

**PROPUESTA PARA EL TRATAMIENTO DE RELAVES DISPUESTOS EN LA  
MINA “LA PLATA” DEL MUNICIPIO DE CALIFORNIA, SANTANDER:  
PRÁCTICA EMPRESARIAL**

**NARCÉS JIMÉNEZ HERRERA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2012**

**PROPUESTA PARA EL TRATAMIENTO DE RELAVES DISPUESTOS EN LA  
MINA “LA PLATA” DEL MUNICIPIO DE CALIFORNIA, SANTANDER:  
PRÁCTICA EMPRESARIAL**

**NARCÉS JIMÉNEZ HERRERA**

**Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico**

**Director**

**RAFAEL GUILLERMO ARDILA MONTERO**

**Ingeniero Metalúrgico**

**Especialista en Hidrometalurgia Avanzada**

**Codirector**

**JHON FREDDY PALACIOS**

**Ingeniero Metalúrgico, MSc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2012**

## DEDICATORIA

*Este trabajo es dedicado de forma muy especial a todas las personas que han sembrado en mí la semilla del éxito, y que hoy con orgullo puedo decir, que después de todos estos años, de abono y de cuidado por fin está dando sus frutos.*

*Agradezco a mi familia por su gran amor y por el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida. A mi madre Miriam Herrera Niño, por su esfuerzo en la difícil labor de formar a un gran hombre, y por ser esa fuerza incondicional motivadora de la consecución de mis más grandes logros. A mi padre William Jiménez Gallego por su apoyo y sobre todo por creer siempre en mí, y quien con sus conocimientos de la vida me ha impulsado a crecer como persona. A mis hermanos Carlos, Laura, y Sandra por ser grandes amigos que me han brindado palabras valiosas en todo momento (¡Charly, Bala y Monchis los quiero!). A mi novia Leydi Banessa Muñoz, por su gran cariño y por estar conmigo siempre, (¡Mirra te adoro!). A mi abuela Sabina por sus palabras sabias, que han dejado huella en el tiempo. A mi abuela Zoraída y en general a todos mis parientes, cercanos y no tan cercanos. A mis grandes amigos, de los cuales he aprendido enseñanzas y experiencia valiosa, Jairo Iván Vargas (¡gran ingeniero!), Juan David Arias, Juan G. Rueda, María E, Oscar, David, Fernanda, Coleguillas (¡ustedes saben!) y a todos aquellos que se me escapan por nombrar, pero que saben, que siempre los tengo presente.*

*Por último y no menos importante, en señal de gratitud a Rafael Ardila y a Jhon Freddy palacios, por sus enseñanzas, apoyo y confianza depositada en mí, al creer siempre en mis capacidades. Al Profesor Gustavo Neira y en general a todos los docentes de la escuela de Ingeniería metalúrgica, quienes con su conocimiento y consejos me hicieron un buen estudiante y contribuyeron en mi formación como ingeniero.*

*Narcés Jiménez Herrera*

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi agradecimiento ha cuantas personas han hecho posible la realización de este trabajo, en especial:

A mi familia, padre, madre, hermanos.

Eco Oro Minerals Corporation y funcionarios.

Rafael Guillermo Ardila Montero, ingeniero metalúrgico UIS, funcionario de Eco Oro Minerals Corp. y director de este proyecto.

Jhon Freddy Palacios, ingeniero metalúrgico UIS, codirector de este proyecto.

Leydi Banessa Muñoz Díaz, estudiante de Trabajo Social, UIS

Jairo Iván Vargas, estudiante de ingeniería metalúrgica, UIS

Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de los materiales

Gustavo Neira, Luz Amparo Quintero, Elcy María Córdoba, Luis Orlando Aguirre y todos los demás profesores y técnicos de la escuela de ingeniería metalúrgica.

A todas aquellas personas que de una u otra forma apoyaron el desarrollo de este trabajo, profesores, técnicos, estudiantes, amigos y amigas.

¡Gracias!

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCION</b>	18
<b>1 OBJETIVOS</b>	21
<b>2 MARCO TEORICO</b>	22
2.1 RELAVES	22
2.2 CONTAMINANTES EN RELAVES	23
2.2.1 EL CIANURO EN LA PRODUCCION DE ORO	23
2.2.1.1 QUIMICA DEL CIANURO	23
2.2.1.1.1 Cianuro libre	24
2.2.1.1.2 Complejos de cianuro	25
2.3 METALES PESADOS	26
2.4 DRENAJE ACIDO	27
2.5 NORMA AMBIENTAL	28
2.6 TRATAMIENTOS DE INERTIZACION O NEUTRALIZACION	29
2.7 PROCESOS DE ESTABILIZACION/SOLIDIFICACION	29
2.7.1 Aplicaciones	31
2.7.2 Cementación	31
2.7.3 Materiales	32
2.7.3.1 Cemento	33
2.7.3.2 Clasificación del cemento	33
2.7.3.2.1 Cemento Portland Ordinario	33
2.7.3.2.2 Cemento Puzolánico	34

2.7.3.2.3	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno	34
2.7.3.2.4	Cemento Portland Compuesto	34
2.7.3.2.5	Cemento Portland con humo de sílice	34
2.7.3.3	Ventajas y Desventajas de E/S mediante Cemento Portland	35
2.7.3.4	Fabricación de cemento Portland	35
2.7.4	Composición y definición de términos	37
2.7.4.1	Pasta o pegante	37
2.7.4.2	Mortero	37
2.7.4.3	Concreto	37
2.7.5	Características y funciones de los componentes	38
2.7.5.1	Cemento	38
2.7.5.2	Agua	38
2.7.5.3	Aire	38
2.7.5.4	Funciones de la pasta de cemento	39
2.7.5.5	Agregados o áridos	39
2.7.5.5	Funciones de los agregados	40
2.7.5.6	Conceptos básicos	40
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	42
3.1	DESCRIPCIÓN DE ANTECEDENTES DE LA MINA “LA PLATA”	42
3.2	DESCRIPCIÓN DE RELAVES	42
3.3	MUESTREO DE RELAVES	43
3.3.1	Homogeneización del material	44
3.3.2	Cono y cuarteo	45

3.4	ENSAYOS FISICOQUÍMICOS	46
3.4.1	Densidad Real (gr/cm <sup>3</sup> )	46
3.4.2	Humedad (%)	46
3.4.3	Granulometría	46
3.4.4	Cianuro WAD	47
3.4.5	Test ABA	47
3.4.6	Test ICP	47
3.4.7	Test SPLP	47
3.5	TRATAMIENTO DE INERTIZACION	48
3.5.1	ELABORACIÓN DE PROBETAS Y ENSAYOS	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>50</b>
4.1	DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES	50
4.1.1	Geomorfología	50
4.1.2	Suelos	50
4.1.3	Hidrología	51
4.1.4	Proceso de Explotación Mina “La Plata”	52
4.1.4.1	Arranque	54
4.1.4.2	Trituración y Molienda	54
4.1.4.3	Gravimetría y Amalgamación	55
4.1.4.4	Cianuración y Precipitación	56
4.1.4.5	Disposición de relaves	57
4.1.4.6	Impactos ambientales	57
4.2	DESCRIPCION DE RELAVES	58

4.2.1	Hallazgos	58
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS EN ENSAYOS FISICOQUÍMICOS	61
4.3.1	DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS	61
4.3.2	DECRETO 1594 DE 1984	62
4.3.2.1	Criterios de calidad admisibles	62
4.3.2.2	Criterios de Vertimiento	64
4.3.3	ENSAYO CIANURO WAD	64
4.3.4	TEST ABA (EPA ABA Modificado/Sobeck y Lawrence)	65
4.3.5	GRANULOMETRIA	67
4.3.6	DENSIDAD Y HUMEDAD	69
4.3.7	TEST ICP	70
4.3.8	TEST SPLP	73
4.4	INERTIZACION DE RELAVES	75
4.5	INERTIZACION DE RELAVES DE LA MINA “LA PLATA” MEDIANTE ESTABILIZACION/SOLIDIFICACION CON CEMENTO PORTLAND ORDINARIO	76
4.5.1	Determinación del tipo de arena	77
4.5.2	Determinación de la relación Agua-Cemento	79
4.5.3	Selección de la consistencia	80
4.5.4	Determinación de factores que influyen en el contenido de agua	80
4.5.5	Determinación de la proporción 1:n	83
4.5.6	Calculo del contenido de cemento	83
4.5.7	Determinación del contenido de agua	84
4.5.8	Determinación del contenido de arena	84

4.5.9	Ajustes por humedad de arena	85
4.5.10	Ajustes a las mezclas de prueba	85
4.5.11	RESULTADOS EN PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS	87
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>91</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>93</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>94</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>100</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Ventajas y desventajas del uso del cemento Portland	35
Tabla 2: Pesos de muestras para análisis	44
Tabla 3: Identificación de las Muestras	61
Tabla 4: Límites máximos admisibles recurso humano y domestico.	62
Tabla 5: Límites máximos admisibles uso agrícola	63
Tabla 6: Límites máximos admisibles uso pecuario	63
Tabla 7: Límites permisibles de sustancias en vertimientos	64
Tabla 8: Resultados Ensayo Cianuro Wad	65
Tabla 9: Criterios para definición de Potencial	65
Tabla 10: Resultados Test ABA	66
Tabla 11 (A): Resultados Granulometría	67
Tabla 11 (B): Resultados Granulometría	67
Tabla 12: Distribución granulométrica	68
Tabla 13: Resultados de Ensayos de Humedad (%) y Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	69
Tabla 14: Resultados Test ICP	71
Tabla 15: Resultados Test SPLP y comparación con Decreto Ambiental	74
Tabla 16: Gravedades específicas y % de Absorción de relaves	78
Tabla 17: Diferentes consistencias del mortero	80
Tabla 18: Relación entre % fluidez y relación agua-cemento	81
Tabla 19: Valores de b para distintas consistencias y módulos de finura	82

Tabla 20:	Dosificación por metro cúbico de mortero en proporción (1:2,13)	86
Tabla 21:	Dosificación para 14 m <sup>3</sup> de relaves de la mina "La Plata"	86
Tabla 22:	Dosificación para mezclas de prueba	87
Tabla 23:	Resultados absorción atómica	89
Tabla 24:	Comparación de concentración de sustancias entre mortero y relaves	90

## LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1	Equilibrio de CN-/HCN con el pH	25
Figura 2:	Puntos de muestreo	43
Figura 3:	Esquema de procedimiento de cono y cuarteo	45
Figura 4:	Flujograma elaboración de probetas y ensayos	49
Figura 5:	Depósitos antrópicos	51
Figura 6:	Infraestructura Mina "La Plata"	52
Figura 7:	Flujograma del proceso Mina "La Plata"	53
Figura 8:	Sistema de teleférico	54
Figura 9:	Sistema de Molienda	55
Figura 10:	Mesa vibratoria Wilfley deteriorada	56
Figura 11:	Hallazgos de relaves	59
Figura 12:	Esquema del volumen total de relaves	60
Figura 13:	Distribución granulométrica $D_p$ . (mm) Vs % Peso Pasante Acumulado	69
Figura 14:	Porcentajes de elementos en relaves Muestra A	72
Figura 15:	Flujograma de decisión sobre viabilidad de la técnica de inertización	75
Figura 16:	Procedimiento de diseño de mezcla para mortero	77
Figura 17:	Arena utilizada para el diseño de mezcla (Relaves)	78
Figura 18:	Correspondencia entre relación A/C y resistencia a la compresión	79
Figura 19:	Relación entre % fluidez y relación agua-cemento	82
Figura 20.	Superficie sólida de fragmento de mortero a base de relaves	88

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.	
Anexo A	Elaboración de Probetas y ensayos.	102
Anexo B	Memoria fotográfica procedimiento Estabilización/ Solidificación con cemento y pruebas de resistencias a la compresión.	104
Anexo C	Mapa titulo minero "La Plata"	106

## RESUMEN

### TITULO

PROPUESTA PARA EL TRATAMIENTO DE RELAVES DISPUESTOS EN LA MINA "LA PLATA" DEL MUNICIPIO DE CALIFORNIA SANTANDER\*

### AUTOR

NARCÉS JIMÉNEZ HERRERA\*\*

### PALABRAS CLAVES

Relaves, Cianuro, Metales Pesados, Estabilización/Solidificación, Mortero, Cemento Portland

### DESCRIPCION:

La mina "La Plata", se encuentra ubicada en el municipio de California, Santander, a lo largo de la quebrada "La Baja"; en este lugar se realizaron procesos metalúrgicos de forma artesanal, para la recuperación de oro y plata por medio de las técnicas de amalgamación y cianuración, donde se generaban grandes cantidades de relaves que eran dispuestos en ríos, no obstante aun se conserva parte de este material, el cual es de interés en este trabajo debido a la compra del título minero por parte de Eco Oro Minerales Corporation, empresa que ha planteado un plan de manejo ambiental en la zona y la búsqueda de una solución responsable para el tratamiento del residuo.

Para llevar a cabo esta labor primero se estableció una línea base ambiental, determinando las características geomorfológicas, hidrológicas, los impactos ambientales más representativos, entre otros factores importantes de la zona, además se realizó la descripción de los procesos de explotación utilizados y la influencia de estos sobre el residuo final; posteriormente se llevó a cabo la descripción y caracterización de los relaves, con el fin de determinar su nivel de peligro para el ecosistema y la salud humana.

Finalmente se formuló la propuesta de inertización del residuo, la cual se basa en la Estabilización/Solidificación con cemento portland ordinario, para llevar a cabo esto, se planteó el diseño de mezcla para un mortero resistente e impermeable y por último para dar soporte a la técnica se realizaron mezclas de prueba, donde se observó un buen fraguado, y una alta resistencia a la compresión, además se hizo el análisis de la concentración de Hg, Cu, en el lixiviado del mortero, el cual demostró una reducción significativa de la concentración total de estas sustancias al ser comparando con la concentración obtenida en los relaves iniciales.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Rafael Guillermo Ardila Montero; Codirector: John Freddy Palacios

## ABSTRACT

### TITLE

PROPOSAL TO TAILINGS TREATMENT DISPOSAL AT THE "LA PLATA" MINE TOWN CALIFORNIA, SANTANDER\*

### AUTHOR

NARCÉS JIMÉNEZ HERRERA\*\*

### KEYWORDS

Tailings, Cyanide, Heavy Metals, Stabilization/Solidification, Mortar, Portland cement

### DESCRIPTION:

"La Plata" mine is located at the California town, Santander, along the "La Baja" creek; in this place was done traditional metallurgical process, in order to gold and silver recovery through techniques such as leaching and amalgamation, where were generated large amounts of tailings that was disposal into the rivers, however even is preserved a part of this material, which is interest in this work due to the purchase of the mining title by Eco Oro Minerals Corporation, company that has proposed an environmental management plan at the area, and the search for an environmentally responsible solution for the treatment of this waste.

To perform this work, first was established an environmental base line, determining the characteristics geomorphological, hydrological, the most environmental representative impacts, among other important factors in the area, we also performed the description of the mining process used and the influence of these on the final residue, after this was performed the tailings description and characterization, to determine the level of hazardous to the ecosystem and human health.

Finally was performed the proposed waste inerting, which is based in the Stabilization/Solidification whit ordinary Portland cement, to performed this, then was posed, the mix design to a resistant and waterproof mortar, and finally to support the technical, were performed test mixtures realized, where they could observe the good plaster set , and a high strength to compression, also was performed the analysis of the concentration of Hg, Cu, in the mortar leachate, which showed a significant reduction in the concentrate of these substances, when compared whit the concentration obtained in the tailings.

---

\* Work Degree

\*\* Faculty of Physico-Chemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Rafael Guillermo Ardila Montero; Co-Director: John Freddy Palacios

## INTRODUCCION

La minería artesanal y a pequeña escala se ha desarrollado desde hace varias décadas en el municipio de California Santander, con lo cual se han generado grandes oportunidades de empleo para los sectores más pobres y las personas sin empleo. Si bien esta actividad permite ganarse la vida a cientos de personas, también expone a miles a graves amenazas, debido a la poca atención que se presta a los subproductos y residuos de las diferentes actividades mineras, tales como relaves, los cuales son usualmente dispuestos en suelos y ríos, para ser arrastrados por las corrientes de estos, lo que genera contaminación al ecosistema y las diferentes quebradas que desembocan en el río Suratá, el cual es una de las principales fuentes para suministro de agua potable para la ciudad de Bucaramanga.

Los procesos de extracción de oro y plata implican una separación de material valioso y no valioso (relaves), este último en mayor cantidad. Dentro de las técnicas utilizadas para el beneficio y extracción de estos metales se encuentra, la Gravimetría- Amalgamación a los minerales de alta ley en Oro, y el proceso de Cianuración a los minerales de baja ley en Oro. Durante estos dos procesos se introducen contaminantes al medio ambiente tales como: mercurio y cianuro, que se encuentran en sus relaves, y cuyas concentraciones generalmente superan los límites permisibles para las sustancias de interés sanitario en vertimientos contempladas en el decreto 3930 de 2010 soportado en el 1594 de 1984.

La Mina de Oro La Plata en la cual se trabajó a nivel de planta piloto, interés de este proyecto, actualmente no realiza explotación minera debido a la compra de este título minero por parte de la compañía Eco Oro Minerals Corporation. Sin embargo durante mucho tiempo se realizaron procesos de explotación donde se generaron grandes cantidades de residuos peligrosos (Relaves), que por lo general eran dispuestos en ríos y suelos, no obstante aun se conserva una parte de este material en la mina, el cual presenta altos niveles de metales

pesados y elementos cianicidas, además de agentes generadores de drenaje ácido, para lo cual, la compañía Eco Oro Minerals Corporation en búsqueda de una solución responsable a este problema, a dispuesto un plan de manejo ambiental, donde se contempla el tratamiento de este material. A través del área de metalurgia & procesos de la empresa se planteó una propuesta para el tratamiento de inertización de los relaves de esta mina, por medio de la técnica de Estabilización/solidificación con cemento portland ordinario.

Por lo tanto para el desarrollo de este trabajo se identificaron algunas características del sitio, el cual presenta una topografía abrupta con laderas de fuerte pendiente, suelos con escaso desarrollo y la presencia de quebradas tales como “La Baja” además de otras de menor importancia como: “La Plata”, “Choperron”, “La Higuera”, las cuales desembocan en el río Suratá y sobre las cuales se presenta el impacto ambiental más significativo, debido a la descarga de relaves impregnados de metales pesados y elementos cianicidas. El proceso de explotación en la mina “La Plata” a minerales de oro tales como la pirita, partía del arranque del mineral en el frente de mina por medio de voladura, proceso donde se generaba material de grandes tamaños, que era transportado hasta la etapa de conminución, donde éste se trituraba y molía, por medio de un molino de pisones, cuya energía era suministrada por una rueda Pelton, la cual se movía por la corriente de agua de la quebrada “ La Baja”, finalmente se realizaba la gravimetría-amalgamación a minerales de alta ley y cianuración por percolación en tanques al mineral de baja ley, etapas en las cuales se obtenía finalmente el oro y los relaves.

La mina “La plata” aun presenta una parte de relaves, aproximadamente  $14 \text{ m}^3$ , el cual tiene una apariencia húmeda, fuerte olor, propio de materiales con cianuro, y están dispuestos en una infraestructura de cianuración desde hace varios meses. De acuerdo a la caracterización, este material presenta una densidad de  $2,8 \text{ gr/cm}^3$ , humedad del 6%, distribución granulométrica donde el tamaño predominante son las arenas, constituidas en un 65 % de Silicio, aluminio en un 13 %, hierro en un 10 % y otras sustancias que impactan al ambiente, tales como el plomo, el cual se encuentra en el 1%, además ésta

muestra presentó una concentración alta de cianuro WAD y movilidad de metales pesados tales como: mercurio y cobre que superan los límites permisibles por la normatividad ambiental actual, 0,02 mg/L y 3 mg/L respectivamente, y un alto potencial de generación de ácido determinado por medio del test cualitativo ABA.

