

T  
622.342  
CHU



ESCUELA SUPERIOR  
POLITECNICA DEL LITORAL  
Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

"TRATAMIENTO DE EFLUENTES: ESTUDIO PARA REDUCIR LA  
TOXICIDAD EN EFLUENTES RESULTANTES DE UN PROCESO  
INDUSTRIAL"

TOPICO DE GRADUACION

Previa a la Obtención del Título de:  
INGENIERO DE MINAS

Presentada por:  
*Daniel Chung Yépez*

---

*Guayaquil - Ecuador*

1999

---

DEDICATORIA



\*D-19444\*

a mi mamá  
a mi abuelita  
a mis hermanos

---

## AGRADECIMIENTO

- Al director de este Tópico, el Ing. Hugo Egüez.
  - A todos los miembros de la compañía ORENAS S.A. por haberme prestado todas las facilidades para la realización de este estudio.
  - A todos los personeros de la ESPOL por haberme brindado su respaldo durante los años de estudio.
  - A mis amigos y compañeros de aulas por el tiempo pasado.
  - A todos los que en manera directa o indirecta hayan ayudado en la realización de este trabajo.
-

## DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de este Tópico de Graduación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



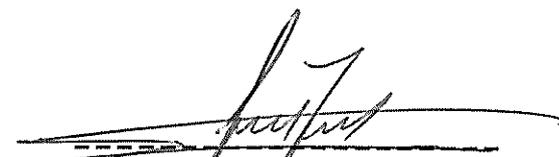
---

Daniel Chung Yépez

TRIBUNAL DE GRADUACION

-----  
Ing. Miguel A. Chavez  
Decano de la FICT

  
-----  
Ing. Hugo Eguez  
Director del Tópico

  
-----  
Ing. Francisco Torres  
Miembro del Tribunal

## RESUMEN

El siguiente trabajo muestra una alternativa para reducir la toxicidad en efluentes producto de industrias que emplean cianuro para lixiviar oro de menas auríferas.

Se realizaron pruebas para tratamiento químico de cianuro con los métodos:

- clorinación alcalina
- proceso con peróxido de hidrógeno
- precipitación de cianuro libre mediante ion ferroso
- proceso con dióxido de azufre y aire

En una primera etapa se observó el funcionamiento de los métodos. Esto consistió en pruebas controladas de cada método de destoxificación en soluciones patrones preparadas con cianuro de sodio y agua.

Una vez obtenido los parámetros de funcionamiento de cada uno de los métodos se procedió a probarlos en efluentes reales.

Por último se hizo un análisis económico del costo probable para la aplicación de los 4 métodos probados.

---

## INDICE GENERAL

pág.

RESUMEN.....	v
INDICE GENERAL.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	ix
INDICE DE TABLAS.....	x
INDICE DE FOTOGRAFIAS.....	xi
ABREVIATURAS.....	xii
INTRODUCCION.....	xiv

### CAPITULO 1

#### GENERALIDADES

1.1 Antecedentes.....	15
1.2 Identificación del problema.....	15
1.3 Proceso para la eliminación de desechos.....	16

### CAPITULO 2

#### CIANURACIÓN

2.1 Generalidades.....	17
2.2 Mecanismo de la cianuración (Química del cianuro)...	17
2.3 Disolución del oro.....	21
2.4 Toxicidad del cianuro y compuestos relacionados.....	21
2.4.1 Introducción .....	21
2.4.2 Factores que afectan la toxicidad.....	22
2.4.3 Toxicidad del cianuro libre.....	23
2.4.4 Toxicidad de los compuestos del cianuro.....	23
2.4.4.1 Cianuros complejos de hierro.....	23
2.4.4.2 Cianuros disociables en ácido débil....	24
2.4.4.3 Otros compuestos de cianuro.....	24
2.5 Destrucción del cianuro.....	25

### CAPITULO 3

## PROCEDIMIENTOS Y MÉTODOS ANALÍTICOS

3.1	Generalidades.....	26
3.2	Procedimientos analíticos para cianuro.....	26
3.2.1	Determinación del cianuro libre.....	26
3.2.2	Determinación del cianuro total disociable.....	29
3.2.3	Determinación del cianuro total.....	29
3.3	Determinación del contenido de metales en solución...	33

## CAPITULO 4

### PRUEBAS DE DESTOXIFICACIÓN

4.1	Generalidades.....	34
4.2	Selección de un método de destoxificación.....	35
4.3	Descripción de los métodos para tratamiento de efluentes cianúricos.....	35
4.3.1	Clorinación alcalina.....	35
4.3.2	Proceso con peróxido de hidrógeno.....	37
4.3.3	Precipitación de cianuro mediante ion ferroso..	38
4.3.4	Proceso con dióxido de azufre y aire.....	39
4.4	Pruebas de laboratorio.....	40
4.4.1	Objetivos.....	40
4.4.2	Descripción de las pruebas.....	40
4.4.3	Pruebas con soluciones de cianuro preparadas...	43
4.4.3.1	Preparación de las soluciones.....	43
4.4.3.2	Condiciones de las pruebas.....	43
4.4.3.3	Análisis de las soluciones.....	44
4.4.3.4	Resultados obtenidos.....	44
4.4.3.5	Análisis de los resultados.....	44
4.4.4	Pruebas en soluciones efluentes.....	46
4.4.4.1	Obtención de las muestras.....	46
4.4.4.2	Análisis de las soluciones.....	46
4.4.4.3	Conservación de las muestras.....	47
4.4.4.4	Condiciones de las pruebas.....	47
4.4.4.5	Resultados obtenidos.....	47
4.4.4.6	Análisis de los resultados.....	48
4.4.4.7	Conclusiones.....	49
4.5	Análisis económico.....	50
4.5.1	Análisis de costos.....	50
4.5.2	Comparación de los resultados.....	50

RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES.....	51
-------------------------------------	----

ANEXOS.....53

BIBLIOGRAFIA.....94



## INDICE DE FIGURAS

Figura	pág.
1. Diagrama de ocurrencia de HCN y CN según el pH.....	19
2. Diagrama $E_h$ -pH para el sistema CN-H <sub>2</sub> O a 25°C.....	20

---

## INDICE DE TABLAS

Tabla	pág.
1. Prueba con $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ; solución de 250 ppm NaCN.....	55
2. Prueba con $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ; solución de 500 ppm NaCN.....	56
3. Prueba con $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ; solución de 1000 ppm NaCN.....	57
4. Prueba con $\text{H}_2\text{O}_2$ ; solución de 250 ppm NaCN.....	58
5. Prueba con $\text{H}_2\text{O}_2$ ; solución de 500 ppm NaCN.....	59
6. Prueba con $\text{H}_2\text{O}_2$ ; solución de 1000 ppm NaCN.....	60
7. Prueba con $\text{H}_2\text{O}_2, \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ; solución de 500 ppm NaCN...	61
8. Prueba con $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; solución de 250 ppm NaCN.....	62
9. Prueba con $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; solución de 500 ppm NaCN.....	63
10. Prueba con $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; solución de 1000 ppm NaCN.....	64
11. Prueba con $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ; solución de 250 ppm NaCN.....	65
12. Prueba con $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ; solución de 500 ppm NaCN.....	66
13. Prueba con $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ; solución de 1000 ppm NaCN.....	67
14. Prueba con $\text{Na}_2\text{SO}_3, \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ; solución de 500 ppm NaCN.....	68
15. Prueba con $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ; solución efluente 1.....	69
16. Prueba con $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ; solución efluente 2.....	70
17. Prueba con $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ; solución efluente 3.....	71
18. Prueba con $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ; solución efluente 4.....	72
19. Prueba con $\text{H}_2\text{O}_2$ ; solución efluente 1.....	73
20. Prueba con $\text{H}_2\text{O}_2$ ; solución efluente 2.....	74
21. Prueba con $\text{H}_2\text{O}_2$ ; solución efluente 3.....	75
22. Prueba con $\text{H}_2\text{O}_2$ ; solución efluente 4.....	76
23. Prueba con $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; solución efluente 1.....	77
24. Prueba con $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; solución efluente 2.....	78
25. Prueba con $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; solución efluente 3.....	79
26. Prueba con $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; solución efluente 4.....	80
27. Prueba con $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ; solución efluente 1.....	81
28. Prueba con $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ; solución efluente 2.....	82
29. Prueba con $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ; solución efluente 3.....	83
30. Prueba con $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ; solución efluente 4.....	84
31. Consumo de reactivos de las diferentes pruebas.....	85
32. Costos estimados de tratamiento por los diferentes métodos.....	86
33. Requerimientos para purificación de efluentes.....	87

## INDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografía	pág.
1. Reactores de cianuración.....	88
2. Toma de muestra de efluente de cianuración.....	89
3. Determinación de cianuro libre mediante titulación con nitrato de plata.....	90
4. Aparato de destilación para determinación de cianuro total.....	91
5. Agitación mecánica de pomas de prueba.....	92
6. Prueba de destoxificación en cilindro graduado.....	93

---

## ABREVIATURAS

Au	:	oro
Ag	:	plata
AgNO <sub>3</sub>	:	nitrato de plata
Ca(ClO) <sub>2</sub>	:	hipoclorito de calcio
cm <sup>3</sup>	:	centímetro cúbico
Cl	:	cloro
CN	:	cianuro
CNCl	:	cloruro cianógeno
CNL	:	cianuro libre
CNO	:	cianato
CNT	:	cianuro total
Cu	:	cobre
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	:	sulfato cúprico pentahidratado
°C	:	grado centígrados
dm <sup>3</sup>	:	decímetro cúbico
Fe	:	hierro
FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	:	Sulfato de hierro heptahidratado
g	:	gramo
GA	:	grado analítico
HCN	:	ácido cianhídrico
H	:	hidrógeno
H <sub>2</sub> O	:	agua
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	:	peróxido de hidrógeno
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	:	ácido sulfúrico
kg	:	kilo
KI	:	yoduro de potasio
kPa	:	kilo Pascal
kw	:	kilowatio
l	:	litro
LC	:	concentración letal
Máx.	:	máximo
mg	:	miligramo
min	:	minuto
ml	:	mililitro
mm	:	milímetro
N	:	nitrógeno
Na	:	sodio
NaCN	:	cianuro de odio

---

NaOH : hidróxido de sodio  
Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> : sulfito de sodio  
Ni : níquel  
O : oxígeno  
OH : oxidrilo  
pH : potencial hidrógeno  
pp, pág. : página  
ppm : partes por millón  
RPM : revoluciones por minuto  
SCN : tiocianato  
SO<sub>2</sub> : dióxido de azufre  
WAD : disociable en ácido débil  
US\$ : dólar de Estados Unidos de América  
Zn : zinc

---

## INTRODUCCION

El uso de cianuro para la lixiviación del oro es uno de los métodos más empleados en la minería. Gran parte de esta popularidad se basa en la relativa facilidad en su aplicación y la alta efectividad alcanzada para la recuperación de este preciado metal.

Este proceso, conocido como cianuración, se basa en la propiedad del oro a ser disuelto en soluciones diluidas de cianuro. El mineral, al estar en contacto con una solución de cianuro y en presencia del oxígeno del aire, es químicamente atacado, formando cianuro de oro en solución. El oro es precipitado de la solución cianurada, y el resto de la solución, denominado como efluente de cianuración es desechado.

Este efluente de cianuración es altamente tóxico por contener aún cianuro libre en solución, así como compuestos cianuro-metal producto de la lixiviación de otros metales durante el proceso.

La importancia que merece el tratamiento del efluente de cianuración, para reducir su concentración de cianuro y metales antes de su descarga final, produciendo de esta manera efluentes que sean compatibles con los sistemas receptores, es lo que ha motivado el desarrollo de métodos para destoxificar estos efluentes.

---

TEMA:

"TRATAMIENTO DE EFLUENTES: ESTUDIO PARA REDUCIR LA TOXICIDAD EN EFLUENTES RESULTANTES DE UN PROCESO INDUSTRIAL"

## CAPITULO 1: Generalidades

- 1.1. Antecedentes
- 1.2. Identificación del problema
- 1.3. Proceso para la eliminación de desechos

## CAPITULO 2: Cianuración

- 2.1. Generalidades
- 2.2. Mecanismo de la cianuración (Química del cianuro)
- 2.3. Disolución del oro
- 2.4. Toxicidad del cianuro y compuestos relacionados
  - 2.4.1. Introducción
  - 2.4.2. Factores que afectan la toxicidad
  - 2.4.3. Toxicidad del cianuro libre
  - 2.4.4. Toxicidad de los compuestos del cianuro
    - 2.4.4.1. Cianuros complejos de hierro
    - 2.4.4.2. Cianuros disociables en ácido débil
    - 2.4.4.3. Otros compuestos de cianuro
- 2.5. Destrucción del cianuro

## CAPITULO 3: Procedimientos y métodos analíticos

- 3.1. Generalidades
- 3.2. Procedimientos analíticos para cianuro
  - 3.2.1. Determinación del cianuro libre
  - 3.2.2. Determinación del cianuro total disociable
  - 3.2.3. Determinación del cianuro total
- 3.3. Determinación de los metales en solución

## CAPITULO 4: Pruebas de destoxificación

- 4.1. Generalidades
- 4.2. Selección de un método de destoxificación
- 4.3. Descripción de los métodos para tratamiento de efluentes cianúricos
  - 4.3.1. Clorinación alcalina
  - 4.3.2. Proceso con peróxido de hidrógeno
  - 4.3.3. Precipitación de cianuro mediante ion ferroso

- 4.3.4. Proceso con dióxido de azufre y aire
- 4.4. Pruebas de laboratorio
  - 4.4.1. Objetivos
  - 4.4.2. Descripción de las pruebas
  - 4.4.3. Pruebas con soluciones de cianuro preparadas
    - 4.4.3.1. Preparación de las soluciones
    - 4.4.3.2. Condiciones de las pruebas
    - 4.4.3.3. Análisis de las soluciones
    - 4.4.3.4. Resultados obtenidos
    - 4.4.3.5. Análisis de los resultados
  - 4.4.4. Pruebas en soluciones reales
    - 4.4.4.1. Obtención de las muestras
    - 4.4.4.2. Análisis de las soluciones
    - 4.4.4.3. Conservación de las muestras
    - 4.4.4.4. Condiciones de las pruebas
    - 4.4.4.5. Resultados obtenidos
    - 4.4.4.6. Análisis de los resultados
    - 4.4.4.7. Conclusiones
- 4.5. Análisis económico
  - 4.5.1. Análisis de costos
  - 4.5.2. Comparación de los resultados
- 4.6. Conclusiones

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## **CAPITULO 1**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1. ANTECEDENTES**

Los estudios fueron realizados en las instalaciones de la planta de cianuración ORENAS S.A.

