressing.
- 2.- O. Labahn & W. Kamiski, Cement Engineers Handbook,  
Bauverlag.
- 3.- C. Mittag, Die Hartzerkleinerung, Springer Verlag.
- 4.- Auslegung Von Rohrmuhlen, AT 1969, Nr. 6, S. 294.
- 5.- A. S. Avery, "Work Hardening, in Relation to Abrasion  
Resistance" en Materials for the Mining Industry.  
Climax Molibdenum Co. 1974, p.43.