La etapa final del trabajo consistió en la descripción de la metodología de inertización de los relaves de la mina “La Plata” por medio de la técnica de Estabilización/Solidificación con cemento, enfocada hacia la obtención de un mortero (Relave-Cemento-Agua-Aire) resistente e impermeable, y la realización de la mezcla de prueba, la cual dio resultados favorables debido a que ésta logró fraguar y constituirse, arrojando resultados en las pruebas de resistencia a la compresión considerablemente buenos de cerca de 240 kg/cm<sup>2</sup>, pero por debajo de lo estimado en el diseño de 500 kg/cm<sup>2</sup>, además esta muestra presentó una reducción significativa de la concentración de Hg, Cu en el lixiviado que se obtuvo del mortero.

De acuerdo con estos resultados, se comprobó la efectividad de la técnica desde el punto de vista mecánico, lo cual es muy importante, porque un producto resistente mecánicamente genera menos deterioro con el paso del tiempo, y por ende menor liberación de tóxicos; por otro lado desde el punto de vista químico la técnica mostró efectividad, se logró disminuir la concentración de contaminantes en un 80%, sin embargo para tener un criterio con mayor soporte es necesario analizar la verdadera concentración que es liberada por medio del test SPLP (el cual logra simular las condiciones de lluvia ácida al ser expuesto este material en un vertedero), es importante realizar otro tipo de probetas con el fin de optimizar las variables más importantes en los diseños de mezcla, y ratificar así, con otras pruebas químicas la confiabilidad de la técnica, la cual podría ser aplicada también en los relaves presentes en otras minas del sector, evitando así la contaminación de los ríos y suelos con este residuo.

# 1 OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

Proponer una metodología de Inertización de posibles componentes peligrosos presentes en Relaves procedentes de antiguos procesos de beneficio y transformación en la Mina “La Plata” del municipio de California, Santander.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar y describir los antiguos procesos metalúrgicos utilizados en la Mina “La Plata” para la recuperación de metales preciosos (Au y Ag).
- Determinar las características fisicoquímicas que permitan evaluar la toxicidad de los Relaves dispuestos en la Mina “La Plata”.
- Proponer un esquema de inertización de los posibles componentes peligrosos presentes en los relaves de La Mina “La Plata”.

## 2 MARCO TEORICO

### 2.1 RELAVES

Los relaves se definen como el desecho mineral sólido, de tamaño entre arena y limo, usualmente una mezcla de rocas, arena, agua, y mineral, resultantes de procesos de beneficio y transformación; los cuales son producidos, transportados o depositados en forma de lodo, pasta, o filtrados y cuya concentración de sólidos varía del 50 al 90 %. En general las arenas de relaves o relaves arenosos, son materiales predominantemente más grandes que 0.074 mm lo que significa que menos del 50% son más finos que ese tamaño, las lamas son predominantemente materiales del tamaño del limo, más del 50% menor de 0.074 mm.<sup>1</sup> Estos materiales son descargados como subproductos en una variedad de procesos de extracción, (cianuración, concentración gravimétrica, amalgamación, flotación) se puede establecer por ende, que la historia del proceso dicta las características de los relaves, las cuales son extremadamente diversas y dependen de los siguientes factores:

- Clase de mineral originalmente tratado.
- Tipo de proceso de extracción originalmente usado.
- Eficiencia del proceso de extracción.
- Edad de deposición de Relaves.<sup>2</sup>

Existen diversos métodos utilizados para la extracción de metales a partir de sus menas, los cuales generan grandes cantidades de subproductos tóxicos, dentro de estas técnicas se destaca la flotación y la cianuración. La flotación opera sobre el principio, que las partículas que contienen el mineral que se desea extraer son hechas receptivas para adherirse a burbujas de aire que se elevan a la superficie. Las espumas son el producto final de este proceso, entre

---

<sup>1</sup> Minem, Guía ambiental para el manejo de relaves mineros [En línea], [Ref.10 de agosto de 2011] p. 11

<sup>2</sup> MARSDEN John O, HOUSE C. The Chemistry of Gold extraction, Lain, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME), Second Edition, Colorado USA 2006 p. 79

tanto las partículas que no se elevan constituyen los relaves. En el proceso de cianuración, la solución de cianuro que contiene los metales disueltos es separada de los relaves a través de una separación sólido-líquido, donde los sólidos son enviados a los tanques de relaves, mientras que la solución clarificada puede pasar a una posterior etapa de recuperación de valores.<sup>3</sup>

## **2.2 CONTAMINANTES EN RELAVES**

Los relaves presentan ciertos componentes que los hacen peligrosos para la salud y la biodiversidad, los cuales se presentan debido a la roca de origen, los procesos empleados, entre otros factores. A continuación se describen algunos de los principales componentes peligrosos que se pueden presentar en estos residuos, tales como el cianuro, los metales pesados, además del fenómeno de drenaje ácido, generado por ciertos minerales sulfurosos.

### **2.2.1 EL CIANURO EN LA PRODUCCIÓN DE ORO**

El cianuro es uno de los pocos reactivos químicos que disuelven el oro en agua, y que se consigue de forma fácil a un precio razonablemente bajo de aproximadamente USD \$ 1.900/Ton, en forma de cianuro de sodio, el cual ha sido utilizado en la extracción de metales desde 1887 y actualmente se le utiliza y maneja en forma segura en la recuperación de oro en todo el mundo en soluciones muy diluidas, típicamente entre 0.01% y 0.05% de cianuro (100 a 500 partes por millón).<sup>4</sup>

#### **2.2.1.1 QUÍMICA DEL CIANURO**

La gran diversidad y compleja naturaleza de los diferentes compuestos cianurados se puede explicar en función de las características químicas del grupo ciano ( $C\equiv N$ ), que consiste en un átomo de carbono en un enlace triple con un átomo de nitrógeno. El ion cianuro  $CN^-$ , se enlaza fuertemente con muchos metales, especialmente con los de la serie de transición y a menudo se

---

<sup>3</sup> Minem, Op. Cit., p. 9

<sup>4</sup> LOGSDON, M; KAGELSTEIN, K; MUDER, Terry. The Management of Cyanide in Gold Extraction. ICME 1999. p. 7

utiliza para extraerlos de sus mezclas. Uno de los motivos que hace muy venenoso para la vida al ion cianuro es el enlace que forma con los iones metálicos de la materia viva, como por ejemplo el hierro en proteínas que son necesarias para el uso del oxígeno molecular por parte de las células.<sup>5</sup>

Después de haber extraído el oro por medio de procesos hidrometalúrgicos, el cianuro puede estar presente en tres tipos principales de compuestos de cianuro en los efluentes residuales o en las soluciones de los procesos: cianuro libre, cianuro débilmente complejado y cianuro fuertemente complejado, juntos, los tres compuestos de cianuro constituyen el “cianuro total”. Al conocer la química de estos tres tipos de cianuro se puede comprender su comportamiento respecto de la seguridad y el ambiente.<sup>6</sup>

#### **2.2.1.1.1 Cianuro libre**

“Cianuro libre” es el término utilizado para describir tanto el ion de cianuro (CN) que se disuelve en el agua del proceso como cualquier cianuro de hidrógeno (HCN) que se forma en la solución. Las briquetas sólidas de cianuro de sodio se disuelven en el agua para formar el ion de sodio y el anión de cianuro (CN<sup>-</sup>). El anión de cianuro se combina luego con el ion de hidrógeno para formar HCN molecular. La concentración del ion de hidrógeno en el agua del proceso se expresa mediante el conocido parámetro pH. Casi todo el cianuro libre está presente como HCN cuando hay abundantes iones de hidrógeno presentes, es decir, a un valor de pH de 8 o menos. Este HCN, entonces, puede volatilizarse y dispersarse en el aire. Cuando el pH es superior a 10.5, hay pocos iones de hidrógeno presentes y casi todo el cianuro libre está presente como CN<sup>-</sup>. En condiciones normales de temperatura y presión, las concentraciones de HCN y CN<sup>-</sup> son iguales a un valor de pH de aproximadamente 9.4.<sup>7</sup>

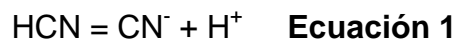
A continuación se muestra la curva de equilibrio ácido-base del cianuro, correspondiente a la reacción:

---

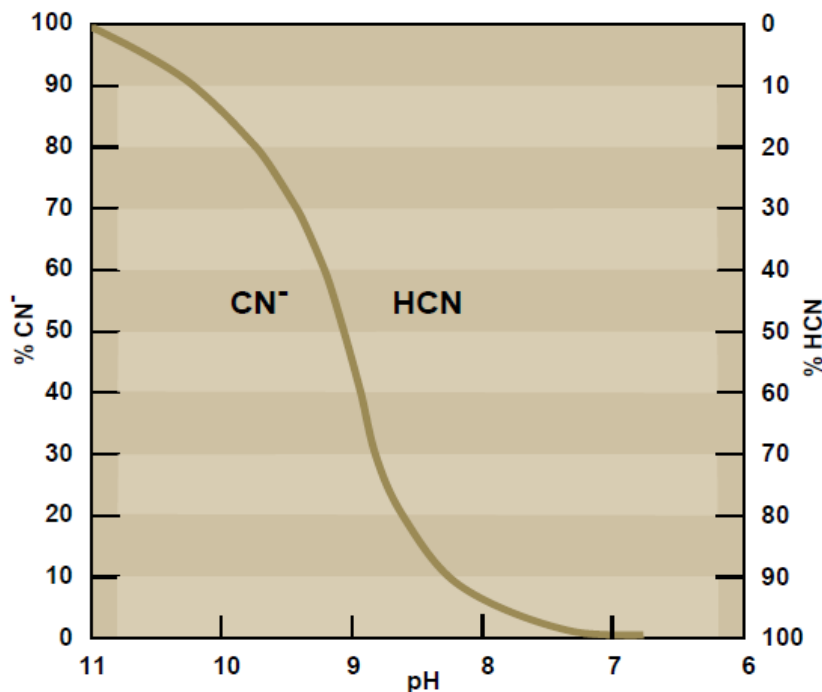
<sup>5</sup> BAIR, Colin. Química Ambiental, Editorial Reverté S.A. España 2001 p. 502

<sup>6</sup> LOGSDON, Op. cit., p. 15

<sup>7</sup> Ibíd., p 15



**Figura 1.** Equilibrio de CN<sup>-</sup>/HCN con el pH



**Fuente:** The Management of Cyanide in Gold Extraction, Mudder Terry, 1999

Esta curva muestra que para tener el cianuro estable en solución y evitar la formación de ácido cianhídrico, veneno mortal y volátil, es necesario trabajar a un valor de pH igual o superior a 11.<sup>8</sup>

#### 2.2.1.1.2 Complejos de cianuro

Aunque las soluciones que contienen cianuro se utilizan en minería porque reaccionan con el oro, también reaccionan con otros metales. El mineral aurífero casi siempre contiene otros metales, entre ellos hierro, cobre, zinc, níquel y plata, así como otros elementos, como el arsénico. En la mayoría de los cuerpos mineralizados, las concentraciones de otros metales típicamente son mayores que la concentración de oro en varios órdenes de magnitud.