La extracción del oro de las menas metálicas mediante soluciones alcalinas de cianuro ha sido un proceso importante en los últimos 90 años. Las aguas desechadas de estas operaciones generalmente contienen cantidades considerables de cianuro de sodio y complejos disociables de cianuros metálicos que son altamente tóxicas, a tal punto que logran eliminar todo vestigio de vida acuática en los lugares donde estas son vertidas.

La necesidad de reducir la toxicidad en los efluentes líquidos ha llevado al estudio y desarrollo de métodos para el tratamiento de estos.

#### **1.2. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA**

Siendo la evacuación de desechos un problema en toda operación industrial, en el caso de las plantas cianuradoras esto no podría haber sido una excepción.

Mas aun teniendo en cuenta que el cianuro es una sustancia imprescindible en el proceso y partiendo del hecho de que el cianuro es una sustancia altamente tóxica, es fácilmente deducible que los residuos producidos de la operación son también contaminantes potenciales.

Un análisis somero al asunto nos permite reconocer la existencia de un problema grave, como es la producción de efluentes tóxicos y su peligrosa descarga hacia los acuíferos cercanos.

Además de que los efluentes generados son de naturaleza muy compleja, producto de la diversidad de los materiales procesados en cada planta. Esto repercutirá en una elección de un método para su tratamiento.

#### **1.3. PROCESO PARA LA ELIMINACION DE DESECHOS**

La practica común, una vez recuperado el oro de la solución cianurada, la pulpa es desechada y transportada normalmente hacia una presa de residuos.

La presa de residuos posee como única finalidad el de retener los sólidos para que estos no vayan hacia algún sistema hidrológico circundante y logran detener durante algún tiempo a los desechos líquidos, lapso en el cual parte del cianuro residual logra descomponerse por la acción de la luz solar reduciendo parcialmente su toxicidad.

Aun, a pesar de ello, los efluentes resultantes poseen una toxicidad relativamente alta en el momento de su descarga final, causando la contaminación de las aguas en las zonas donde operan estas plantas.

## **CAPITULO 2**

### **CIANURACION**

#### **2.1. GENERALIDADES**

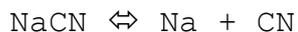
La química de los compuestos cianógenos no es solamente una de las más antiguas, sino también una de las más fascinantes en el campo de la ciencia. Es extraño que siendo el ácido cianhídrico uno de los materiales más tóxicos y mortales, sea uno de los componentes básicos para el germen de la vida.

Actualmente encontramos productos de cianuro en todas partes. En diferentes formas se originan de los sectores de la química inorgánica y de polímeros. El cianuro juega un papel indispensable en la industria metalúrgica, electroplateo y en la minería.

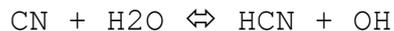
La aplicación comercial del cianuro para la extracción del oro tiene cerca de un siglo, desde 1898 cuando fue utilizado por primera vez en Nueva Zelanda y Africa. La cianuración es un proceso muy eficiente capaz de extraer oro de menas relativamente pobres con una eficiencia del 90%.

#### **2.2. MECANISMO DE LA CIANURACION (QUIMICA DEL CIANURO)**

Las sales simples de cianuro, como los cianuros de sodio, potasio y calcio, se disuelven e ionizan en agua para formar cationes de su respectivo metal e iones de cianuro libre:



Los iones cianuro se hidrolizan en agua para formar moléculas de cianuro de hidrogeno:



A un pH aproximado de 9,3, una mitad del cianuro libre existe como HCN y la otra mitad como iones de cianuro. A un pH 10,2 mas del 90% del cianuro existirá como ion cianuro, mientras a pH de 8,4 el 90% existirá como HCN. Esto es importante porque el HCN posee una presión de vapor relativamente alta (100 kPa a 26°C ) y consecuentemente puede volatilizar fácilmente en la superficie líquida bajo condiciones ambientales, causando pérdidas de cianuro. La rata de volatilización dependerá de la concentración de HCN (función de la concentración de cianuro total y del pH), el

área superficial y profundidad del líquido, temperatura y fenómenos causados durante la agitación del líquido. Por esas razones, los sistemas de lixiviación con cianuro opera con un pH que minimizan pérdidas de cianuro, típicamente sobre un pH 10, pero efectos adversos pueden causar si el pH es elevado excesivamente.

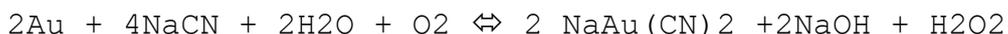
De acuerdo al diagrama Eh-pH para el sistema CN-H<sub>2</sub>O, tanto el cianuro de hidrogeno como el ion cianuro puede ser oxidados a cianato en presencia del oxígeno y bajo condiciones convenientes de oxidación:



Según el diagrama Eh-pH para el sistema CN-H<sub>2</sub>O, la oxidación se produce en forma espontánea, pero en la práctica se necesitan agentes oxidantes fuertes tales como el ozono, peróxido de hidrogeno o el ácido hipocloroso para que esta reacción proceda a una rata significativa.

### **2.3. DISOLUCION DEL ORO**

La cianuración del oro se cree que es un proceso de 2 fases en el cual se forma peróxido de hidrogeno como producto intermediario:



La reacción completa conocida como la ecuación de Elsner es la siguiente:



Debido al fuerte compuesto formado entre el cianuro y el oro es posible la utilización de soluciones relativamente débiles de cianuro para la disolución del oro. En ausencia de otros complejos metal-cianuro, una solución de 100 mg/l de NaCN (cerca del 50% CN) podrá proveer la máxima rata de disolución.

En defecto de la especificidad relativa de la reacción oro-cianuro, otros metales y constituyentes inorgánicos reaccionan con el cianuro y en cierto grado con el hidróxido, resultando en un incremento en su consumo.

### **2.4. TOXICIDAD DEL CIANURO Y COMPUESTOS RELACIONADOS**

FIGURA #1

Diagrama de ocurrencia de HCN y CN según el pH [4]

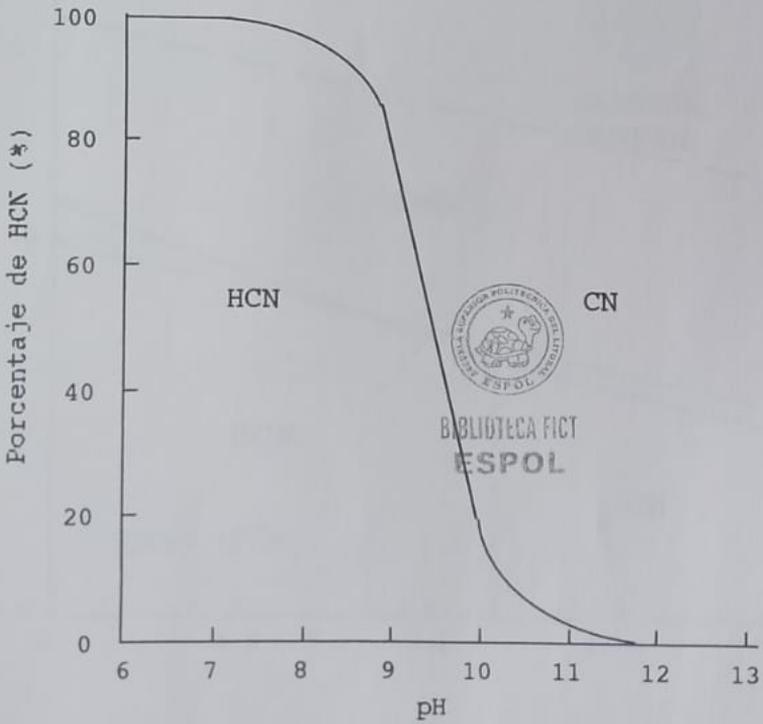
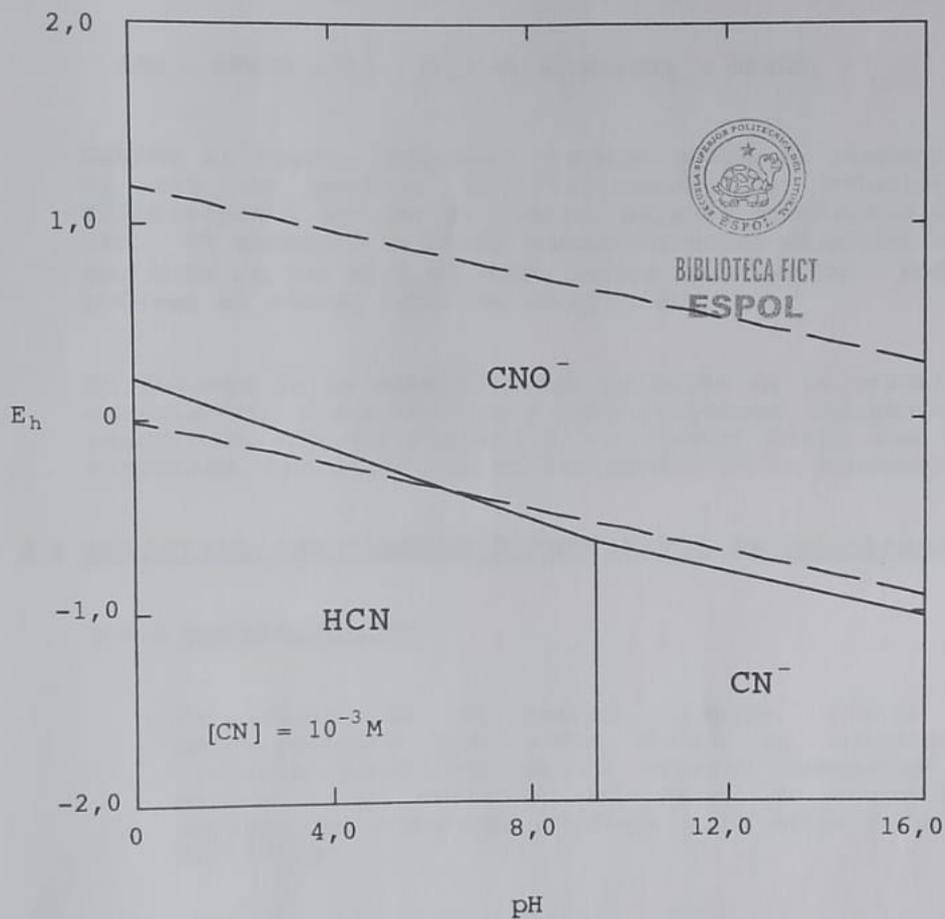


FIGURA #2

Diagrama  $E_h$ -pH para el sistema CN-H<sub>2</sub>O a 25°C [4]

#### **2.4.1. GENERALIDADES**

Un tóxico es un agente químico, físico o bacteriológico que actúa sobre un organismo viviente produciéndole un efecto indeseable o dañino. La medición del nivel de toxicidad depende del organismo afectado y la dosis y forma del tóxico.

La toxicidad del cianuro en residuos industriales esta relacionada con su forma y concentración. Varias formas de cianuro están también presentes en los desechos sólidos. Como regla general la toxicidad esta relacionada con la facilidad del compuesto a disociarse y liberar cianuro libre, es decir, dependerá de la estabilidad del compuesto.

De acuerdo a estudios relativos al tema, las formas toxicológicas más significativas son el cianuro libre (CN y HCN) y los compuestos disociables en ácido débil o compuestos WAD: la toxicidad de los complejos cianuro-metal esta atribuida a la concentración del cianuro libre que se encuentra en equilibrio con el complejo metálico.

La toxicidad del cianuro libre y los complejos metalogenicos pueden manifestarse en forma aguda o crónica. La toxicidad aguda esta normalmente asociada con los efectos letales inmediatos observados en organismos expuestos a concentraciones elevadas d un compuesto particular. El periodo de toxicidad aguda varia desde unos pocos minutos hasta algunos días.

Un termino tradicional para medir la toxicidad es el LC50, que indica la concentración letal de tóxico que causa la muerte al 50% de una población de organismos en un lapso especifico de tiempo. El tiempo usual es de 96 horas.

#### **2.4.2. FACTORES QUE AFECTAN LA TOXICIDAD**

En adición a la concentración de cianuro total en una solución, otros factores asociados con la química del sistema receptor afectan la toxicidad del cianuro y sus complejos metálicos.

En general, la toxicidad crece a medida que se incrementa la temperatura, pero nuevamente, este factor es dependiente del organismo afectado.

Otro factor importante es el pH del agua descargada y del sistema receptor. A un pH menor a 8, cerca del 95% del cianuro libre presente esta en forma de HCN. La toxicidad

del anion cianuro libre e 0,4 veces que la de su similar ácido.

### **2.4.3. TOXICIDAD DEL CIANURO LIBRE**

La toxicidad y metabolismo del cianuro libre esta bien documentada. Como se menciona anteriormente, la toxicidad del cianuro radica en la inhabilitación del tejido celular a utilizar oxigeno para funciones aeróbicas. El cianuro libre es introducido dentro de un organismo por inhalación, ingestión o por absorción a través de la piel o de las branquias en el caso de los peces.

Las concentraciones letales para mamíferos y organismos acuáticos varían de acuerdo a las especies. La dosis letal para humanos varia entre 50 a 200 mg (1-3 mg/kg), la muerte ocurre en menos de una hora. El cianuro no es acumulativo y es rápidamente metabolizado. No existe evidencia que una exposición crónica hacia el cianuro libre traiga consigo efectos cancerígenos, mutagenos o teratogenicos.

### **2.4.4. TOXICIDAD DE LOS COMPUESTOS METALICOS**

#### **2.4.4.1. CIANUROS COMPLEJOS DE HIERRO**

Los complejos cianuro-metal con iones férrico y ferroso son en esencia no tóxicos en los niveles que presentan los efluentes de cianuración (2-40 mg/l).

El cianuro de hierro existe hasta pH bajos, pero puede ser descompuesto fotolíticamente por la luz ultravioleta, liberando cianuro libre. Pruebas conducidas en áreas poco ventiladas y en presencia de luz solar han demostrado que concentraciones tan bajas como 1 mg/l de cianuro de hierro son letales a las pocas horas. No obstante, estos experimentos no reflejan condiciones naturales realistas y no consideran la atenuación por hidrólisis, oxidación, adsorción y volatilización.

De aquí que la toxicidad de los cianuros de hierro esta relacionada con su potencial para descomponerse y liberar cianuro libre, no al compuesto en sí. No existe evidencia de acumulación de cianuro libre en efluentes debido a la descomposición del cianuro de hierro, la formación de este ultimo es rápidamente removida en ambientes naturales por volatilización, oxidación o complejandose en un cianuro WAD menos tóxico.

#### **2.4.4.2. CIANUROS DISOCIABLES EN ACIDO DEBIL (WAD)**

Como cianuro WAD se reporta no solamente al cianuro libre sino a los cianuros que están ligados a ciertos metales, los más importantes: cobre, níquel y zinc.

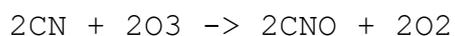
Estos compuestos exhiben un grado de estabilidad muy variado y tendencias para descomponerse y liberar cianuro libre cuando son comparados con los cianuros de hierro. Desde el punto de vista para tratamiento, estos compuestos son rápidamente degradados y deben serlo necesariamente.

#### **2.4.4.3. OTROS COMPUESTOS DE CIANURO**

Las reacciones del cianuro con minerales sulfurosos pueden formar tiocianatos (SCN) y aquellas con oxígeno y agua pueden resultar en la producción de cianato (CNO) y amoníaco (NH<sub>3</sub>). En general, la toxicidad de estos compuestos es mucho más baja que el cianuro iónico o los complejos cianuro-metal.

#### **2.5. DESTRUCCION DEL CIANURO**

El cianuro es un compuesto biodegradable, pudiendo ser descompuesto en dióxido de carbono y amoníaco. Tanto el cianuro como el cianato y el tiocianato pueden ser destruidos por el ozono.



La biodegradación del cianuro es acelerada por la acción de la luz solar e inhibida por las bajas temperaturas. La oxidación de ciertos compuestos cianuro metal (cianuros de Ni, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Au o Ag) deben de ser asistida por luz ultravioleta.

## **CAPITULO 3**

### **PROCEDIMIENTOS Y METODOS ANALITICOS**

#### **3.1. GENERALIDADES**

Para el estudio de los efluentes de cianuración, es de vital importancia la cuantificación de los cianuros y de los metales que están contenidos en estos.

Básicamente lo anterior se refiere a la determinación del cianuro libre y cianuro total que se encuentran presentes, el primero por su capacidad de complejarse, mientras el segundo por la dificultad de disociarse; en cuanto a los metales, los más importantes son el hierro, cobre, níquel y zinc.

#### **3.2. PROCEDIMIENTOS ANALITICOS PARA CIANURO**

Debido a la capacidad del cianuro a descomponerse, las determinaciones para cianuro generalmente deben de ser realizadas lo antes posible luego de haber obtenido la muestra. Todas las determinaciones para cianuro fueron realizadas en el laboratorio de la planta ORENAS S.A.

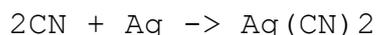
##### **3.2.1. DETERMINACION DEL CIANURO LIBRE**

Como cianuro libre se entiende al cianuro disociado de compuestos de cianuro en soluciones alcalinas y disponible para la disolución de metales, incluye todos los cianuros alcalinos y terreo-alcalinos y ciertos cianuros alcalinos de zinc.

Para determinar la concentración de cianuro libre se utilizo el método de titulación con nitrato de plata y yoduro de potasio como indicador

##### *Principio*

Este método esta basado en la formación del ion complejo  $Ag(NO)_2$  por la adición de nitrato de palta a la solución a analizarse:



En el momento que la reacción se completa, el exceso de plata es detectado por el indicador yoduro de potasio, formándose un precipitado color amarillo opalescente:



Por medio de la cantidad de nitrato de plata consumida y del volumen de muestra analizada se obtiene el valor de la concentración de cianuro de la misma.

#### *Reactivos*

(a) Solución de nitrato de plata: 0.0202 mol/dm<sup>3</sup>

Se disuelve 1.733 g de reactivo (AgNO<sub>3</sub>) en agua, y se lo diluye a 1 dm<sup>3</sup>. La cantidad de 1,00 cm<sup>3</sup> de solución así preparada puede ser aceptada como equivalente a 1,00 mg de cianuro de sodio (NaCN)

(b) Solución indicador: yoduro de potasio al 10%

Se disuelve 10 g de reactivo yoduro de potasio (KI) en agua, y se diluye en un matraz de 100 cm<sup>3</sup>.

(c) Solución nitrato de cadmio: 0.5 mol/dm<sup>3</sup>

Se disuelve 154,25 g de nitrato de cadmio [Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O] y se diluye en un matraz de 1 dm<sup>3</sup>.

Todos los reactivos deben ser de grado analítico y el agua destilada.

#### *Procedimiento*

1. Se transfiere una cantidad de muestra adecuada a un matraz Erlenmeyer. Esta cantidad dependerá de la cantidad de cianuro esperado.
2. Se agrega 5 cm<sup>3</sup> de solución de nitrato de cadmio para eliminar la interferencia por sulfuros. Se deja que el precipitado amarillo se asiente y se pasa la solución a través del papel filtro. Se lava con agua al papel y con el residuo.
3. A lo filtrado se le agregan unas gotas de solución indicador. Se titula con la solución de nitrato de plata hasta que la solución se torne de un color amarillo escarlata.

#### *Calculo*

$$\text{NaCN (concentración)} = \frac{a \text{ mg}}{V \text{ dm}^3}$$

Donde:

a es el volumen de solución de AgNO<sub>3</sub> utilizado para titular la muestra (cm<sup>3</sup>)

V es el volumen de muestra (cm<sup>3</sup>)

Es importante de notar que el valor para cianuro libre depende bastante del pH.

El método de titulación con nitrato de plata es confiable para concentraciones mayores a 10 ppm de cianuro, pero pueden alcanzar valores mínimos de hasta 1 ppm.

### **3.2.2. DETERMINACION DEL CIANURO TOTAL DISOCIABLE**

El termino de cianuro total disociable comprende al cianuro libre, así como a todos los cianuros alcalinos simples y los cianuros alcalinos de zinc y cadmio.

En soluciones fuertemente alcalinas (pH mayores que 11) el cianuro de hidrogeno y otros complejos inestables son completamente ionizados.

El procedimiento para la determinación del cianuro total disociable es similar al del método dado para la determinación del cianuro libre, únicamente difiere en que el pH de la solución es ajustada a mas de 12 mediante la adición de unas gotas de solución de hidróxido de sodio.

### **3.2.3. DETERMINACION DEL CIANURO TOTAL**

Como cianuro total se entiende a la suma del cianuro libre, los cianuros de oro, plata, cobre, mercurio, plomo, níquel, hierro, zinc y cadmio.

#### *Principio*

El cianuro, en forma de cianuro de hidrogeno (HCN) es desprendido de la solución a ser analizada, por medio de una destilación con reflujo. Un ácido fuerte es agregado para bajar el valor del pH a menos de 2, el HCN liberado es transferido por medio de una corriente de aire a un tubo de absorción conteniendo una solución cáustica, donde es recogido.

Se transfiere el contenido del tubo de absorción a un recipiente de volumen conocido y por medio de titulación con nitrato de plata se obtiene la concentración de cianuro para el volumen del recipiente.

La concentración de cianuro total de la muestra se lo obtiene a partir del valor de cianuro obtenido, el volumen del recipiente y el volumen original de la muestra.

## *Equipos*

### (a) Equipo para destilación

El equipo de destilación consiste de un frasco de digestión de 500 cm<sup>3</sup>, un tubo de entrada y un condensador para agua. El diámetro interno del tubo de entrada es de 9 mm y este se lo coloca hasta unos 6 mm sobre el fondo del frasco.

### (b) Absorbedor de gases

El absorbedor de gases es de unos 100 cm<sup>3</sup> de capacidad y esta equipado con un tubo y un dispersor de gases de mediana porosidad.

### (c) Mechero Bunsen

### (d) Bomba de vacío

La bomba de vacío estará conectada hacia el absorbedor de gases por medio de un frasco de vacío y deberá tener incorporado un controlador de flujo.

## *Reactivos*

### (a) Thiosulfato de sodio: cristales

### (b) Solución nitrato de cadmio: 0.5 mol/dm<sup>3</sup>

Se disuelve 154,25 g de nitrato de cadmio [Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O] y se diluye en un matraz de 1 dm<sup>3</sup>.

### (c) Solución de nitrato de plata: 0,0102 mol/dm<sup>3</sup>

Se disuelve 1,733 g de reactivo (AgNO<sub>3</sub>) en agua, y se lo diluye a 1 dm<sup>3</sup>.

### (d) Solución de hidróxido de sodio: 1 mol/dm<sup>3</sup>

Se disuelve 40 g de hidróxido de sodio (NaOH) en agua y se lo diluye en un matraz de 1 dm<sup>3</sup>.

### (e) Solución indicador: yoduro de potasio al 10%

Se disuelve 10 g de reactivo yoduro de potasio (KI) en agua, y se diluye en un matraz de 100 cm<sup>3</sup>.

### (f) Zinc metálico: polvo

### (g) Acido fosfórico: concentrado

### (h) Solución de cloruro de magnesio: 240 g/dm<sup>3</sup>

Se disuelve 510 g de cloruro de magnesio hidratado (MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O) en agua y se lo diluye a 1 dm<sup>3</sup>.

### (i) Solución de cloruro de mercurio: 68 g/dm<sup>3</sup>

Se disuelve 68 g de cloruro de mercurio (HgCl<sub>2</sub>) en agua y se lo diluye a 1 dm<sup>3</sup>.

Todos los reactivos deben ser de grado analítico y el agua destilada.

#### *Procedimiento*

1. Se transfiere una cantidad adecuada de muestra al frasco para digestión: De ser necesario diluir hasta 250 cm<sup>3</sup>.
2. Se agrega 50 cm<sup>3</sup> de solución de hidróxido de sodio al absorbedor de gases.
3. Se conecta el sistema de destilación, consistente en el frasco de digestión, tubo de entrada, condensador, tubos conectores, absorbedor de gases, frasco de vacío y bomba de vacío.
4. Se ajusta el vacío de tal manera que la velocidad del flujo, a través de la solución en el frasco sea de uno a dos burbujas por segundo. Se controla que el flujo sea constante durante la destilación para asegurar el transporte del gas cianhídrico desde el frasco hasta el absorbedor. El vacío correcto preverá el escape del gas por el tubo de entrada.
5. Se agrega 1 g de polvo de zinc por el tubo de entrada. Se lava el tubo con agua, se deja que el contenido dentro del frasco se mezcle durante 5 minutos por medio del flujo de aire. Se agrega 20 cm<sup>3</sup> de solución de cloruro mercúrico y 10 cm<sup>3</sup> de solución de cloruro de magnesio. Se deja mezclar por 3 minutos.
6. Se agrega lentamente y con cuidado 15 cm<sup>3</sup> de ácido fosfórico. Se deja mezclar por 5 minutos.
7. Se calienta por 2 horas. Hay que controlar que la temperatura en el sistema sea tal que evite un inundamiento en el tubo del condensador. No se debe permitir que el vapor alcance mas de la mitad de la capacidad del condensador. Un reflujo adecuado es indicado por una razón de reflujo de 40 a 50 gotas por minuto desde la salida del condensador.
8. Se finaliza con el calentamiento, pero se mantiene el vacío por 15 minutos más. Transferimos el contenido del absorbedor de gases a un frasco volumétrico adecuado. Se diluye a volumen mediante agua.
9. Se procede como en el caso para determinación de cianuro libre.

### **3.3. DETERMINACION DEL CONTENIDO DE METALES EN SOLUCION**

Se ha reportado que un total de 28 elementos son capaces de formar compuestos con el cianuro, existiendo 72 complejos de cianuros metálicos posibles. El cianuro tiene una selectividad para disolver al oro y la plata de las menas, pero terminara formando compuestos con el mercurio, zinc, cobre, hierro, níquel y plomo presentes en las mismas.

Básicamente la concentración de los metales, como compuestos cianúricos en solución, dependerá de la solubilidad de los minerales a soluciones de cianuro y de la abundancia de estos.

En los estudios de efluentes se considera como metales a ser monitoreados al hierro, níquel, cobre y zinc por ser los más abundantes; en el caso de este trabajo, debido a la escasez de minerales de níquel en los materiales cianurados, las soluciones a ser estudiadas se le determinara únicamente el contenido de hierro, cobre y zinc.

Los metales en este estudio fueron determinados por medio de espectrofotometría de absorción atómica en el Instituto de Ciencias Químicas de la ESPOL.

## **CAPITULO 4**

### **PRUEBAS DE DESTOXIFICACION**

#### **4.1. GENERALIDADES**

La necesidad de descargar los residuos líquidos en el medio ambiente resulta en que estos se vuelvan un contaminante potencial a los sistemas naturales de aguas superficiales y subterráneas.

Los procesos más empleados para reducir las concentraciones de constituyentes tóxicos son por:

1. dilución
2. eliminación
3. conversión a una forma química menos tóxica (normalmente referido como destrucción o degradación en el caso de especies tóxicas de cianuro)

En el caso de la destoxificación del cianuro los métodos pueden ser agrupados en las siguientes categorías:

1. Remoción del cianuro: volatilización y adsorción en los minerales.
2. Oxidación hacia cianato: oxidación natural, proceso de peróxido de hidrogeno, proceso de dióxido de azufre, proceso de clorinación alcalina, oxidación biológica y ozonización.
3. Complejación a cianuro de hierro, compuesto poco tóxico, con el potencial de ser removido como una sal doble.