<sup>8</sup> G. Cáceres A. Hidrometalurgia y Electrometalurgia, Universidad de Atacama, Copiapó, 2007

Los complejos débiles de cianuro, con frecuencia denominados cianuros “disociables en ácidos débiles” o cianuros DAD (WAD), pueden disociarse en solución y producir concentraciones ambientalmente significativas de cianuro libre. Los complejos débiles incluyen complejos de cianuro de cadmio, cobre, níquel, plata y zinc. El grado al cual se disocian estos complejos depende en gran medida del pH de la solución. Por otra parte, los complejos fuertes de cianuro se degradan mucho más lentamente que el cianuro DAD en condiciones químicas y físicas normales. Los complejos de cianuro con oro, cobalto y hierro son fuertes y estables en solución. Esta estabilidad del complejo oro-cianuro es un factor clave en el uso del cianuro para la extracción del oro del mineral. Una vez que el oro entra a la solución ligado al cianuro, permanece complejado con el cianuro hasta que las condiciones del proceso se cambian con el fin de removerlo de la solución.<sup>9</sup>

### **2.3 METALES PESADOS**

El término de “metal pesado” se refiere a aquellos metales de la tabla periódica cuyo peso específico es superior a  $5\text{g/cm}^3$  o que tienen un número atómico por encima de 20, excluyendo generalmente a los metales alcalinos y elementos alcalinotérreos, el término de “metal pesado” puede ser utilizado de una forma globalizadora para referirse a aquellos metales clasificados como contaminantes ambientales. Los Metaloides, por su parte, poseen características intermedias entre los metales y los no metales de acuerdo con sus propiedades de enlace e ionización. Metaloides como el As, Se o Sb también pueden constituir importantes contaminantes ambientales.<sup>10</sup>

Entre los metales pesados hay elementos esenciales y no esenciales para los seres vivos, aunque el límite entre estos dos grupos no está claramente delimitado y la lista de elementos biológicamente importantes aumenta con el tiempo, Normalmente se reconocen como elementos esenciales al Fe, Mn, Zn, Cu, Co y Mo, como elementos benéficos al Ni y Cr, y se considera que no

---

<sup>9</sup>LOGSDON, Op. cit., p.21-23

<sup>10</sup>LAZARO Javier D. Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados, tese de Doutoramento, facultad de Biología universidad de Santiago de Compostela [en línea], [ref.15 agosto] p. 9

tienen ninguna función biológica elementos como el Cd, Hg, Pb y As. Los metales pesados ya sean esenciales o no, pueden llegar a ser tóxicos cuando su aporte es excesivo y afectar negativamente al crecimiento y reproducción de los organismos, pudiéndoles causar incluso la muerte. Por otro lado el incremento de metales pesados en los suelos inhibe la actividad enzimática microbiana y reduce la diversidad de las poblaciones de flora y fauna, provocando infertilidad e incrementando los procesos erosivos.<sup>11</sup>

Los relaves contienen frecuentemente altas concentraciones de metales pesados que pueden llegar a ser incorporados a suelos y ríos, mediante reacciones de oxidación y meteorización. Diferentes causas implican la presencia de estos elementos en dichos residuos, por ejemplo, en la lixiviación con cianuro ocurren reacciones de disolución de elementos metálicos que son propios de la mena y que se pueden presentar por lo tanto en los relaves o contaminando el producto metálico final; por otro lado cuando se ha incluido alguna etapa con adición de reactivos que pueden liberar algún elemento metálico; por ejemplo en el proceso de amalgamación, el mercurio no es un elemento de interés que puede presentarse en los relaves.

## **2.4 DRENAJE ÁCIDO.**

El fenómeno de drenaje ácido proveniente de minerales sulfurosos es un proceso que ocurre en forma natural. Hace cientos de años, se descubrieron muchos yacimientos minerales por la presencia de agua de drenaje rojiza, indicando la presencia de minerales sulfurosos. El drenaje ácido se refiere al drenaje contaminado que resulta de la oxidación de minerales sulfurados y lixiviación de metales asociados, provenientes de las rocas sulfurosas cuando son expuestas al aire y al agua. El desarrollo es un proceso dependiente del tiempo y que involucra procesos de oxidación tanto química como biológica y fenómenos físico-químicos asociados, incluyendo la precipitación y el encapsulamiento. A lo largo del tiempo, la química del agua de drenaje cambia, volviéndose gradualmente más ácida, con concentraciones crecientes de

---

<sup>11</sup>Ibíd., p.10

metales, por lo tanto el término drenaje contaminado se refiere al agua de drenaje que contiene niveles de cualquier elemento o contaminante que no se encuentre dentro de los límites reglamentarios para el agua que drena de un asiento minero, o que podría ocasionar un impacto ambiental adverso.<sup>12</sup>

No todos los minerales sulfurosos son igualmente reactivos, ni la acidez se produce en igual proporción, además, no todos los minerales sulfurosos o rocas con contenido de sulfuro son potencialmente generadores de ácido. La tendencia de una muestra particular de roca a generar acidez neta es una función del balance entre los minerales (sulfurosos) productores potenciales de ácido y los minerales (alcalinos) consumidores potenciales de ácido. Con el tiempo, a medida que se agotan los minerales consumidores de ácido o se vuelve imposible acceder a ellos a causa de la formación de cubiertas de minerales secundarios, se puede generar agua ácida. La oxidación de los minerales sulfurosos libera hierro ferroso en la solución. La oxidación química del hierro ferroso es rápida a un pH superior a 7 y el hierro férrico se precipita de la solución como un hidróxido. En algún momento en el futuro, décadas y posiblemente siglos después del inicio de la generación de estos ácidos, la velocidad disminuirá con la oxidación completa de los sulfuros más reactivos y el pH se incrementará hasta que la roca se torne sólo ligeramente reactiva y el pH del agua de drenaje no sea afectado.<sup>13</sup>

## **2.5 NORMA AMBIENTAL**

El decreto 3930 de 2010, establece criterios de calidad para el control de las sustancias tóxicas presentes en vertimientos, este decreto se encuentra orientado hacia la protección de los recursos, y se entenderá por tal las aguas superficiales, subterráneas, marinas y estuarinas incluidas las aguas servidas. Las sustancias de interés sanitario consideradas en el artículo 20, de este mismo decreto son las siguientes: Arsénico, Plomo, Bario, Selenio, Cadmio,

---

<sup>12</sup> Guía ambiental para el manejo de drenaje ácido, Ministerio de Minas y Energía del Perú, [En línea], [Ref.20 de agosto de 2011], p. 3-4

<sup>13</sup> *Ibíd.*, p. 5-7

Acenafteno, Cianuro, Acroleína, Cobre, Acrilonitrilo, Cromo, Benceno, Mercurio, Bencidina, Níquel, Tetacloruro de Carbono (Tetaclorometano), entre otros.<sup>14</sup>

## **2.6 TRATAMIENTOS DE INERTIZACIÓN O NEUTRALIZACIÓN.**

El tratamiento como parte de la minimización de residuos, es “cualquier actividad o serie de actividades que reducen el volumen y/o la toxicidad de los residuos peligrosos sin la recuperación de material valioso”.<sup>15</sup> Los residuos peligrosos se generan de un amplio rango de actividades industriales, y pueden ser de naturaleza sólida, pastosa, líquida o gaseosa, con características corrosivas, explosivas, tóxicas que presentan riesgos potenciales para la salud humana y el ambiente<sup>16</sup>. La contaminación en minería está generada en su mayoría por los relaves, lo que ha generado gran preocupación a nivel mundial, que se ha expresado en leyes, normas y guías que ofrecen ciertos métodos para el control de estos residuos. Existe un gran número de tratamientos de relaves para su correcta disposición, la selección del método está determinada por los costos, las características del material entre otros factores; entre los métodos más comunes para el tratamiento de relaves que contribuyen a la degradación del cianuro libre se encuentra: la volatilización, oxidación, fotodescomposición, y degradación microbiana; dentro de los métodos para el tratamiento de metales pesados en relaves se encuentra la lixiviación bacteriana y la precipitación. Por otro lado la estabilización/solidificación es una técnica que ofrece la posibilidad de controlar estos contaminantes, encapsulándolos y aislándolos con algún reactivo o material aglomerante, este método puede ser aplicado a una amplia gama de residuos sólidos, dentro de los cuales se encuentran los residuos mineros.

## **2.7 PROCESOS DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN**

Este tipo de procesos tiene una gran utilidad y efectividad en el tratamiento de una amplia gama de residuos, los cuales presentan dificultades para ser

---

<sup>14</sup> DECRETO 3930 DE 2010 Usos del agua y residuos líquidos

<sup>15</sup> MÁRQUEZ R. Fernando Manejo seguro de Residuos Peligrosos, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción Concepción-Chile [en línea], [ref. 28 agosto] p. 45

<sup>16</sup> *Ibíd.*, p.1

reusados o confinados; éste proceso es comúnmente utilizado para la inmovilización de contaminantes en suelos o lodos, así como materiales con dificultades de manejo o grandes volúmenes de residuos<sup>17</sup>.

La estabilización/solidificación puede definirse como: “Los procesos de tratamientos de residuos, mediante el cual los contaminantes quedan total o parcialmente confinados por la adición de un medio o soporte aglomerante”.<sup>18</sup>

La técnica está diseñada para cumplir con algunos de los objetivos siguientes:

- Reducir la movilidad o solubilidad del contaminante, disminuyendo así su toxicidad o eliminando su lixiviación.
- Mejorar el manejo del contaminante mediante la formación de materiales sólidos sin líquidos libres para evitar su dispersión.
- Disminuir la superficie expuesta a la transferencia o pérdida de los contaminantes; con esto evitamos la contaminación de otros materiales.<sup>19</sup>

La solidificación consiste en mezclar el residuo contaminado con una sustancia, como el cemento, que provoca el endurecimiento de éste. El proceso impide que el químico se disperse en el medio ambiente circundante, y que el agua de lluvia u otras fuentes disuelvan los químicos al atravesar el residuo tratado, cabe resaltar que la solidificación no elimina los químicos nocivos, sino que los atrapa en el lugar. Por otro lado la estabilización convierte a los químicos nocivos en sustancias menos dañinas o menos móviles. Por ejemplo el material contaminado puede mezclarse con cal o cemento, y estos materiales de limpieza reaccionan con los metales para formar compuestos metálicos menos solubles, los cuales no se mueven a través de éste con tanta facilidad.<sup>20</sup>

---

<sup>17</sup> ORTIZ M, Jesús, Estudio de la estabilización solidificación de metales pesados mediante la técnica de cementación, Tesis profesional, UDLAP, México, 2004

<sup>18</sup> CRUZ G, Grisell, Solidificación de desechos Industriales mediante Cementación con Cemento Puzolánico, Tesis profesional, UDLAP, México, 2006

<sup>19</sup> ORTIZ, Op. cit., cap. 4, p. 9

<sup>20</sup> EPA; A Citizen's guide to Solidification/Stabilization, US, 2001

### **2.7.1 Aplicaciones**

Las metodologías de S/E surgieron como respuesta a la necesidad de tratar residuos radioactivos y, con el tiempo, se han utilizado para estabilizar y/o solidificar contaminantes inorgánicos, siendo las más utilizadas: (i) la solidificación con cemento; (ii) la solidificación con cal o agentes puzolánicos; (iii) la encapsulación termo- plástica; y (iv) la vitrificación<sup>21</sup>. La primera técnica es utilizada con mucha frecuencia en tres campos principales:

- Eliminación en el terreno (estabilización de residuos previa a su eliminación en vertederos de seguridad)
- Recuperación de terrenos (contaminados)
- Solidificación de residuos industriales (residuos inestables no peligrosos, lodos)

Los procesos de S/E sirven para tratar grandes extensiones de tierra contaminada tanto in situ como cuando el material es excavado y removido, y se puede aplicar exitosamente ex situ. En este tipo de tratamientos los materiales no representan costos elevados, por lo que es una opción muy competitiva en comparación con otros procesos. Los experimentos desarrollados hacia la matriz del material solidificado/estabilizado, han demostrado que mediante procesos físicos y químicos se disminuye la movilidad del contaminante.<sup>22</sup>

### **2.7.2 Cementación**

En el caso de la solidificación/ estabilización existen distintas técnicas como, vitrificación, ceramización y cementación, siendo ésta última el objetivo de este trabajo. Tal vez la única aplicación que el cemento Pórtland pueda tener en el manejo de residuos es la Estabilización / Solidificación. Esta técnica se refiere al mezclado con cemento de los residuos sólidos para inmovilizar los

---

<sup>21</sup> VOLKE, S. Tania; VELASCO, Juan A; DE LA ROSA, P. David, Suelos contaminados por metales y metaloides, Instituto Nacional de Ecología, México

<sup>22</sup> ORTIZ, Op. cit., cap. 4, p. 11

contaminantes. Cuando se mezcla el cemento Pórtland con un desecho que contiene líquidos libres, se obtiene un material con una integridad física sólida, además de que las propiedades químicas de la hidratación del cemento Pórtland son usadas para disminuir la toxicidad de algunos constituyentes tóxicos. Una vez formados los bloques de cemento conteniendo los materiales contaminantes es necesario aplicar una serie de pruebas para garantizar la exitosa aplicación de la técnica y la minimización de riesgos de lixiviación o escape de los contaminantes. En el caso del daño al medio ambiente, la lixiviación y la contaminación de aguas superficiales, trae consigo la bioacumulación del contaminante en algunas especies marinas y la muerte en otras, así como el daño en el suelo a los microorganismos nativos, afectando así todo el ecosistema del suelo.<sup>23</sup>

### **2.7.3 Materiales**

Entre los aglomerantes más utilizados se encuentra una gran variedad de combinación de productos comerciales que incluyen el cemento y aglomerantes puzolánicos como más importantes en la estabilización de residuos inorgánicos<sup>24</sup>. Este tipo de aglomerantes son efectivos para reducir la movilidad de los compuestos en residuos con una carga orgánica baja o con una contaminación mixta, sin embargo, no es efectiva para aquellos residuos de base orgánica y acuosa con altos porcentajes de compuestos orgánicos en su composición que normalmente son incinerados. Es en estos casos cuando se usan aglomerantes orgánicos, como por ejemplo materiales poliméricos del tipo poliésteres, polietileno y polibutadieno, entre otros<sup>25</sup>. Entre los aglomerantes inorgánicos más comunes se encuentran los siguientes: cemento, polvos de hornos de cal y cemento, cenizas volantes, cal, silicato de sodio, hidróxido cálcico, yeso y escorias de combustión de carbón. Estos

---

<sup>23</sup> *Ibíd.* p. 34-36

<sup>24</sup> U.S. Environmental Protection Agency: Solidification/Stabilization and its Application to Waste Materials, EPA/30/R-93/012 (1993).

<sup>25</sup> Rodríguez, J.J., Irabien, A. (1990). Los Residuos Peligrosos. Caracterización, Tratamiento y Gestión, Ed: Síntesis, Madrid, España.

aglomerantes se utilizan habitualmente para solidificar residuos de sólidos, lodos y tortas de filtración.<sup>26</sup>

### **2.7.3.1 Cemento**

Es un material pulverizado que además de óxido de calcio, contiene sílice, alúmina y óxido de hierro y que forma por adición de una cantidad apropiada de agua, una pasta conglomerada capaz de endurecer tanto en el agua como en el aire.<sup>27</sup>

La función del cemento en la estabilización de residuos peligrosos es como agente principal, el tipo mas utilizado es el cemento portland el cual se obtiene por someter a altas temperaturas la mezcla del Clinker portland pulverizado, sulfatos de calcio y otros productos siempre y cuando no se afecten sus propiedades.

### **2.7.3.2 Clasificación del cemento**

La NMX – C – 414 – ONNCCCE – 1999, clasifica los tipos de cementos de acuerdo a composición, características especiales y resistencia.

#### **2.7.3.2.1 Cemento Portland Ordinario**

El cemento portland es un conglomerante hidráulico cuya principal propiedad es la de formar masas pétreas resistentes y duraderas cuando se mezcla con áridos y agua. El endurecimiento de la mezcla ocurre transcurriendo un cierto tiempo desde el momento en que se realiza el amasado, lo que permite dar forma a la piedra artificial resultante. Estas tres cualidades (moldeable, resistente, y duradero) hacen que los productos derivados del cemento tengan una gran aplicación en la construcción de edificios y obras públicas.<sup>28</sup>

---

<sup>26</sup> U.S.EPA, Op., cit.

<sup>27</sup> NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento. Definiciones NTC 31 (1995).

<sup>28</sup> CRUZ G, Op., Cit., p 24-25

#### **2.7.3.2.2 Cemento Puzolánico**

Es idóneo para prefabricación mediante tratamientos higrotérmicos del concreto con vapor libre o con presión en autoclave. Así mismo, el cemento portland Puzolánico va particularmente bien en el caso forzado de tener que emplear en el concreto agregados reactivos como los álcalis del Cemento Portland Ordinario, en primer lugar porque la adición de puzolana reduce la proporción de Clinker portland y con ella la de los álcalis que éste aporta, en segundo, porque la propia puzolana fija álcalis y evita a atenúa la acción sobre los agregados reactivos.

Los cementos Puzolánicos son idóneos para obras en concreto en contacto con aguas agresivas de cualquier naturaleza, pero en particular en puras, carbónicas y ligeramente ácidas.

#### **2.7.3.2.3 Cemento Portland con escoria granulada de alto horno**

Es menos vulnerable a agresión química, cuanto mayor es su contenido de escoria, son los menos atacables frente a las agresiones por agua de mar o sulfatos, tiene bajo calor de hidratación. Contiene sulfuros, por la escoria, lo que da lugar a acciones corrosivas sobre armaduras, por lo tanto, es idóneo para concreto en masa o armados, que estén en ambientes agresivos.

#### **2.7.3.2.4 Cemento Portland Compuesto**

Se refiere este tipo de cemento a efectos de durabilidad, resistencia química (excepto corrosión de armaduras), calor de hidratación, retracción y fisuración o tratamientos higrotérmicos.<sup>29</sup>

#### **2.7.3.2.5 Cemento Portland con humo de sílice**

Su uso en ocasiones requiere el uso de enérgicos superfluidificantes reductores de agua en el concreto, a fin de mantener aceptablemente bajas las exigencias de agua del mismo y su retracción hidráulica de secado, esto se

---

<sup>29</sup> *Ibíd.*, p. 25-26-27-28-29

debe a que el humo de sílice es un producto que consta de partículas muy finas de sílice amorfa, con una superficie 50 veces mayor que la de un cemento portland ordinario.<sup>30</sup>

### 2.7.3.3 Ventajas y Desventajas de E/S mediante Cemento Portland

A continuación se presentan algunas de las ventajas y desventajas de los procesos de E/S mediante cemento portland:

**Tabla 1.** Ventajas y desventajas del uso del cemento Portland

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Disponibilidad del material	Sensibilidad de la calidad del producto a altas concentraciones de impurezas
Bajo costo de materiales y equipo de mezclado	
Uso de materiales naturales para la matriz de concreto	Cierta porosidad del desecho tratado
Capacidad para realizar una barrera física fuerte contra algunas adversidades	Aumento en el volumen del residuo al añadir el agente ligante
Flexibilidad para diferentes aplicaciones	Experiencia necesaria para una aplicación exitosa
Baja variabilidad en composición	
Conocimiento del comportamiento y de sus reacciones	

**Fuente:** CRUZ, Grisell, Solidificación de desechos Industriales mediante Cementación con Cemento Puzolánico, tesis

### 2.7.3.4 Fabricación de cemento Portland

Se fabrica a partir de minerales calcáreos como caliza, por alúmina y sílice, que se encuentran como arcilla en la naturaleza. En ocasiones es necesario

<sup>30</sup> *Ibíd.*, p.29

agregar otros productos para mejorar la composición química de las materias primas principales; el más común es el óxido de hierro.