#### **4.2. SELECCIÓN DE UN METODO PARA DESTOXIFICACION**

Los criterios utilizados para seleccionar un método para tratamiento de agua de desecho son basados a partir de la efectividad de estos para reducir los compuestos a niveles aceptados y a las características del sistema hidrológico receptor.

En el caso del tratamiento de soluciones con cianuro, también se deberá tomar en cuenta de su efectividad en el tratamiento y remoción de los metales residuales presentes en la solución.

Los métodos para tratamiento deben ser seleccionados de acuerdo a la viabilidad de ser aplicados en un proceso en cuestión. Para la determinación del tipo de proceso que se necesita para un correcto tratamiento, así como para obtener una necesaria información en el diseño de una planta a una escala mayor. La selección después de este punto se basará en la comparación tanto de la efectividad como de la inversión y costo de operación.

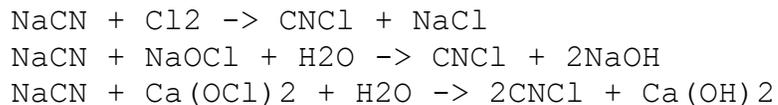
### **4.3. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS PARA TRATAMIENTO DE EFLUENTES CIANÚRICOS**

#### **4.3.1. CLORINACIÓN ALCALINA**

El cloro ha sido utilizado para la destrucción del cianuro en los comienzos de la cianuración, ya que el cloro y derivados eran fácilmente obtenibles en la industria en esa época.

La clorinación alcalina es un proceso químico que implica la oxidación y destrucción del cianuro en estado libre y en compuestos débiles (cianuros WAD) bajo condiciones alcalinas (pH > 11).

La destrucción del cianuro usando iones de hipoclorito ó gas cloro procede vía el compuesto tóxico, cloruro cianógeno (CNCl) de acuerdo a una de las siguientes reacciones:



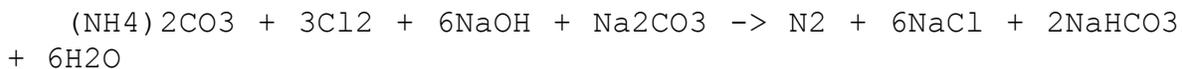
Esta reacción ocurre casi instantáneamente, con el elevado pH de la reacción, el cloruro cianógeno es rápidamente hidrolizado a cianato de acuerdo a la reacción:



El tiempo en que esto ocurre es entre 10 a 15 minutos dependiendo del pH. Si existe suficiente iones hipoclorito, el cianato se oxida a amoníaco y carbonato:



La hidrólisis requiere aproximadamente entre 1 a 1,5 horas, aunque hay ocasiones que puede tardar mucho más. Si se agrega un exceso de iones hipoclorito, el amoníaco reacciona para convertirse en gas nitrógeno:



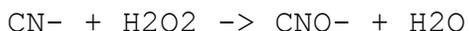
Normalmente el proceso no llega hasta este punto debido al excesivo consumo de cloro que implica y un período de reacción muy grande. La oxidación de cianuro a cianato requiere aproximadamente 2,75 partes de cloro por parte de cianuro, aunque en la práctica el consumo es mucho mayor.

La clorinación alcalina puede remover, bajo condiciones ambientales, todas formas de cianuros, excepto los muy estables cianuros de hierro.

#### **4.3.2. PROCESO CON PEROXIDO DE HIDROGENO**

El peróxido de hidrógeno es un elemento ampliamente utilizado en la industria para la destoxificación del cianuro. Este proceso tiene la amplia ventaja sobre otras técnicas de destoxificación, ya que no introduce sustancias extrañas durante su aplicación.

El cianuro libre es oxidado en presencia del peróxido de hidrógeno, la química del proceso puede ser ilustrada de la siguiente manera:



Este método es efectivo en un amplio rango de pH. En solución alcalina, los compuestos débiles como los cianuros WAD, son oxidados a cianato y a sus correspondientes hidróxidos metálicos, aunque el pH óptimo para la remoción de estos es 9,5. Los compuestos de cianuro de hierro son removidos con un pH menor a 9,0. Pero como la remoción de los cianuros de los otros metales es más importante (debido a la baja toxicidad del cianuro de hierro), siempre se mantiene en un pH de más de 9,0.

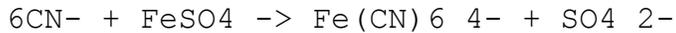
La oxidación de los iones cianuro es acelerada en presencia de catalizadores como iones de cobre ó formaldehído. En el primer caso, el más utilizado, los iones de cobre son suministrados en forma de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), pero normalmente, el contenido de cobre presente en el efluente, es suficiente para que acelere la reacción.

El tiempo de reacción para llegar a una concentración adecuada varía de entre 20 minutos a 4 horas, dependiendo de

la proporción cobre-cianuro, el nivel de cianuro y la cantidad de peróxido de hidrógeno empleado.

#### **4.3.3. PRECIPITACION DE CIANURO LIBRE MEDIANTE ION FERROSO**

El cianuro libre puede ser convertido en un compuesto poco tóxico con la adición de un exceso de una sal soluble de hierro, como lo es el sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), en un rango de pH entre 7,5-10,5.



El proceso solo trabaja para cianuro libre, pero si luego de la adición de ion ferroso, el pH de la solución decrece a menos de 4,5, ciertos cianuros metálicos débiles podrán ser parcialmente descompuestos con la presencia del exceso de hierro. El nivel de descomposición dependerá de las constantes de estabilidad relativa de las especies envueltas.

La adición de iones ferrosos a soluciones conteniendo cianuro férrico dejan un precipitado azul conocido como azul de Turnbull. Por otra parte, los iones férricos reaccionan con el cianuro ferroso para formar el insoluble azul de Prussia.

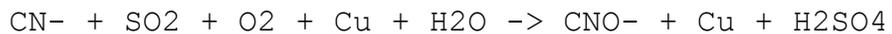
La precipitación del cianuro libre luego de la adición de ion ferroso es una reacción rápida y toma entre 15 a 30 minutos en ser realizada. La concentración final de cianuro libre puede llegar a menos de 10 mg/l.

El método de precipitación de cianuro libre con ion ferroso, si bien es uno de los métodos más baratos para tratamiento de efluentes, las soluciones resultantes no pueden ser descargadas directamente y por lo general se necesita de un tratamiento secundario.

#### **4.3.4. PROCESO CON DIOXIDO DE AZUFRE Y AIRE**

El dióxido de azufre es una sustancia que ha sido utilizada de diversas formas para la oxidación del cianuro durante el presente siglo. Una versión particular desarrollada y patentada por la INCO (International Nickel Company) es aplicada en varias operaciones mineras y es el método más usado en los Estados Unidos.

Una mezcla de dióxido de azufre y aire oxida rápidamente el cianuro libre con la presencia de iones cobre como catalizador:



El pH óptimo para que ocurra la reacción es de 9, pero el método funciona bien entre un rango de pH entre 8 a 10. El ácido (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) producido durante el proceso es neutralizado con cal ó soda caústica, para el pH dentro de ese rango. Un decrecimiento en el desempeño del método ocurrirá si el pH sale del rango óptimo.

Los compuestos de cianuro WAD son fácilmente destruidos y los metales residuales son precipitados en forma de sus respectivos hidróxidos.

La remoción de los compuestos de cianuros de hierro comienza con la reducción de hierro férrico hasta el estado ferroso. El cianuro ferroso es luego removido precipitándose con cualquiera de los metales: cobre, zinc ó níquel.

El consumo de reactivos depende de la concentración de cianuros WAD. El aire es bombeado hacia la solución en forma de finas burbujas, el consumo de aire es de 1 litro por litro de solución y por minuto normalmente.

El dióxido de azufre puede ser suministrado ya sea en forma de gas, producto de la quema de azufre ó de los hornos de tostación de sulfuros, o en forma de solución líquida de metabisulfito de sodio ó bisulfito de sodio, la elección de un agente sobre el otro depende exclusivamente de su costo y disponibilidad.

#### **4.4. PRUEBAS DE LABORATORIO**

##### **4.4.1. OBJETIVOS**

Las pruebas tendrán como objetivo el de conocer el desempeño y la eficiencia de los métodos más empleados para tratamiento de los efluentes de cianuración.

Los métodos a probarse fueron:

- clorinación alcalina
- proceso con peróxido de hidrógeno
- precipitación de cianuro libre mediante ion ferroso
- proceso con dióxido de azufre y aire

Los parámetros que se buscaron hallar con las pruebas son:

- a) Las condiciones para el funcionamiento óptimo de cada uno de los métodos.
- b) La dosis adecuada de los diferentes reactivos para lograr alcanzar una destoxificación efectiva y eficiente del cianuro en solución.

#### **4.4.2. DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS**

En una primera etapa se analizaron los métodos de destoxificación. Para una mayor rapidez y mejor control de las pruebas, se prepararon soluciones patrones con cianuro y agua pura. Esto nos sirvió para obtener la cinética operativa de cada método así como la estimación del consumo de reactivos y el tiempo para alcanzar una concentración dada.

Una vez probados los métodos y obtenidas las dosis para un tratamiento eficiente, se procedió a probar los métodos en soluciones reales. Las soluciones fueron obtenidas del proceso industrial de la planta ORENAS S.A., se analizaron para cianuro y metales hierro, cobre y zinc, luego serán sometidas a los diferentes procesos para destoxificación y volvieron a ser analizadas para las mismas sustancias.

La realización de las pruebas de destoxificación en soluciones preparadas nos permitió conocer el funcionamiento de cada uno de los métodos de destoxificación descritos anteriormente.

Las pruebas fueron realizadas a nivel de laboratorio. Estas pruebas consistían en la destoxificación de soluciones preparadas de concentraciones conocidas.

En las pruebas de: clorinación alcalina, proceso con peróxido de hidrógeno y precipitación mediante ion ferroso, se empleó botellas de plástico de 12 litros de capacidad y la agitación fue proporcionada por un agitador de rodillos, una metodología similar a las pruebas de cianuración en botellas. Se colocaron 4 botellas de cada solución, 3 de las botellas serán para las pruebas de destoxificación, mientras la cuarta sirvió de blanco.

En el caso del método con dióxido de azufre-aire, se utilizó un cilindro graduado de 1000 ml. El aire fue suministrado por medio de un compresor eléctrico y transportado hacia el fondo del cilindro a través de una delgada manguera de caucho y dispersado en la solución con el uso de un dispersador de gas. El caudal de aire fue graduado para que sea constante.

Uno de los objetivos fue el de conocer la dosificación de los reactivos para destoxificación, normalmente expresada como la rata molar de la reacción entre el cianuro y el reactivo para la formación de un compuesto dado.

Se probó diversas dosis basándose en la rata molar estequiometrica del reactivo y cianuro para obtener la reacción necesaria para formar los compuestos en cuestión. Por cuestiones prácticas en la realización de las pruebas se lo tomará como peso de reactivo por peso de cianuro ó volumen de reactivo por peso de cianuro.

#### *Reactivos*

Los reactivos empleados como modificadores de pH fueron:

- Hidróxido de sodio NaOH; solución (25%)
- Acido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; solución (10%)

Los reactivos empleados para las pruebas de tratamiento químico para las diferentes pruebas fueron:

#### Clorinación alcalina:

- Hipoclorito de calcio Ca(ClO)<sub>2</sub>; granular (98%)

#### Proceso con peróxido de hidrógeno:

- Peróxido de hidrógeno H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; solución (50%)
- Sulfato de cobre CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O; solución (25%) GA

#### Precipitación de cianuro libre mediante ion ferroso:

- Sulfato ferroso heptahidratado FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O; polvo GA

Proceso con dióxido de azufre y aire:

- Sulfito de sodio  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ; polvo GA
- Sulfato de cobre  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ; solución (25%) GA

#### **4.4.3. PRUEBAS CON SOLUCIONES DE CIANURO PREPARADAS**

##### **4.4.3.1. PREPARACION DE LAS SOLUCIONES**

Las soluciones fueron preparadas con cianuro y agua, el cianuro utilizado es de grado analítico y su pesaje fue realizado por medio de una balanza analítica. El agua utilizada es la misma que se emplea en el proceso industrial. El volumen de solución preparada será medida con matraces graduados.

*Modificación del pH*

El pH de las soluciones fue modificado para que sea igual en todas las pruebas, este valor es similar a las condiciones operativas en la planta y por ende al del efluente producido, salvo en los casos que el método exija un pH específico para evitar la formación de compuestos tóxicos.

##### **4.4.3.2. CONDICIONES DE LAS PRUEBAS**

Clorinación alcalina, proceso peróxido de hidrógeno y precipitación de cianuro libre mediante ion ferroso:

- agitación de las botellas: 120 RPM
- volumen de solución: 2 litros
- concentración inicial de cianuro total: 1000, 500 y 250 ppm

Proceso con dióxido de azufre y aire:

- volumen de solución: 1 litro
- caudal de aire utilizado: 1 litro/min
- concentración inicial de cianuro total: 1000, 500 y 250 ppm

##### **4.4.3.3. ANALISIS DE LAS SOLUCIONES**

Las pruebas fueron muestreadas periódicamente y analizadas para cianuro total.

Debido a la naturaleza de las pruebas, el cianuro total para cada uno de los métodos probados fue:

Clorinación alcalina: Mediante cianuro total disociable.

Proceso con peróxido de hidrógeno: Mediante cianuro total disociable y cianuro total (en las pruebas que se agrega sulfato cúprico).

Precipitación de cianuro libre mediante ion ferroso: Mediante cianuro total disociable.

Proceso con dióxido de azufre y aire: Mediante cianuro total.

Las muestras fueron previamente filtradas, para remover los precipitados que se forman, y luego analizadas para cianuro.

#### **4.4.3.4. RESULTADOS OBTENIDOS**

Los resultados de las pruebas de destoxificación en soluciones preparadas se exponen en las TABLAS #1-14.

#### **4.4.3.5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS**

##### Clorinación alcalina

- La concentración de cianuro fue reducida a menos de 1 ppm con una rata (g Cl:g CNT) de 2:1.
- El tiempo que se necesita es de máximo 30 minutos para que ocurra la descomposición del cianuro; en los casos en que se le agregó una rata menor de reactivo, las concentraciones ya no disminuyeron con el tiempo.