Las calizas, que afortunadamente se presentan con frecuencia en la naturaleza, están compuestas en un alto porcentaje (más del 60%) de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), e impurezas tales como arcillas, sílice y dolomita, entre otras. Hay diferentes tipos de calizas y prácticamente todas pueden servir para la producción del cemento, con la condición de que no tengan cantidades muy grandes de magnesio, pues si el cemento contiene más cantidad del límite permitido, el concreto producido con él aumenta de volumen con el tiempo, generando fisuras y por lo tanto pérdidas de resistencia.

La arcilla que se emplea en la fabricación del cemento está constituida principalmente por un silicato hidratado complejo de aluminio, con porcentajes menores de hierro y otros elementos. La arcilla aporta al proceso los óxidos de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

El yeso, sulfato de calcio hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), es un producto que se agrega al final del proceso de producción, con el fin de controlar el tiempo de fraguado del cemento. El proceso de fabricación del cemento comprende las siguientes etapas principales:

- Explotación de materias primas
- Preparación, dosificación y molienda
- Homogeneización
- Clinkerización
- Enfriamiento
- Adiciones finales y molienda
- Empaque y distribución.<sup>31</sup>

---

<sup>31</sup> SANCHEZ de Guzman, Diego, Tecnología del concreto y del mortero, Facultad de ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, Bhandar Editores Ltda. Colombia 1996.

## **2.7.4 Composición y definición de términos**

En términos generales el concreto u hormigón puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (Cemento Portland Hidráulico), un material de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forman un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión.<sup>32</sup> Con el objeto de dar una idea acerca de la incidencia que tienen las características y funciones de los materiales que constituyen el concreto, dentro de la masa, a continuación se definirán algunos términos que son de uso común.

### **2.7.4.1 Pasta o pegante**

El término pasta se refiere a la mezcla de cemento, agua, aire (naturalmente atrapado o intencionalmente incluido) y aditivos (cuando son añadidos).<sup>33</sup>

### **2.7.4.2 Mortero**

Este término, que ya ha sido mencionado con anterioridad, se refiere a la mezcla de pasta y agregado fino (arena), la cual es muy utilizada en la pega de ladrillos para hacer muros de mampostería o en el recubrimiento de éstos últimos, caso en el cual se le conoce como pañete, repello o revoque.<sup>34</sup>

### **2.7.4.3 Concreto**

El mortero mezclado con agregado grueso (piedra), da como resultado al concreto u hormigón. Adicionalmente, cuando al concreto se agregan piedras de gran tamaño (piedrabola, rajón, mediazonga, etc.) cuyo diámetro es del orden 20 cm o más, se le conoce con el nombre de concreto de agregado precolocado, y más comúnmente en nuestro medio como concreto ciclópeo.<sup>35</sup>

---

<sup>32</sup> SANCHEZ. Op., cit. p.19

<sup>33</sup> *Ibíd.*, p. 22

<sup>34</sup> *Ibíd.*, p. 22

<sup>35</sup> *Ibíd.*, p. 22

## **2.7.5 Características y funciones de los componentes**

### **2.7.5.1 Cemento**

El cemento que se utiliza, como ya se mencionó, es cemento portland hidráulico, el cual tiene propiedades tanto adhesivas como cohesivas, que le dan capacidad de aglutinar los agregados o áridos para conformar el concreto o mortero. Estas propiedades dependen de su composición química, el grado de hidratación, la finura de las partículas, la velocidad de fraguado, el calor de hidratación y la resistencia mecánica que es capaz de desarrollar.<sup>36</sup>

### **2.7.5.2 Agua**

La razón de que los cementos sean hidráulicos es que éstos tienen la propiedad de fraguar y endurecer con el agua, en virtud de que experimentan una reacción química con ella, de tal manera que el agua como material dentro del concreto es el elemento que hidrata las partículas de cemento y hace que éstas desarrollen sus propiedades aglutinantes.

Al mezclarse el agua con el cemento se produce la pasta, la cual puede ser más o menos diluida, según la cantidad de agua que se agregue. Al endurecer la pasta, como consecuencia del fraguado, parte del agua queda fija (agua de hidratación) en la estructura rígida de la pasta y el resto queda como agua evaporable.<sup>37</sup>

### **2.7.5.3 Aire**

Cuando el concreto se encuentra en proceso de mezclado, es normal que quede aire incluido dentro de la masa (aire naturalmente atrapado), el cual posteriormente es liberado por los procesos de compactación a que es sometido el concreto una vez ha sido colocado. Sin embargo, como la compactación no es perfecta, queda siempre aire residual dentro de la masa

---

<sup>36</sup> *Ibíd.*, p. 22

<sup>37</sup> *Ibíd.*, p. 22-23

endurecida. Por otro parte, en algunas ocasiones se incluyen burbujas de aire, por medio de aditivos, con fines específicos, como se verá más adelante.<sup>38</sup>

#### **2.7.5.4 Funciones de la pasta de cemento**

Cuando la mezcla se encuentra en estado plástico, la pasta actúa como lubricante de los agregados, comunicando fluidez a la mezcla, lo cual permite que la colocación y consolidación del concreto sean adecuadas, ya que un alto grado de confinamiento conduce a mayor resistencia.

Cuando la mezcla se encuentra en estado sólido, la pasta de cemento obtura los espacios que hay dentro de las partículas al aglutinarse, reduciendo la permeabilidad del concreto y evitando el desplazamiento de agua dentro de la masa endurecida, lo cual es crítico en estructuras hidráulicas o en concretos que estén expuestos a la acción de aguas agresivas que eventualmente puede degradar la estructura de la masa haciéndole perder resistencia.

Adicionalmente, la pasta fraguada y endurecida en unión de los agregados contribuye a suministrar la resistencia mecánica característica a la compresión, lo cual depende la llamada interfase agregado-pasta, o agregado matriz.<sup>39</sup>

#### **2.7.5.5 Agregados o áridos**

Como agregados o áridos para concreto pueden tomarse en consideración todos aquellos materiales que, poseyendo una resistencia propia suficiente (resistencia del grano), no perturban ni afectan el proceso de endurecimiento del cemento hidráulico, es decir que son de interés y garantizan una adherencia suficiente con la pasta o cemento endurecida. Estos materiales pueden ser naturales o artificiales, dependiendo de su origen.<sup>40</sup>

---

<sup>38</sup> *Ibíd.*, p. 23

<sup>39</sup> *Ibíd.*, p. 23

<sup>40</sup> *Ibíd.*, p. 23

### **2.7.5.5 Funciones de los agregados**

La razón principal de la utilización de agregados dentro de una mezcla de concreto, es que éstos actúan como material de relleno, haciendo más económica la mezcla.

Los agregados, en combinación con la pasta fraguada, también proporcionan parte de la resistencia mecánica característica a la compresión, debido a que, como se mencionó anteriormente, éstos tienen una resistencia propia que aportan al concreto como masa endurecida.

Cuando la mezcla de concreto pasa del estado plástico al estado endurecido durante el proceso de fraguado, los agregados controlan los cambios volumétricos de la pasta, evitando que generen agrietamientos por retracción plástica que puedan afectar la resistencia del concreto.<sup>41</sup>

### **2.7.5.6 Conceptos básicos**

Como se ha visto, el concreto está compuesto principalmente de cemento, agregados y agua. Contienen asimismo alguna cantidad de aire atrapado y puede contener aire incluido intencionalmente mediante el uso de un aditivo o un cemento inclusor de aire.

Las propiedades del concreto y del mortero se estudian primordialmente con la finalidad de determinar el diseño de la mezcla, el cual se define como el proceso para seleccionar los ingredientes adecuados y determinar sus cantidades relativas, con el objeto de producir, tan económicamente como sea posible, un concreto o un mortero con un mínimo de ciertas propiedades. De tal manera que los factores básicos en el diseño de una mezcla de concreto o de mortero son los siguientes:

- Economía
- Facilidad de colocación y consolidación

---

<sup>41</sup> *Ibíd.*, p. 23

- Velocidad de fraguado
- Resistencia
- Durabilidad
- Impermeabilidad
- Peso unitario
- Estabilidad de volumen
- Apariencia adecuada.

Estas características requeridas están determinados por el uso al que estará destinado el concreto y por las condiciones esperadas en el momento de su colocación.<sup>42</sup>

---

<sup>42</sup> *Ibíd.*, p. 24

### **3 METODOLOGIA**

La historia de un material, establece sus características resultantes, por ejemplo un conjunto de factores como lo son el tipo de mineral, el tiempo de disposición, además de los procesos de beneficio y transformación aplicados, determinan las características de los desechos resultantes. Por otro lado la caracterización de un desecho ofrece información importante, para establecer su nivel de peligro, y determinar los parámetros más importantes para llevar a cabo efectivamente una técnica de inertización del mismo. En este proyecto se realizó la identificación de los más importantes aspectos técnicos y ambientales de la mina “La plata” y de los relaves que se encuentran dispuestos en tanques de cianuración, a lo largo de la quebrada la baja, además se realizó la caracterización fisicoquímica de los mismos y la propuesta de inertización a través de la técnica de estabilización/solidificación con cemento Portland.

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DE ANTECEDENTES DE LA MINA “LA PLATA”**

La primera visita, se realizó con el fin de identificar la geomorfología, hidrología y características de suelos en la mina “La Plata”, estableciendo una línea base ambiental, donde se describe la afectación que ha generado la incorrecta disposición de los relaves. Además se realizó la revisión de todas las etapas de beneficio y transformación de minerales, identificando con esto además los posibles contaminantes que pueden presentar los relaves del proceso, y cuál fue la disposición de estos residuos mientras estuvo en funcionamiento la mina, análogamente se identificó cuáles fueron los impactos ambientales más destacados y se elaboró el flujograma de procesos metalúrgicos.

#### **3.2 DESCRIPCIÓN DE RELAVES**

La segunda visita, se efectuó con el fin de identificar y describir el material de interés en este proyecto (Relaves), y la infraestructura donde se encuentran

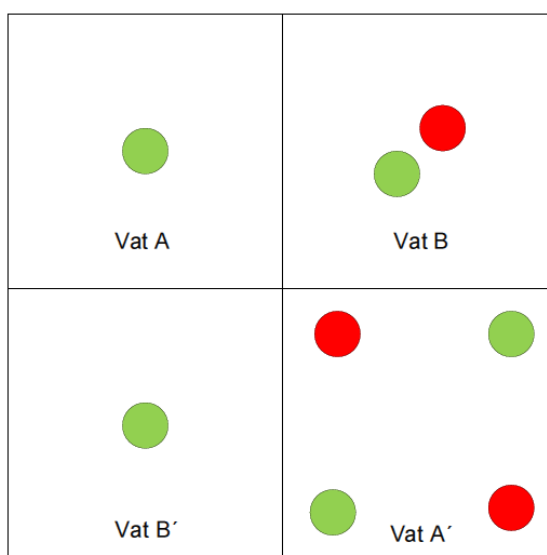
dispuestos, determinando así un volumen estimado de material y el posible peligro que representa tener este residuo dispuesto en dicho sitio.

### 3.3 MUESTREO DE RELAVES

Para llevar a cabo este procedimiento, se conto en todo momento con los elementos de protección personal como lo son los guantes y el tapabocas, sin embargo en el momento de realizar el muestreo se usaron las botas de seguridad y el casco, debido al deterioro de la infraestructura donde se encuentra dispuesto el material.

El método a seguir para la toma de muestras de relaves estuvo basado en la norma ASTM 6069, la cual plantea un análisis de puntos estratégicos distribuidos en el volumen total del residuo, con el fin de poder asegurar la representatividad de las muestras. Las muestras tomadas se enviaron a SGS Colombia S.A, los cuales se encargaron de realizar los ensayos fisicoquímicos que se describen más adelante. Para esta labor se tomaron muestras de los diferentes Tanques de Cianuración (Vats), como se observa a continuación:

**Figura 2.** Puntos de muestreo



La figura 2, es una ilustración de la vista superior de la infraestructura donde se encuentra dispuesto el material de interés, en esta imagen se observan puntos

de color rojo que indican que la muestra fue tomada del fondo del Tanque , y los puntos de color verde indican, que las muestras fueron tomadas cerca de la superficie. La muestra denominada “A”, fue obtenida de los vats designados como A y A´ y la muestra “B” de los Vats designados como B y B´. A continuación se muestra una tabla donde se indica la cantidad de material que se debe tomar en cada tanque.

**Tabla 2.** Pesos de muestras para análisis.

Peso	Muestra A		Muestra B	
	A	A´	B	B´
Tomado del Vat	1 kg	8 kg	8 kg	1 kg
Total después de Homogeneización	9 kg		9 kg	
Bolsa	Muestra A	Testigo A	Muestra B	Testigo B
Requerido para ensayos	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg

Con el fin de asegurar la representatividad de las muestras se realizó la homogeneización y el procedimiento de cono y cuarteo, donde se tomaron 2 kg, para cada muestra como se enuncia en la tabla 2; a continuación se describe el procedimiento realizado.

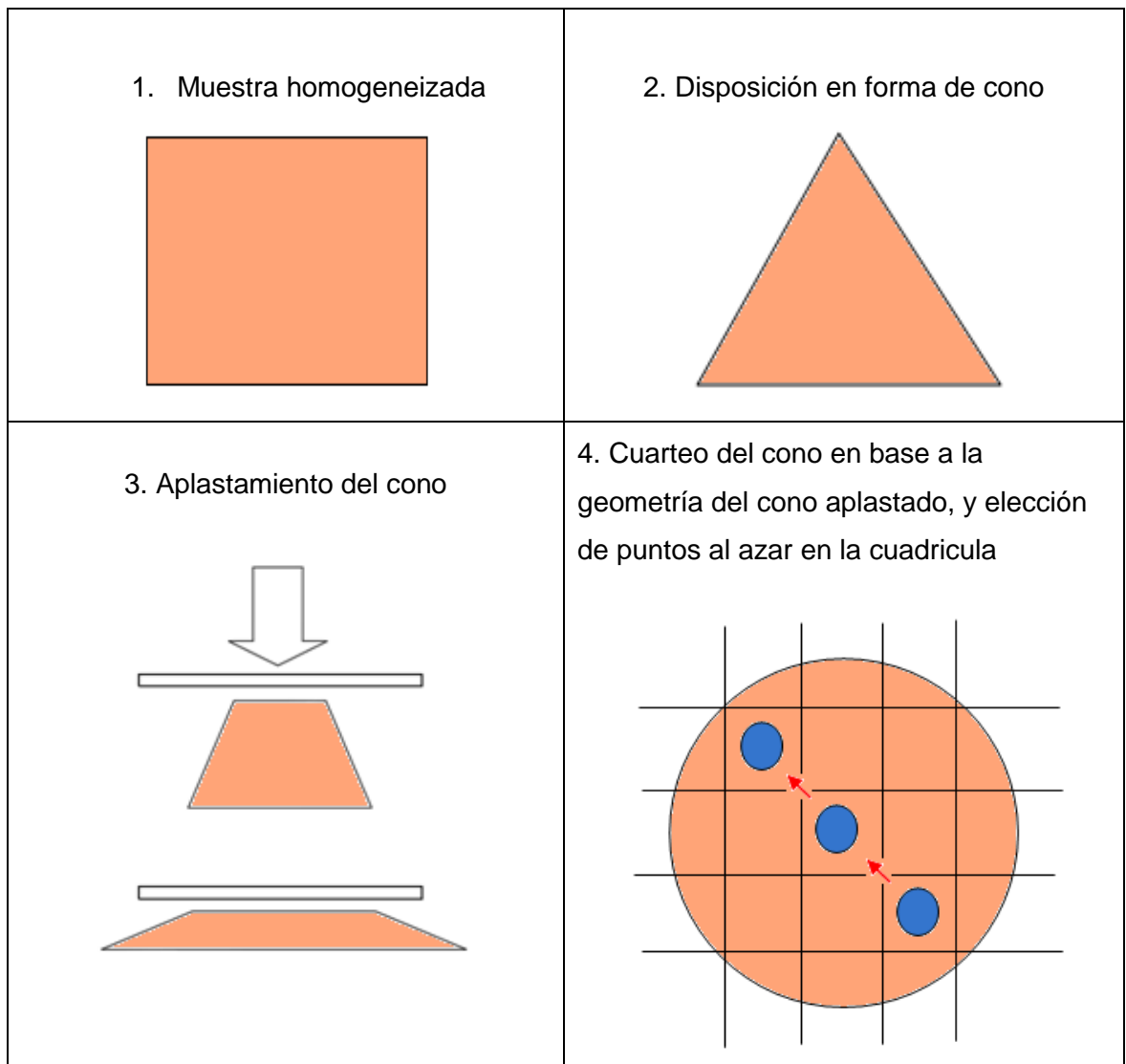
### 3.3.1 Homogeneización de material

El peso tomado de los diferentes tanques sumó 9 kg que fueron utilizados para tomar la muestra A y su testigo, y 9 que fueron usados para tomar la muestra B y su testigo, como se observa en la tabla 4. Con la ayuda de un palustre cada parte fue dispuesta en un plástico y homogeneizada cuidadosamente, lejos de la luz del sol, utilizando los elementos de protección personal tales como: guantes y tapabocas.

### 3.3.2 Cono y cuarteo

Después de homogeneizado el material, este se apiló en forma de cono, luego fue aplastado, cuarteado y se tomaron muestras al azar, las cuales se empacaron en bolsas plásticas, que fueron selladas y etiquetas. A continuación en la figura 3 se observa el procedimiento de cono y cuarteo del material, de acuerdo a lo sugerido por Volke, Velasco y De la rosa, para “muestreo de suelos contaminados”<sup>43</sup>.

**Figura 3.** Esquema de procedimiento de cono y cuarteo



<sup>43</sup> VOLKE, Op. cit., cap. 3, p. 56

Las muestras fueron enviadas al laboratorio de SGS Colombia S.A, considerando los siguientes elementos: neveras plásticas o de icopor necesarias para el almacenamiento de las muestras, bolsas de gel refrigerante de 300 g congeladas, para un total del 10 a 20% del volumen de la nevera que contiene las muestras, y el material de embalaje necesario para evitar el impacto.

### **3.4 ENSAYOS FISICOQUÍMICOS**

Los ensayos aplicados a la muestra de relaves que se muestran a continuación, principalmente tenían como fin determinar las características que establecen el peligro que representa un residuo de este tipo, para el medio ambiente y la salud humana, si fuera dispuesto en un suelo o río sin tratamientos de neutralización.

#### **3.4.1 Densidad Real (gr/cm<sup>3</sup>)**

Es una magnitud que se aplica en materiales porosos, donde se puede determinar el peso unitario de los relaves, y el volumen ocupado, excluyendo el espacio ocupado por los poros, factor que tiene efecto sobre la concentración de metal en sólido y las propiedades estructurales.

#### **3.4.2 Humedad (%)**

Este ensayo sirve para determinar el porcentaje de humedad que presenta una muestra de relaves, factor de vital importancia para determinar si el material puede presentar infiltraciones de soluciones a suelos, y además representa un índice porcentual para los requisitos de agua en determinado tratamiento de inertización.

#### **3.4.3 Granulometría**

La granulometría de los relaves está determinada por el proceso de beneficio del mineral explotado, este ensayo tiene como fin identificar la distribución por tamaño de las partículas presentes en los Relaves, la presencia predominante

de arenas o de lamas, además de estimar los beneficios que este factor, conlleva a la recuperación de metales por medio de soluciones o a la aplicación de determinada técnica de inertización.