##### Proceso con peróxido de hidrógeno

- La concentración de cianuro fue reducida a menos de 1 ppm con ratas (ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:g CNT) de 5:1 y 2,5:1.
- El tiempo de tratamiento necesario es función de la cantidad de peróxido de hidrógeno y de iones de cobre, a mayor cantidad de cada reactivo menor el tiempo de tratamiento.

##### Precipitación de cianuro libre mediante ion ferroso

- La concentración de cianuro fue reducida a menos de 10 ppm con una rata (g FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O:g CNT) de 12:1, con ratas de 6:1 se logró reducir a 20 y 30 ppm.
- El tiempo necesario para el tratamiento con este reactivo para llevar la concentración al mínimo es de entre 3 a 4

horas, pero resultados eficientes son logrados entre los 10 a 30 minutos después que se le agrega el químico.

#### Proceso con dióxido de azufre y aire

- La concentración de cianuro fue reducida a entre 8 a 42 con una rata (g SO<sub>2</sub>:g CNT) de 2,54:1.
- La concentración de cobre para el funcionamiento de la reacción es determinante. La rata (g Cu:g CNT) 0.32:1 resultó el más eficaz, pero cabe señalar que no se detectó presencia de cianuro libre con esta rata de Cu, es decir, luego de agregarle esta cantidad de sulfato de cobre, todo el cianuro fue complejado en un compuesto de cobre.

#### **4.4.4. PRUEBAS EN SOLUCIONES EFLUENTES**

##### **4.4.4.1. OBTENCION DE LAS MUESTRAS**

Las muestras para la realización de las pruebas fueron obtenidas del proceso industrial de la planta ORENAS S.A.

Se llena un recipiente plástico de unos 100 litros de capacidad con pulpa proveniente de los efluentes de cianuración. Dejamos decantar la fase sólida para luego proceder a extraer entre 20 a 30 litros de líquido.

Las muestras fueron obtenidas de acuerdo a la velocidad con que se realicen las pruebas, cada muestra servirá para un conjunto de pruebas para todos los métodos, en total se obtuvo y se realizaron las pruebas con 4 muestras distintas. Cada una de estas muestras (a las que llamaremos efluente 1, 2, 3 y 4) proceden de la cianuración de distintos lotes de arena aurífera y por ende, tendrán una variabilidad en cuanto a contenido de compuestos en solución.

##### **4.4.4.2. ANALISIS DE LAS SOLUCIONES**

Las muestras fueron analizadas para cianuro libre y para cianuro total. Los metales analizados fueron: hierro, cobre y zinc.

Se realizó la medición para estos elementos y compuestos tanto de la solución de entrada como de la solución luego de la prueba de tratamiento químico.

Las muestras de solución tratada se le elevó el pH a más de 10 y luego serán filtradas.

#### **4.4.4.3. CONSERVACION DE LAS MUESTRAS**

Las muestras fueron conservadas en un recipiente cerrado, fueron colocadas en un lugar fresco y alejado de los rayos solares.

En el caso de comprobarse una disminución de cianuro (cianuro libre) al comenzar las pruebas, se elevó nuevamente su concentración con cianuro de sodio hasta alcanzar la concentración original.

#### **4.4.4.4. CONDICIONES DE LAS PRUEBAS**

Clorinación alcalina, proceso con peróxido de hidrógeno y precipitación de cianuro libre mediante ion ferroso:

- agitación de las botellas: 120 RPM
- volumen de solución: 1 litro

Proceso con dióxido de azufre y aire:

- volumen de solución: 1 litro
- caudal de aire utilizado: 1 litro/min

#### **4.4.4.5. RESULTADOS OBTENIDOS**

Los resultados de las pruebas con efluentes industriales se presentan en las TABLAS #15-30.

#### **4.4.4.6. ANALISIS DE LOS RESULTADOS**

Clorinación alcalina

- Se pudo llevar el cianuro libre a valores menores a 1 ppm en todos los efluentes probados.
- La rata (g Cl:g CNT) en los efluentes 1, 2 y 3 terminó con 18,7:1, de los cuales en los efluentes 1 y 2 resultó ineficiente para reducir la concentración de cianuro total. El efluente 4 tuvo una rata de 7,5:1.
- La concentración final de cianuro total fue de entre 8 a 102 ppm.
- La concentración de Zn y Cu se redujeron a menos de 1 ppm en casi todos los casos, excepto en el caso del efluente 1 que terminó con una concentración final de Cu de 23,3. La concentración de Fe en solución estuvo entre 4,5 a 49,5 ppm.

#### Proceso con peróxido de hidrógeno

- Se pudo llevar el cianuro libre a valores menores a 1 ppm en todos los efluentes probados.
- La rata (ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:g CNT) fue entre 3,75:1 y 7,5:1. Dentro de este último se encuentran las pruebas de los efluentes 2 y 4, en los cuales la reducción de la concentración de cianuro total fue ineficiente.
- La concentración final de cianuro total fue entre 2 a 216 ppm.
- El Zn en solución se redujo a concentraciones menores a 1 ppm en todas las pruebas realizadas, mientras que el Cu y Fe no se pudo precipitarlo eficientemente.

#### Precipitación de cianuro libre mediante ion ferroso

- Se pudo llevar el cianuro libre a límites entre < 1 a 20 ppm.
- La rata (g FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O:g CNT) fue 18:1 en los efluentes 1, 2 y 3, mientras en el efluente 4 fue de 12:1.
- La concentración final de cianuro total fue entre 10 a 68 ppm.
- Hubo reducción en la concentración de los metales en solución, alcanzando máximos de 7,5 ppm de Fe y 23,3 ppm de Cu; el Zn se redujo a menos de 1 ppm.

#### Proceso con dióxido de azufre y aire

- Se pudo llevar el cianuro libre a valores menores a 1 ppm en todos los efluentes probados.
- La rata (g SO<sub>2</sub>:g CNT) fue de 2,54:1 en todos los efluentes probados.
- El consumo de sulfato cúprico estuvo en la rata (g Cu:g CN-) de 0,32:1.
- La concentración final de cianuro total fue 4 a 10 ppm.
- Los metales Cu y Zn se redujeron a concentraciones menores a 1 ppm en todas las pruebas realizadas, mientras en el caso de Fe máximo fue de 13,5 ppm.

#### **4.4.4.7. CONCLUSIONES**

Se pudo observar que todos los métodos logran disminuir la toxicidad del efluente, ya que bajan tanto la concentración de los cianuros así como de los metales.

En la mayoría de los casos, el consumo de reactivo es proporcional a la cantidad de cianuro en solución. Pero la rata reactivo/cianuro aumenta a medida que la concentración de cianuro disminuye.

De los métodos probados, el que mejor resultados dio es el proceso con dióxido de azufre y aire debido a su eficiencia así como su constancia. Esto último es deducido ya que la rata reactivo/cianuro se mantuvo en todas las pruebas y esta rata fue obtenida en las pruebas con soluciones preparadas.

De acuerdo a los resultados obtenidos, los métodos, si bien lograron reducir la toxicidad inicial del efluente, de acuerdo a las normas para agua de desecho, las soluciones resultantes aún no pueden ser clasificadas como un efluente final de una planta cianuradora.

#### **4.5. ANALISIS ECONOMICO**

##### **4.5.1. ANALISIS DE COSTOS**

En la TABLA #32 se observa un estimado de costos que puede estar representando el tratamiento químico de 1 kilo de cianuro en solución de desecho.

El consumo de energía esta dado en función del tiempo de tratamiento, obtenido de las pruebas de laboratorio, y asumiendo una concentración de 1 metro cúbico de solución. Para el aire se consideró un valor igual al costo de energía.

El precio de los químicos es el del mercado local actual por mayoreo. En todo caso, no variará mucho con el precio en el mercado internacional.

##### **4.5.2. COMPARACION DE LOS RESULTADOS**

De acuerdo a las pruebas realizadas, los costos estimados para tratamiento químico de 1 kg de cianuro total en solución fueron:

- clorinación alcalina: US\$  
7,73 a 18,70
- proceso con peróxido de hidrógeno: US\$  
2,30 a 4,55
- precipitación de cianuro libre mediante ion ferroso: US\$  
3,70 a 5,50

- proceso con dióxido de azufre y aire:  
1,83 a 2,03

US\$

Al observar estos valores podemos darnos cuenta rápidamente que el proceso con dióxido de azufre es el más económico, mientras que el proceso con peróxido de hidrógeno y la precipitación con ion ferroso cuesta casi el doble más, y finalmente el tratamiento mediante clorinación alcalina tiene un costo mucho mayor con respecto a los otros.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Todos los métodos probados en este estudio logran reducir tanto la concentración de los cianuros así como de los metales en solución.
2. El cianuro libre es fácilmente eliminado de las soluciones efluentes, concentración final menor a 1 ppm (que era nuestro límite inferior de medición).
3. El consumo de reactivos es proporcional a la cantidad de cianuro en solución destoxificada. Pero la rata reactivo/cianuro aumenta a medida que la concentración de cianuro disminuye.
4. Los parámetros y resultados obtenidos en las pruebas fueron:

### Clorinación alcalina

- El tiempo de tratamiento es de 30 minutos.
- La rata (g Cl:g CNT) fue de entre 7,5:1 a 18,7:1.
- La concentración final de cianuro total fue de entre 8 a 102 ppm.
- La concentración de Zn y Cu fue de menos de 1 ppm en casi todos los casos. La concentración final de Fe fue de entre 4,5 a 49,5 ppm.
- Costo estimado entre US\$ 7,73 a 18,70/kg CNT.

### Proceso con peróxido de hidrógeno

- El tiempo de tratamiento es de 60 minutos.
- La rata (ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:g CNT) fue entre 3,75:1 y 7,5:1.
- La concentración final de cianuro total fue entre 2 a 216 ppm.
- La concentración de Zn en solución se redujo a menos de 1 ppm, no se pudo precipitar eficientemente al Cu y al Fe.
- Costo estimado entre US\$ 2,30 a 4,55/kg CNT.

### Precipitación de cianuro libre mediante ion ferroso

- Se estableció un tiempo de tratamiento de 120 minutos.
- Se pudo llevar el cianuro libre a valores entre < 1 a 20 ppm.
- La rata (g FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O:g CNT) fue de entre 12:1 y 18:1.
- La concentración final de cianuro total fue entre 10 a 68 ppm.

- La concentración de Zn se redujo a menos de 1 ppm, el Fe a máximos de 7,5 ppm y el Cu de 23,3 ppm.
- Costo estimado entre US\$ 3,70 a 5,50 /kg CNT.

Proceso con dióxido de azufre y aire

- Se estableció un tiempo de tratamiento de 90 minutos.
  - La rata (g SO<sub>2</sub>:g CNT) y (g Cu:g CNL) fue de 2,54:1 y 0,32:1 respectivamente.
  - La concentración final de cianuro total fue de 4 a 10 ppm.
  - El Cu y Zn se redujo a menos de 1 ppm, la concentración de Fe máxima fue de 13,5 ppm.
  - Costo estimado entre US\$ 1,83 a 2,03/kg CNT.
5. El método que mejor resultados mostró es el proceso con dióxido de azufre y aire debido tanto a su eficiencia así como su constancia. Esto último es deducido ya que la rata reactivo/cianuro se mantuvo en todas las pruebas y esta rata fue obtenida en las pruebas con soluciones preparadas. Además de la economía del método si comparamos costo por resultado obtenido.
  6. Los métodos de tratamiento probados, si bien lograron reducir la toxicidad inicial del efluente, de acuerdo a las normas para agua de desecho, las soluciones resultantes aún no pueden ser clasificadas como un efluente final de una planta cianuradora. Ninguno de los métodos logró reducir la concentración del cianuro a los límites permisibles pero en algunos si logró reducir la concentración de los metales analizados bajo estos límites.
  7. Básicamente todos los métodos probados reducen la concentración del cianuro en solución, la ineficiencia de algunos de los métodos se debe, tal vez, a los compuestos cianuro-metal más estables que no logran reaccionar con los químicos agregados.
  8. El costo de un tratamiento químico es proporcional al consumo de reactivo y este último a la concentración de cianuro en el efluente a tratarse. A concentraciones altas de cianuro, estos métodos podrían llegar a ser prohibitivos por los altos costos que representarían su implementación. El tratamiento químico para cianuro es normalmente usado como complemento de otros métodos de destoxificación (degradación natural, recuperación de

cianuro, etc.) y tiene como finalidad "purificar" el efluente antes de su descarga final.

9. El líquido resultante de los tratamientos químicos probados puede llegar a ser reusado nuevamente para el proceso de cianuración, esto debido a su relativa poca concentración de iones metálicos (que podría tener un efecto cianicida). La importancia de este hecho permitiría un mejor aprovechamiento de un recurso como lo es el agua.

TABLA #1

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

Solución preparada de NaCN y agua

Características de la soluciones:

- \* concentración NaCN inicial: 250 mg/l
- \* pH inicial: 10,5
- \* volumen: 2 litros cada una

Condiciones de la prueba:

- \* REACTIVO EMPLEADO: hipoclorito de calcio,  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ , granular (98%)
- \* agitación mecánica, 120 RPM

Ca(ClO) <sub>2</sub> agregado (g)	0,0	2,0	1,0	0,5	0,0	2,0	1,0	0,5
g Cl:g CNT	BLANCO	2:1	1:1	0,5:1	BLANCO	2:1	1:1	0,5:1
TIEMPO (min)	CONCENTRACION DE CIANURO TOTAL (mg/l)			PORCENTAJE DE DESTOXIFICACION (%)				
0	250	250	250	250	0,00	0,00	0,00	0,00
10	250	10	120	170	0,00	96,00	52,00	32,00
30	240	<1	120	170	4,00	>99,60	52,00	32,00
60	240	<1	120	170	4,00	>99,60	52,00	32,00

pH final: 10,5 10,6 10,3 10,2

TABLA #2

**PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION**

Solución preparada de NaCN y agua

Características de la soluciones:

- \* concentración NaCN inicial: 500 mg/l
- \* pH inicial: 10,5
- \* volumen: 2 litros cada una

Condiciones de la prueba:

- \* REACTIVO EMPLEADO: hipoclorito de calcio, Ca(CLO)<sub>2</sub>, granular (98%)
- \* agitación mecánica, 120 RPM

Ca(CLO) <sub>2</sub> agregado (g)	0,0	4,0	2,0	1,0	0,0	4,0	2,0	1,0
g Cl:g CNT	BLANCO	2:1	1:1	0,5:1	BLANCO	2:1	1:1	0,5:1
TIEMPO (min)	CONCENTRACION DE CIANURO TOTAL (mg/l)				PORCENTAJE DE DESTOXIFICACION (%)			
0	500	500	500	500	0,00	0,00	0,00	0,00
10	460	10	210	350	8,00	98,00	58,00	30,00
30	460	<1	210	350	8,00	>99,80	58,00	30,00
60	450	<1	210	350	10,00	>99,80	58,00	30,00

**pH final:** 10,3    10,5    10,1    10,1

TABLA #3

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

Solución preparada de NaCN y agua

Características de la soluciones:

- \* concentración NaCN inicial: 1000 mg/l
- \* pH inicial: 10,5
- \* volumen: 2 litros cada una

Condiciones de la prueba:

- \* REACTIVO EMPLEADO: hipoclorito de calcio,  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ , granular (98%)
- \* agitación mecánica, 120 RPM

Ca(ClO) <sub>2</sub> agregado (g)	0,0	8,0	4,0	2,0	0,0	8,0	4,0	2,0
g Cl:g CNT	BLANCO	2:1	1:1	0,5:1	BLANCO	2:1	1:1	0,5:1
TIEMPO (min)	CONCENTRACION DE CIANURO TOTAL (mg/l)				PORCENTAJE DE DESTOXIFICACION (%)			
0	1000	1000	1000	1000	0,00	0,00	0,00	0,00
10	930	10	440	690	7,00	99,00	56,00	31,00
30	940	<1	440	690	6,00	>99,90	56,00	31,00
60	930	<1	430	680	7,00	>99,90	57,00	32,00

pH final: 10,3    10,8    10,1    10,0

TABLA #4

PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

Solución preparada de NaCN y agua

Características de la soluciones:

- \* concentración NaCN inicial: 250 mg/l
- \* pH inicial: 10,5
- \* volumen: 2 litros cada una

Condiciones de la prueba:

- \* REACTIVO EMPLEADO: peróxido de hidrógeno, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, solución (50%)
- \* agitación mecánica, 120 RPM

H2O2 agregado (ml)	0,0	5,0	2,5	1,25	0,0	5,0	2,5	1,25
ml H2O2:g CNT	BLANCO	5:1	2,5:1	1,25:1	BLANCO	5:1	2,5:1	1,25:1
TIEMPO (min)	CONCENTRACION DE CIANURO TOTAL (mg/l)				PORCENTAJE DE DESTOXIFICACION (%)			
0	250	250	250	250	0,00	0,00	0,00	0,00
30	250	210	220	220	0,00	16,00	12,00	12,00
120	240	170	190	200	4,00	32,00	24,00	20,00
240	240	120	170	190	4,00	52,00	32,00	24,00
360	220	85	140	170	12,00	66,00	44,00	32,00
1020	220	<1	40	110	12,00	>99,60	84,00	56,00
1380	220	--	15	80	12,00	--	94,00	68,00

pH final: 10,1 9,6 9,6 9,8

TABLA #5

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

Solución preparada de NaCN y agua

Características de la solución:

- \* concentración NaCN inicial: 500 mg/l
- \* pH inicial: 10,5
- \* volumen: 2 litros cada una

Condiciones de la prueba:

- \* REACTIVO EMPLEADO: peróxido de hidrógeno, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, solución (50%)
- \* agitación mecánica, 120 RPM

H2O2 agregado (ml)	0,0	10,0	5,0	2,5	0,0	10,0	5,0	2,5
ml H2O2:g CNT	BLANCO	5:1	2,5:1	1,25:1	BLANCO	5:1	2,5:1	1,25:1
TIEMPO (min)	CONCENTRACION DE CIANURO TOTAL (mg/l)				PORCENTAJE DE DESTOXIFICACION (%)			
0	500	500	500	500	0,00	0,00	0,00	0,00
10	480	400	430	455	4,00	20,00	14,00	9,00
30	470	360	410	440	6,00	28,00	18,00	12,00
120	470	180	290	340	6,00	64,00	42,00	32,00
180	470	110	220	300	6,00	78,00	56,00	40,00
360	470	30	100	240	6,00	94,00	80,00	52,00
540	470	<1	50	180	6,00	>99,80	90,00	64,00
1260	450	-	<1	40	10,00	-	>99,80	92,00

pH final: 10,4 9,8 10,0 10,1

TABLA #6

PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

Solución preparada de NaCN y agua

Características de la solución:

- \* concentración NaCN inicial: 1000 mg/l
- \* pH inicial: 10,5
- \* volumen: 2 litros cada una

Condiciones de la prueba:

- \* REACTIVO EMPLEADO: peróxido de hidrógeno, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, solución (50%)
- \* agitación mecánica, 120 RPM

H2O2 agregado (ml)	0,0	20,0	10,0	5,0	0,0	20,0	10,0	5,0
ml H2O2:g CNT	BLANCO	5:1	2,5:1	1,25:1	BLANCO	5:1	2,5:1	1,25:1
TIEMPO (min)	CONCENTRACION DE CIANURO TOTAL (mg/l)				PORCENTAJE DE DESTOXIFICACION (%)			
0	1000	1000	1000	1000	0,00	0,00	0,00	0,00
10	940	750	830	890	6,00	25,00	17,00	11,00
30	940	600	720	830	6,00	40,00	28,00	17,00
120	930	140	380	610	7,00	86,00	62,00	39,00
180	930	40	220	490	7,00	96,00	78,00	51,00
240	930	5	140	410	7,00	99,50	86,00	59,00
300	920	<1	60	310	8,00	>99,90	94,00	69,00
420	920	--	<1	220	8,00	--	>99,90	78,00

pH final: 10,4 9,8 9,9 10,1

TABLA #7

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

Solución preparada de NaCN y agua

Características de la solución:

- \* concentración NaCN inicial: 500 mg/l
- \* pH inicial: 10,5
- \* volumen: 2 litros cada una

Condiciones de la prueba:

- \* REACTIVO EMPLEADO: peróxido de hidrógeno, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, solución (50%)  
sulfato de cobre, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, solución (25%)
- \* agitación mecánica, 120 RPM

H2O2 agregado (ml)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
ml H2O2:g CNT	2,5:1	2,5:1	2,5:1	2,5:1	2,5:1	2,5:1	2,5:1	2,5:1	2,5:1	
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O agregado (ml)	0,8	1,6	2,4	3,2	0,8	1,6	2,4	3,2	0,8	
g Cu:g CNT	0,05:1	0,1:1	0,15:1	0,2:1	0,05:1	0,1:1	0,15:1	0,2:1	0,05:1	
TIEMPO (min)	CONCENTRACION DE CIANURO TOTAL (mg/l)					PORCENTAJE DE DESTOXIFICACION (%)				
0	500	500	500	500	500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	455	340	275	250	250	9,00	32,00	45,00	50,00	50,00
30	340	140	<1	<1	<1	32,00	72,00	>99,8	>99,8	>99,8
60	230	<1	--	--	--	54,00	>99,8	--	--	--
120	<1	--	--	--	--	>99,8	--	--	--	--

pH final: 10,2 10,0 9,9 9,4

TABLA #8

PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

Solución preparada de NaCN y agua

Características de la solución:

- \* concentración NaCN inicial: 250 mg/l
- \* pH inicial: 10,5
- \* volumen: 2 litros cada una

Condiciones de la prueba:

- \* REACTIVO EMPLEADO: sulfato de hierro,  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , polvo, GA
- \* agitación mecánica, 120 RPM

$FeSO_4 \cdot 7H_2O$ agregado (g)	0,0	6,0	3,0	1,5	0,0	6,0	3,0	1,5
g $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ :g CNT	BLANCO	12:1	6:1	3:1	BLANCO	12:1	6:1	3:1
TIEMPO (min)	CONCENTRACION DE CIANURO TOTAL (mg/l)				PORCENTAJE DE DESTOXIFICACION (%)			
0	250	250	250	250	0,00	0,00	0,00	0,00
10	250	40	50	120	0,00	84,00	80,00	52,00
30	240	20	30	50	4,00	92,00	88,00	80,00
60	240	20	30	40	4,00	92,00	88,00	84,00
120	240	15	20	30	4,00	94,00	92,00	88,00
240	240	<10	20	30	4,00	>95	92,00	88,00

pH final: 10,4 3,3 3,5 7,4

TABLA #9

PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

Solución preparada de NaCN y agua

Características de la soluciones:

- \* concentración NaCN inicial: 500 mg/l
- \* pH inicial: 10,5
- \* volumen: 2 litros cada una

Condiciones de la prueba:

- \* REACTIVO EMPLEADO: sulfato de hierro,  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , polvo, GA
- \* agitación mecánica, 120 RPM

FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O agregado (g)	0,0	12,0	6,0	3,0	0,0	12,0	6,0	3,0
g FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O:g CNT	BLANCO	12:1	6:1	3:1	BLANCO	12:1	6:1	3:1
TIEMPO (min)	CONCENTRACION DE CIANURO TOTAL (mg/l)				PORCENTAJE DE DESTOXIFICACION (%)			
0	500	500	500	500	0	0	0	0
10	480	30	90	180	8	94	82	64
30	470	20	50	80	10	96	90	84
60	470	20	40	60	10	96	92	88
120	470	15	40	60	10	97	92	88
240	450	<10	30	50	14	>98	94	90

pH final: 10,3 3,0 3,2 6,9

TABLA #10

PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

Solución preparada de NaCN y agua

Características de la solución:

- \* concentración NaCN inicial: 1000 mg/l
- \* pH inicial: 10,5
- \* volumen: 2 litros cada una

Condiciones de la prueba:

- \* REACTIVO EMPLEADO: sulfato de hierro,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , polvo, GA
- \* agitación mecánica, 120 RPM

FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O agregado (g)	0,0	24,0	12,0	6,0	0,0	24,0	12,0	6,0
g FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O:g CNT	BLANCO	12:1	6:1	3:1	BLANCO	12:1	6:1	3:1
TIEMPO (min)	CONCENTRACION DE CIANURO TOTAL (mg/l)				PORCENTAJE DE DESTOXIFICACION (%)			
0	1000	1000	1000	1000	0,00	0,00	0,00	0,00
10	940	40	50	110	6,00	96,00	95,00	89,00
30	940	20	30	100	6,00	98,00	97,00	90,00
60	930	<10	30	90	7,00	>99	97,00	91,00
120	880	<10	20	70	12,00	>99	98,00	93,00
180	880	<10	20	60	12,00	>99	98,00	94,00

pH final: 10,3 3,2 3,4 7,0

TABLA #11

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

Solución preparada de NaCN y agua

Características de la soluciones:

- \* concentración NaCN inicial: 250 mg/l
- \* pH inicial: 10,5
- \* volumen: 1 litro cada una

Condiciones de la prueba:

- \* REACTIVOS EMPLEADOS: sulfito de sodio, Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, polvo, GA  
sulfato de cobre, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, solución (25%)
- \* aire: 1 lt/min

Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> agregado (g)	0,0	2,5	1,25	0,625	0,0	2,5	1,25	0,625
g SO <sub>2</sub> :g CNT	BLANCO	5,08:1	2,54:1	1,27:1	BLANCO	5,08:1	2,54:1	1,27:1
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O agregado (ml)	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
g Cu:g CNT	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>CONCENTRACION DE CIANURO TOTAL (mg/l)</b>				<b>PORCENTAJE DE DESTOXIFICACION (%)</b>			
0	250	250	250	250	0,00	0,00	0,00	0,00
10	244	4	15	15	2,40	98,40	94,00	94,00
60	235	2	10	10	6,00	99,20	96,00	96,00
120	235	2	10	10	6,00	99,20	96,00	96,00

pH final: 9,5 8,0 7,8 7,8

TABLA #12

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

Solución preparada de NaCN y agua

Características de la solución:

- \* concentración NaCN inicial: 500 mg/l
- \* pH inicial: 10,5
- \* volumen: 1 litro cada una

Condiciones de la prueba:

- \* REACTIVOS EMPLEADOS: sulfito de sodio, Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, polvo, GA  
sulfato de cobre, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, solución (25%)
- \* aire: 1 lt/min

Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> agregado (g)	0,0	5,0	2,5	1,25	0,0	5	2,5	1,25
g SO <sub>2</sub> :g CNT	BLANCO	5,08:1	2,54:1	1,27:1	BLANCO	5,08:1	2,54:1	1,27:1
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O agregado (ml)	1,25	2,5	2,5	2,5	1,25	2,5	2,5	2,5
g Cu:g CNT	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>CONCENTRACION DE CIANURO TOTAL (mg/l)</b>							
0	500	500	500	500	0,00	0,00	0,00	0,00
10	490	132	54	45	2,00	73,60	89,20	91,00
60	472	18	18	18	5,60	96,40	96,40	96,40
120	460	18	18	18	8,00	96,40	96,40	96,40
					<b>PORCENTAJE DE DESTOXIFICACION (%)</b>			

pH final: 9,3      8,4      7,9      7,8

TABLA #13

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

Solución preparada de NaCN y agua

Características de la soluciones:

- \* concentración NaCN inicial: 1000 mg/l
- \* pH inicial: 10,5
- \* volumen: 1 litro cada una

Condiciones de la prueba:

- \* REACTIVOS EMPLEADOS: sulfito de sodio, Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, polvo, GA  
sulfato de cobre, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, solución (25%)
- \* aire: 1 lt/min

Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> agregado (g)	0,0	10,0	5,0	2,5	0,0	10,0	5,0	2,5
g SO <sub>2</sub> :g CNT	BLANCO	5,08:1	2,54:1	1,27:1	BLANCO	5,08:1	2,54:1	1,27:1
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O agregado (ml)	1,25	5,0	5,0	5,0	1,25	5,0	5,0	5,0
g Cu:g CNT	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1	0,32:1
<b>TIEMPO (min)</b>	<b>CONCENTRACION DE CIANURO TOTAL (mg/l)</b>							
0	1000	1000	1000	1000	0,00	0,00	0,00	0,00
10	980	180	87	450	2,00	82,00	91,30	55,00
60	920	42	42	388	8,00	95,80	95,80	61,20
120	895	42	42	388	10,50	95,80	95,80	61,20
	<b>PORCENTAJE DE DESTOXIFICACION (%)</b>							

pH final: 9,4 8,4 7,9 7,8



TABLA #15

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #1  
 REACTIVOS: Hipoclorito de calcio ( $\text{Ca}(\text{Cl})_2$ , granular 98%)  
 Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ; solución 25%)

CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- agitación en pomas, 120 RPM
- tiempo de tratamiento: 30 min
- volumen de solución: 1000 ml

	solución efluente	solución tratada 1	solución tratada 2	solución tratada 3	solución tratada 4
Ca(ClO) <sub>2</sub> agregado (g)	--	2,09	6,27	10,45	20,90
NaOH agregado (g)	--	0,23	0,30	0,50	0,50
rata (g Cl:g CNT)	--	1,9:1	5,6:1	9,4:1	18,7:1
Cianuro libre (ppm)	244,0	56,0	< 1	< 1	< 1
Cianuro total (ppm)	550,0	356,0	225,0	148,0	102,0
Cu (ppm)	120,0	120,0	71,3	38,3	23,3
Fe (ppm)	82,5	75,0	60,0	60,0	49,5
Zn (ppm)	4,5	0,2	0,1	0,1	0,1
pH	10,1	10,6	10,7	10,7	10,8

TABLA #16

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #2  
 REACTIVOS: Hipoclorito de calcio ( $\text{Ca}(\text{Cl})_2$ , granular 98%)  
 Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ; solución 25%)

CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- agitación en pomas, 120 RPM
- tiempo de tratamiento: 30 min
- volumen de solución: 1000 ml

		solución efluente	solución tratada 1	solución tratada 2	solución tratada 3	solución tratada 4
Ca(ClO) <sub>2</sub> agregado (g)	--	2,36	7,07	11,78	23,56	
NaOH agregado (g)	--	0,25	0,35	0,50	0,50	
rata (g Cl:g CNT)	--	1,9:1	5,6:1	9,4:1	18,7:1	
Cianuro libre (ppm)	284,0	110,0	36,0	8,0	< 1	
Cianuro total (ppm)	620,0	440,0	368,0	348,0	64,0	
Cu (ppm)	139,5	132,0	130,5	60,0	0,1	
Fe (ppm)	42,0	39,0	34,5	31,5	30,0	
Zn (ppm)	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	
pH	10,6	10,5	10,3	10,8	10,5	

TABLA #17

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #3

REACTIVOS: Hipoclorito de calcio ( $\text{Ca}(\text{Cl})_2$ , granular 98%)  
 Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ; solución 25%)

CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- agitación en pomas, 120 RPM
- tiempo de tratamiento: 30 min
- volumen de solución: 1000 ml

solución solución solución solución solución  
 efluente tratada 1 tratada 2 tratada 3 tratada 4

---

Ca(ClO) <sub>2</sub> agregado (g)	--	2,34	7,02	11,70	23,41
NaOH agregado (g)	--	0,20	0,40	0,55	0,55
rata (g Cl:g CNT)	--	1,9:1	5,6:1	9,4:1	18,7:1
Cianuro libre (ppm)	428,0	108,0	< 1	< 1	< 1
Cianuro total (ppm)	616,0	306,0	92,0	64,0	8,0
Cu (ppm)	75,0	72,0	4,3	0,1	0,1
Fe (ppm)	45,0	39,0	27,0	25,5	15,0
Zn (ppm)	0,7	0,7	0,1	0,1	0,1
pH	10,5	9,9	10,2	10,1	10,7

TABLA #18

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #4  
 REACTIVOS: Hipoclorito de calcio ( $\text{Ca}(\text{Cl})_2$ , granular 98%)  
 Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ; solución 25%)

CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- agitación en pomas, 120 RPM
- tiempo de tratamiento: 30 min
- volumen de solución: 1000 ml

	solución efluente	solución tratada 1	solución tratada 2	solución tratada 3
Ca(ClO) <sub>2</sub> agregado (g)	--	6,30	18,92	25,23
NaOH agregado (g)	--	0,30	0,50	0,50
rata (g Cl:g CNT)	--	1,9:1	5,6:1	7,5:1
Cianuro libre (ppm)	568,0	8,0	< 1	< 1
Cianuro total (ppm)	1660,0	1050,0	235,0	24,0
Cu (ppm)	510,0	375,0	63,0	0,1
Fe (ppm)	16,5	12,8	6,8	4,5
Zn (ppm)	0,9	0,1	0,1	0,1
pH	10,8	10,1	10,0	10,1

TABLA #19

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #1

REACTIVO: Peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; solución al 50%)CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- agitación en pomas, 120 RPM
- tiempo de tratamiento: 60 min
- volumen de solución: 1000 ml

	solución efluente	solución tratada 1	solución tratada 2
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> agregado (ml)	--	1,38	2,06
rata (ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :g CNT)	--	2,5:1	3,75:1
Cianuro libre (ppm)	244,0	< 1	< 1
Cianuro total (ppm)	550,0	160,0	2,0
Cu (ppm)	120,0	49,5	33,8
Fe (ppm)	82,5	48,0	48,0
Zn (ppm)	4,5	0,1	0,1
pH	10,1	8,9	8,2

TABLA #20

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #2  
 REACTIVO: Peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; solución al 50%)

CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- agitación en pomas, 120 RPM
- tiempo de tratamiento: 60 min
- volumen de solución: 1000 ml

		solución efluente	solución tratada 1	solución tratada 2	solución tratada 3	solución tratada 4
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> agregado (ml)	--	1,55	2,33	3,10	4,65	
rata (ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :g CNT)	--	2,5:1	3,75:1	5,0:1	7,5:1	
Cianuro libre (ppm)	284,0	< 1	< 1	< 1	< 1	
Cianuro total (ppm)	620,0	192,0	130,0	132,0	126,0	
Cu (ppm)	139,5	58,5	51,0	49,5	45,0	
Fe (ppm)	42,0	28,5	15,0	15,0	15,0	
Zn (ppm)	0,8	0,1	0,1	0,1	0,1	
pH	10,6	8,5	8,3	8,1	8,1	

TABLA #21

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #3

REACTIVO: Peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; solución al 50%)CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- agitación en pomas, 120 RPM
- tiempo de tratamiento: 60 min
- volumen de solución: 1000 ml

	solución efluente	solución tratada 1	solución tratada 2	solución tratada 3
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> agregado (ml)	--	1,54	2,31	3,08
rata (ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :g CNT)	--	2,5:1	3,75:1	5,0:1
Cianuro libre (ppm)	428,0	8,0	< 1	< 1
Cianuro total (ppm)	616,0	148,0	72,0	45,0
Cu (ppm)	75,0	69,8	30,0	25,5
Fe (ppm)	45,0	39,0	27,0	25,5
Zn (ppm)	0,7	0,1	0,1	0,1
pH	10,5	8,7	8,4	8,3

TABLA #22

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #4  
 REACTIVO: Peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; solución al 50%)

CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- agitación en pomas, 120 RPM
- tiempo de tratamiento: 60 min
- volumen de solución: 1000 ml

		solución efluente	solución tratada 1	solución tratada 2	solución tratada 3	solución tratada 4
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> agregado (ml)	--	4,15	6,23	8,30	12,45	
rata (ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :g CNT)	--	2,5:1	3,75:1	5,0:1	7,5:1	
Cianuro libre (ppm)	568,0	< 1	< 1	< 1	< 1	
Cianuro total (ppm)	1660,0	830,0	366,0	212,0	216,0	
Cu (ppm)	510,0	322,5	189,0	147,0	148,5	
Fe (ppm)	16,5	0,1	0,1	0,1	0,1	
Zn (ppm)	0,9	0,1	0,1	0,1	0,2	
pH	10,8	8,6	8,5	8,4	8,4	

TABLA #23

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #1  
 REACTIVO: Sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; polvo; GA)

CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- agitación en pomas, 120 RPM
- tiempo de tratamiento: 120 min
- volumen de solución: 1000 ml

	solución efluente	solución tratada 1	solución tratada 2	solución tratada 3
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O agregado (g)	--	3,30	6,60	9,90
rata (g FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O:g CNT)	--	6,0:1	12,0:1	18,0:1
Cianuro libre (ppm)	244,0	36,0	8,0	5,0
Cianuro total (ppm)	550,0	210,0	140,0	12,5
Cu (ppm)	120,0	72,0	33,0	0,3
Fe (ppm)	82,5	3,0	3,0	3,8
Zn (ppm)	4,5	0,3	0,1	0,1
pH	10,1	4,0	3,7	3,3

TABLA #24

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #2  
 REACTIVO: Sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; polvo; GA)

CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- agitación en pomas, 120 RPM
- tiempo de tratamiento: 120 min
- volumen de solución: 1000 ml

	solución efluente	solución tratada 1	solución tratada 2	solución tratada 3
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O agregado (g)	--	3,72	7,44	11,16
rata (g FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O:g CNT)	--	6,0:1	12,0:1	18,0:1
Cianuro libre (ppm)	284,0	32,0	24,0	20,0
Cianuro total (ppm)	620,0	190,0	88,0	68,0
Cu (ppm)	139,5	55,5	33,8	23,3
Fe (ppm)	42,0	3,0	3,0	7,5
Zn (ppm)	0,8	0,1	0,2	0,2
pH	10,6	3,9	3,7	3,6

TABLA #25

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #3  
 REACTIVO: Sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; polvo; GA)

CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- agitación en pomas, 120 RPM
- tiempo de tratamiento: 120 min
- volumen de solución: 1000 ml

	solución efluente	solución tratada 1	solución tratada 2	solución tratada 3
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O agregado (g)	--	3,70	7,39	11,09
rata (g FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O:g CNT)	--	6,0:1	12,0:1	18,0:1
Cianuro libre (ppm)	428,0	8,0	< 1	< 1
Cianuro total (ppm)	616,0	130,0	32,0	10,0
Cu (ppm)	75,0	54,0	19,5	0,1
Fe (ppm)	45,0	9,0	2,3	0,4
Zn (ppm)	0,7	0,1	0,1	0,1
pH	10,5	4,3	4,2	3,8

TABLA #26

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #4  
 REACTIVO: Sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; polvo; GA)

CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- agitación en pomas, 120 RPM
- tiempo de tratamiento: 120 min
- volumen de solución: 1000 ml

	solución efluente	solución tratada 1	solución tratada 2
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ agregado (g)	--	9,96	19,92
rata (g $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ :g CNT)	--	6,0:1	12,0:1
Cianuro libre (ppm)	568,0	36,0	16,0
Cianuro total (ppm)	1660,0	202,0	28,0
Cu (ppm)	510,0	72,0	2,5
Fe (ppm)	16,5	7,5	5,3
Zn (ppm)	0,9	0,2	0,3
pH	10,8	4,3	4,2

TABLA #27

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #1  
 REACTIVOS: Sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ; polvo; GA)  
 Sulfato cúprico ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ; solución al 25%)

CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- prueba en cilindro graduado
- caudal de aire: 1 l/min
- tiempo de tratamiento: 90 min
- volumen de solución: 1000 ml

	solución efluente	solución tratada
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> agregado (g)	--	2,75
rata (g SO <sub>2</sub> :g CNT)	--	2,54:1
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O agregado (g)	--	0,305
rata (g Cu:g CNL)	--	0,32:1
Cianuro libre (ppm)	244,0	< 1
Cianuro total (ppm)	550,0	10,0
Cu (ppm)	120,0	0,1
Fe (ppm)	82,5	13,5
Zn (ppm)	4,5	0,1
pH	10,1	9,2

TABLA #28

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #2

REACTIVOS: Sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ; polvo; GA)Sulfato cúprico ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ; solución al 25%)CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- prueba en cilindro graduado
- caudal de aire: 1 l/min
- tiempo de tratamiento: 90 min
- volumen de solución: 1000 ml

	solución efluente	solución tratada
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> agregado (g)	--	3,10
rata (g SO <sub>2</sub> :g CNT)	--	2,54:1
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O agregado (g)	--	0,355
rata (g Cu:g CNL)	--	0,32:1
Cianuro libre (ppm)	284,0	< 1
Cianuro total (ppm)	620,0	5,0
Cu (ppm)	139,5	0,5
Fe (ppm)	42,0	3,8
Zn (ppm)	0,8	0,1
pH	10,6	9,2

TABLA #29

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #3  
 REACTIVOS: Sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ; polvo; GA)  
 Sulfato cúprico ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ; solución al 25%)

CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- prueba en cilindro graduado
- caudal de aire: 1 l/min
- tiempo de tratamiento: 90 min
- volumen de solución: 1000 ml

	solución efluente	solución tratada
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> agregado (g)	--	3,08
rata (g SO <sub>2</sub> :g CNT)	--	2,54:1
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O agregado (g)	--	0,535
rata (g Cu:g CNL)	--	0,32:1
Cianuro libre (ppm)	428,0	< 1
Cianuro total (ppm)	616,0	5,0
Cu (ppm)	75,0	0,4
Fe (ppm)	45,0	0,1
Zn (ppm)	0,7	0,1
pH	10,5	8,4

TABLA #30

## PRUEBAS PARA DESTOXIFICACION

EFLUENTE: #4

REACTIVOS: Sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ; polvo; GA)Sulfato cúprico ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ; solución al 25%)CONDICIONES DE LAS PRUEBAS:

- prueba en cilindro graduado
- caudal de aire: 1 l/min
- tiempo de tratamiento: 90 min
- volumen de solución: 1000 ml

	solución efluente	solución tratada
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> agregado (g)	--	8,30
rata (g SO <sub>2</sub> :g CNT)	--	2,54:1
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O agregado (g)	--	0,710
rata (g Cu:g CNL)	--	0,32:1
Ciánuro libre (ppm)	568,0	< 1
Ciánuro total (ppm)	1660,0	4,0
Cu (ppm)	510,0	0,9
Fe (ppm)	16,5	0,4
Zn (ppm)	0,9	0,1
pH	10,8	8,7

TABLA #31

CONSUMO DE REACTIVOS DE LAS DIFERENTES PRUEBAS

EFLUENTE	CNT inicial		clorinación alcalina		proceso con peróxido de hidrógeno		precipitación de cianuro libre mediante ión ferroso		proceso con dióxido de azufre y aire	
	kg Cl/ CNT	CNT final	1 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / kg CNT	CNT final	kg FeSO <sub>4</sub> / kg CNT	CNT final	kg SO <sub>2</sub> / kg CNT	CNT final		
EFLUENTE 1	18,70	102,0	3,75	2,0	18,00	12,5	2,54	10,0		
EFLUENTE 2	18,70	64,0	7,50	126,0	18,00	68,0	2,54	5,0		
EFLUENTE 3	18,70	8,0	5,00	45,0	18,00	10,0	2,54	5,0		
EFLUENTE 4	7,50	24,0	7,50	216,0	12,00	28,0	2,54	4,0		
CONSUMO	7,5-18,7		3,75-7,5		12,0-18,0		2,54			

TABLA #32

COSTOS ESTIMADOS DE TRATAMIENTO POR LOS DIFERENTES METODOS

REACTIVO	COSTO US\$	clorinación alcalina		proceso con peróxido de hidrógeno		precipitación de cianuro libre mediante ión ferroso		proceso con dióxido de azufre y aire	
		kg/ kg CNT	US\$/ kg CNT	kg/ kg CNT	US\$/ kg CNT	kg/ kg CNT	US\$/ kg CNT	kg/ kg CNT	US\$/ kg CNT
Ca(ClO) <sub>2</sub>	1,00/kg	7,5-18,7	7,5-18,7	--	--	--	--	--	--
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,60/kg	--	--	3,75-7,5	2,25-4,5	--	--	--	--
FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0,30/kg	--	--	--	--	12,0-18,0	3,6-5,4	--	--
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	0,60/kg	--	--	--	--	--	--	2,54	1,52
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	0,40/kg	--	--	--	--	--	--	0,4-0,9	0,16-0,36
NaOH	0,40/kg	--	0,20	--	--	--	--	--	--
Energía	0,10/kw		0,03		0,05		0,10		0,08
Aire									0,08
TOTAL			7,73-18,93		2,3-4,55		3,7-5,5		1,83-2,03

TABLA #33

## REQUERIMIENTOS PARA PURIFICACION DE EFLUENTES

(según Departamento de Asuntos de Agua, Sudafrica)

COMPUESTO A DETERMINARSE	NORMA GENERAL
Sodio (mg/l)	No más de 90 mg/l sobre el agua de admisión
Nitratos (mg N/l)	Max. 1,5
Arsenico (mg As/l)	Max. 0,5
Boro (mg B/l)	Máx. 1,0
Cromo hexavalente (mg Cr/l)	Máx. 0,05
Cromo total (mg Cr/l)	Max. 0,5
Cobre (mg Cu/l)	Max. 1,0
Plomo (mg Pb/l)	Max. 0,1
Ortofosfatos (mg P/l)	Max. 1,0
Hierro (mg Fe/l)	Max. 0,3
Manganeso (mg Mn/l)	Max. 0,4
Cianuro y compuestos relacionados (mg CN/l)	Max. 0,5
Fluoruros (mg F/l)	Max. 1,0
Zinc (mg Zn/l)	Max. 5,0
Cadmio (mg Cd/l)	Max. 0,05
Mercurio (mg Hg/l)	Max. 0,02
Selenio (mg Se/l)	Max. 0,05



FOTO #1: Reactores de cianuración.

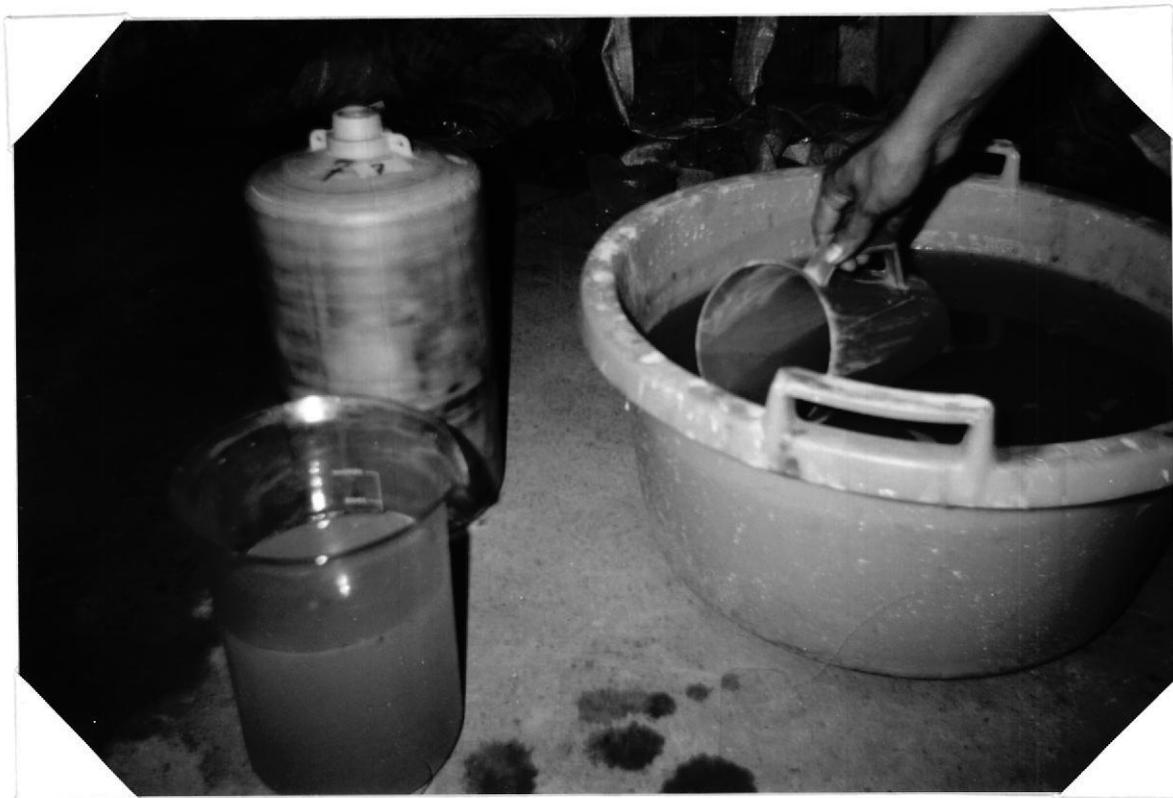


FOTO #2: Toma de muestra de efluente de cianuración.



FOTO #3: Determinación de cianuro libre mediante nitrato de plata.



FOTO #4: Aparato de destilación para determinación de cianuro.

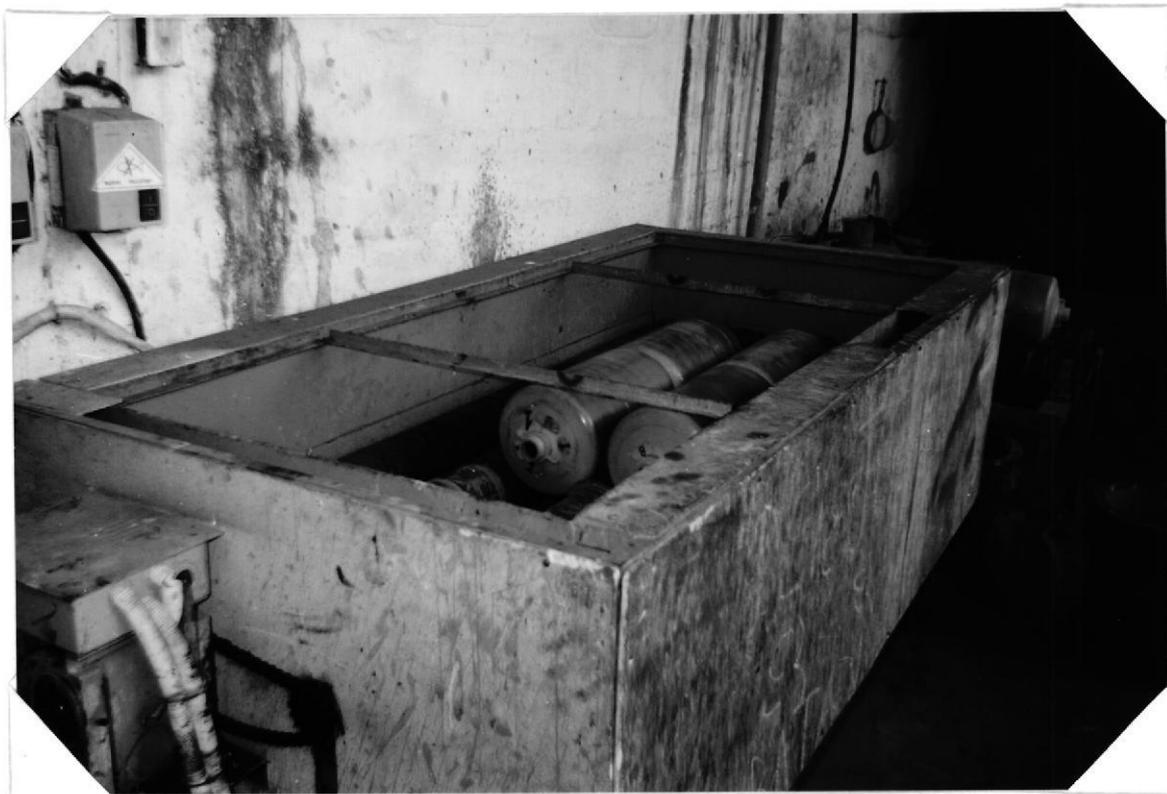


FOTO #5: Agitación mecánica de pomos de prueba.

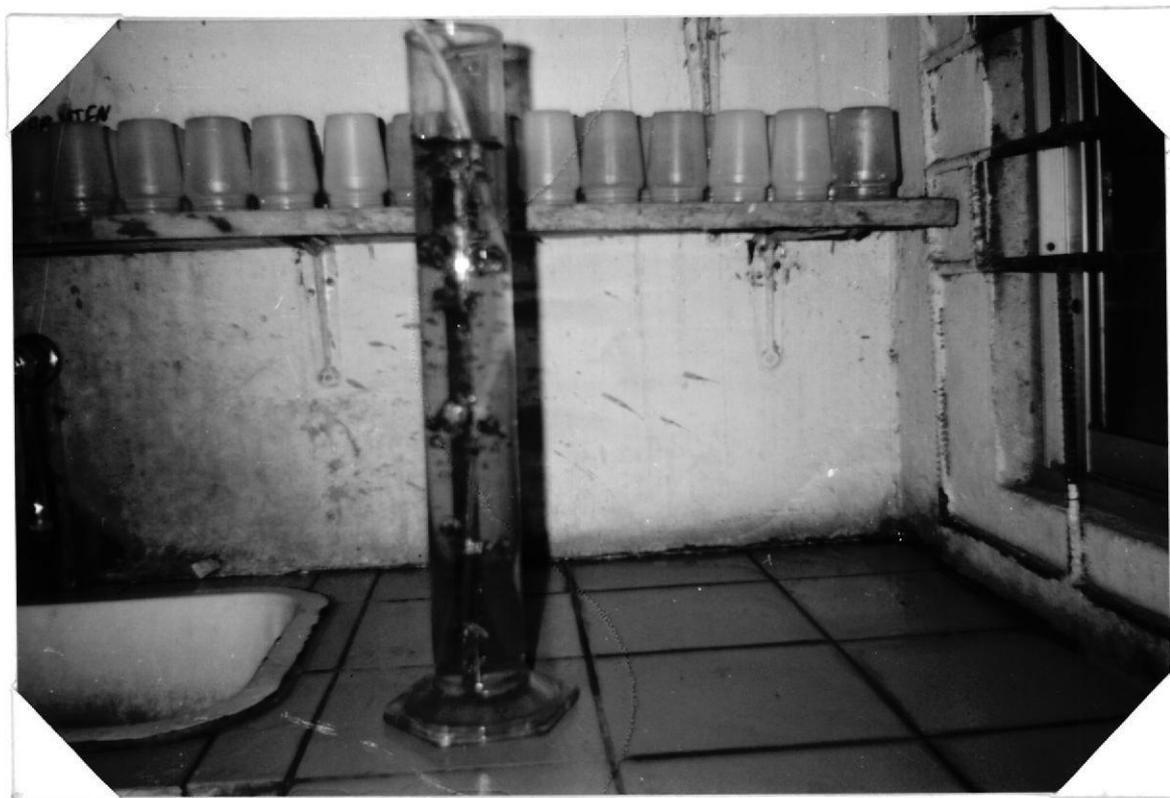


FOTO #6: Prueba de destoxificación en cilindro graduado.

## BIBLIOGRAFIA

1. GOS S. & LADWIG F., Process optimization for the detoxification of cyanide with peroxygen compounds. (Germany: DEGUSSA, 1992)
2. LENAHAN W.C. & MURRAY-SMITH R. DE L., Assay and analytical practice in the South African mining industry. (Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy, 1986), pp. 291, 363-370, 555-568.
3. MALHOTRA D. & TUKA R. F., Overview of water treatment technologies. (Littleton: Emerging process technologies for a cleaner enviroment, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1992), pp. 169-173.
4. MARSDEN J. & HOUSE Y., The chemistry of gold extraction. (Hemel Hempstead: Ellis Horwood, 1992), pp. 34-37, 260-288, 476-504.
5. MATHRE O.B. & DEVRIES F.W., Destruction of cyanide in gold and silver mine process water. (Chicago: Gold and silver: leaching, recovery and economics, proceedings from the 110th AIME meeting, 1981), pp. 77-82.
6. SMITH A. & MUDDER T., The chemistry and treatment of cyanidation wastes. (London: Mining Journal Books Limited), pp. 1-18, 27-28, 132-164, 177-196, 203-248, 299-336.
7. STAUNTON W., SCHULZ R.S. & GLENISTER D.J., Chemical treatment of cyanide tailings. (Colorado: RANDOL, 1988), pp. 85-87.

8. STOCH H., A manual of analytical methods used at Mintek.  
(Randburg: Council for Mineral Technology, 1986), pp.  
387-389.
  
9. YANNOPOULOS J.C., The extractive metallurgy of gold.  
(New York: Van Nostrand Reinhold, 1990), pp. 141-168,  
245-252