#### **3.4.4 Cianuro WAD**

Los cianuros disociables en soluciones ligeramente ácidas, son especies de importancia ambiental, debido a que bajo condiciones moderadas de pH este tipo de complejos, pueden disociarse produciendo concentraciones significativas de HCN y CN<sup>-</sup> acuosos, sustancias tóxicas, que pueden afectar la salud humana y la biodiversidad.

#### **3.4.5 Test ABA**

Para determinar cualitativamente si la muestra de relaves estudiada presenta un potencial de generación de ácido, se aplicó el test ABA (Acid-Base-Account), el cual se basa en un balance entre los componentes de la muestra potencialmente generadores del ácido (Potencial de Acidificación, PA) y los componentes neutralizantes de ácidos (Potencial de Neutralización, PN).

#### **3.4.6 Test ICP**

Espectroscopía de Emisión con un sistema ICP (Inductive Coupled Plasma), es una importante técnica analítica de posibles sustancias contaminantes, que proporciona un completo análisis elemental para un amplio rango de muestras. A través de esta prueba se logró determinar en la muestra de relaves la concentración de los siguientes elementos: Ag, Au, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Ti, U, V, Zn y Hg.

#### **3.4.7 Test SPLP**

El test SPLP (Lixiviación por precipitación sintética), fue diseñado para estimar el grado de lixiviación tanto de analitos orgánicos, como inorgánicos presentes en líquidos, suelos y residuos. En la muestra de relaves estudiada se analizó

entonces la movilidad de los siguientes elementos: Ag, Au, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Ti, U, V, Zn y Hg.

### **3.5 TRATAMIENTO DE INERTIZACION**

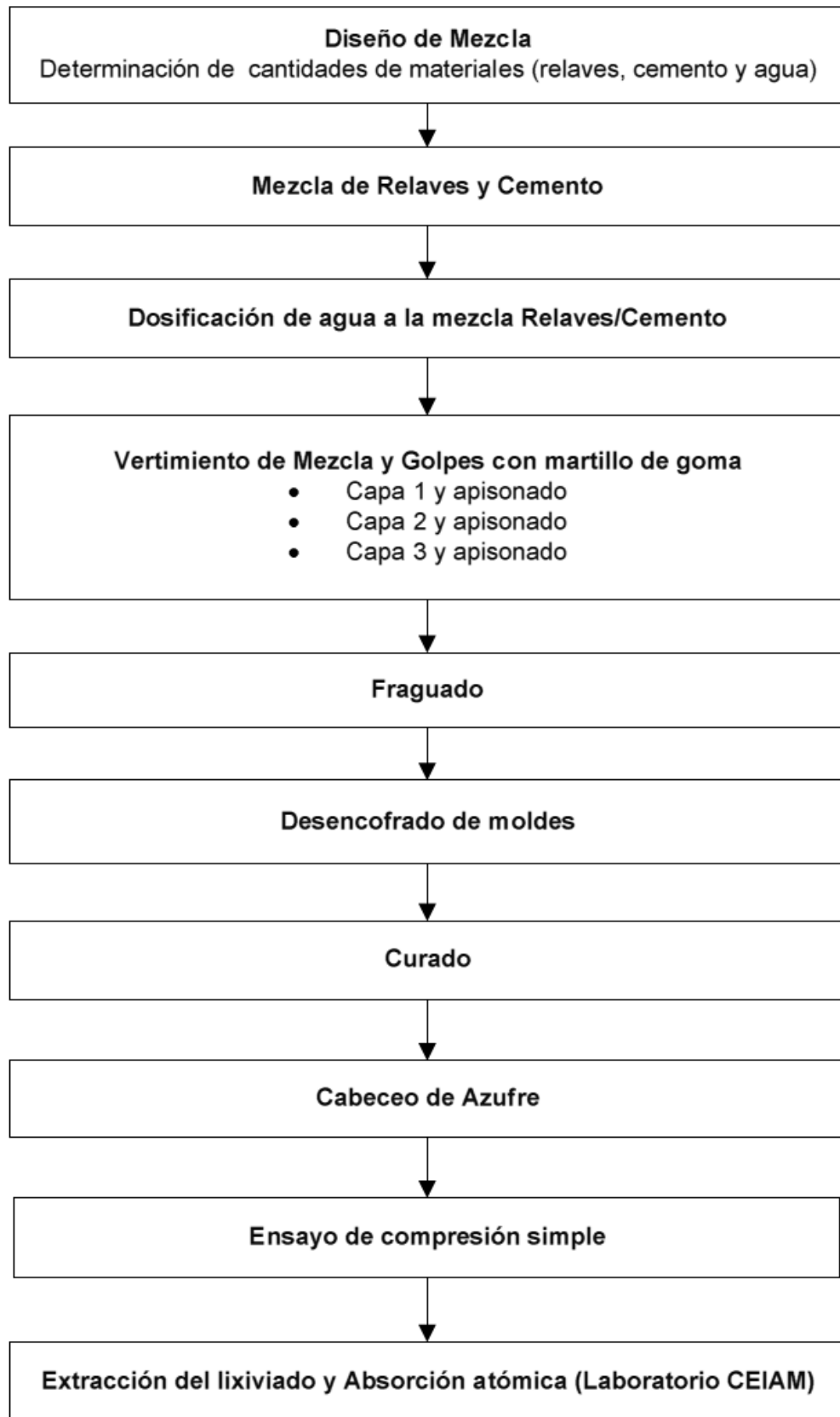
Existen diversas técnicas para el tratamiento de relaves, con el fin de modificar las propiedades físicas o químicas, reducir el volumen, inmovilizar los componentes tóxicos o eliminarlos. Escoger una técnica de tratamiento no es fácil y se deben considerar ciertos factores como lo son: característica del residuo, consideraciones económicas, ambientales, energéticas, de operaciones y de mantención, además de la disponibilidad de materiales e infraestructura, facilidad y flexibilidad de aplicación, entre otros.

Por medio de una revisión bibliográfica de métodos de inertización este trabajo pretende ofrecer una metodología práctica de inertización de los relaves de la mina “La Plata”, por lo cual la técnica de Estabilización/Solidificación con cemento Portland ordinario, ha sido la técnica mas viable, debido a la facilidad y flexibilidad de aplicación, además de los bajos costos de los materiales y equipos para llevar a cabo este proceso que consiste en la obtención de un mortero, a partir de la mezcla de relaves con cemento y agua, para lo cual se fijo y describió cada etapa del diseño de mezcla, adecuando este, al material utilizado como agregado fino los relaves de la mina “La Plata”. A continuación se muestra el procedimiento seguido en la elaboración de las probetas de mortero y los ensayos aplicados a este material.

#### **3.5.1 ELABORACIÓN DE PROBETAS Y ENSAYOS**

A continuación en la figura 4, se muestra el flujograma del procedimiento que fue seguido para la elaboración de las probetas, el ensayo de compresión y análisis químico. En el anexo A se puede observar la explicación detallada de cada etapa.

**Figura 4.** Flujograma elaboración de probetas y ensayos



## **4 RESULTADOS**

### **4.1 DESCRIPCIÓN DE ASPECTOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES.**

La Mina de Oro “La Plata” se encuentra ubicada en el Municipio de California, Santander a lo largo de la quebrada La Baja, a la altura de los drenajes denominados “La Higuera”, y “La Plata”, con un área de explotación aproximada de 321,91 m<sup>2</sup>, la mina está ubicada a una altura promedio de 2250 metros sobre el nivel del mar, en coordenadas Este 1°126,894, Norte 1°305,697, y presenta una temperatura cercana a los 18 °C. En este lugar se realizaba explotación minera a pequeña escala de minerales como el Oro y Plata, mediante labores de minería subterránea o de socavón y de recuperación de Oro y Plata mediante la técnica de Cianuro y Amalgamación.

#### **4.1.1 Geomorfología**

La Zona presenta alturas que varían entre 2100 y 2550 m.s.n.m. Los sectores donde se llevan a cabo las labores presentan una topografía abrupta (terreno difícil de atravesar, con gran cantidad de rocas y pendientes muy pronunciadas), laderas de fuerte pendiente, que convergen en el estrecho cauce de la quebrada La Baja, la cual presenta fuertes cambios geomorfológicos, que han llevado a la formación de pequeños depósitos aluviales en su fondo. Debido a las inadecuadas prácticas de disposición de residuos, se presentan depósitos antrópicos con desechos tales como: relaves, estériles y otros (ver figura 5 (a) y (b))

#### **4.1.2 Suelos**

Se presentan suelos con escaso desarrollo, los cuales son ricos en cuarzo y de poco espesor, lo cual hace que no cuenten con mucha potencia, el suelo está constituido básicamente por material de tamaño entre arena y limo grueso con poca presencia de material arcilloso. Casi en la totalidad del área hay preservación de la biodiversidad y no se observan fenómenos de erosión

generales, a excepción de los sitios donde se encuentran dispuestos los residuos mineros, y las bocaminas.

**Figura 5.** Depósitos antrópicos



#### 4.1.3 Hidrología

La corriente principal es la quebrada La Baja, la cual presenta un gradiente aproximado de 12%, y un caudal de 1000 a 1200 L/s, esta corriente cuenta con algunos drenajes de menor importancia como lo son: cañada Zeppelin, quebrada “La Plata”, quebrada “La Higuera” y quebrada “Chorrerón”. Debido a las elevadas pendientes de las laderas y a la juventud de las quebradas, estas corrientes presentan estrechos cauces.

A lo largo de la quebrada “La Baja”, se encuentra ubicada la infraestructura para el procesamiento de minerales (ver figura 6 (a) y (b)), la cual requería de grandes cantidades de agua, que era suministrada por esta quebrada, y aprovechada de dos formas, como energía hidráulica para poner en funcionamiento el molino de piones y como solución requerida para lavado, lixiviación y demás etapas del proceso; con lo cual se consumían aproximadamente 40 L/s durante un tiempo de 8 a 12 horas diarias con el molino de piones y 1 ½ horas diarias para el bombeo de soluciones.

Cabe resaltar que esta quebrada no proporciona agua para el consumo humano; para este fin los habitantes de la zona utilizan la corriente de la quebrada “La Plata” aguas arriba de la mina.

**Figura 6.** Infraestructura Mina La Plata

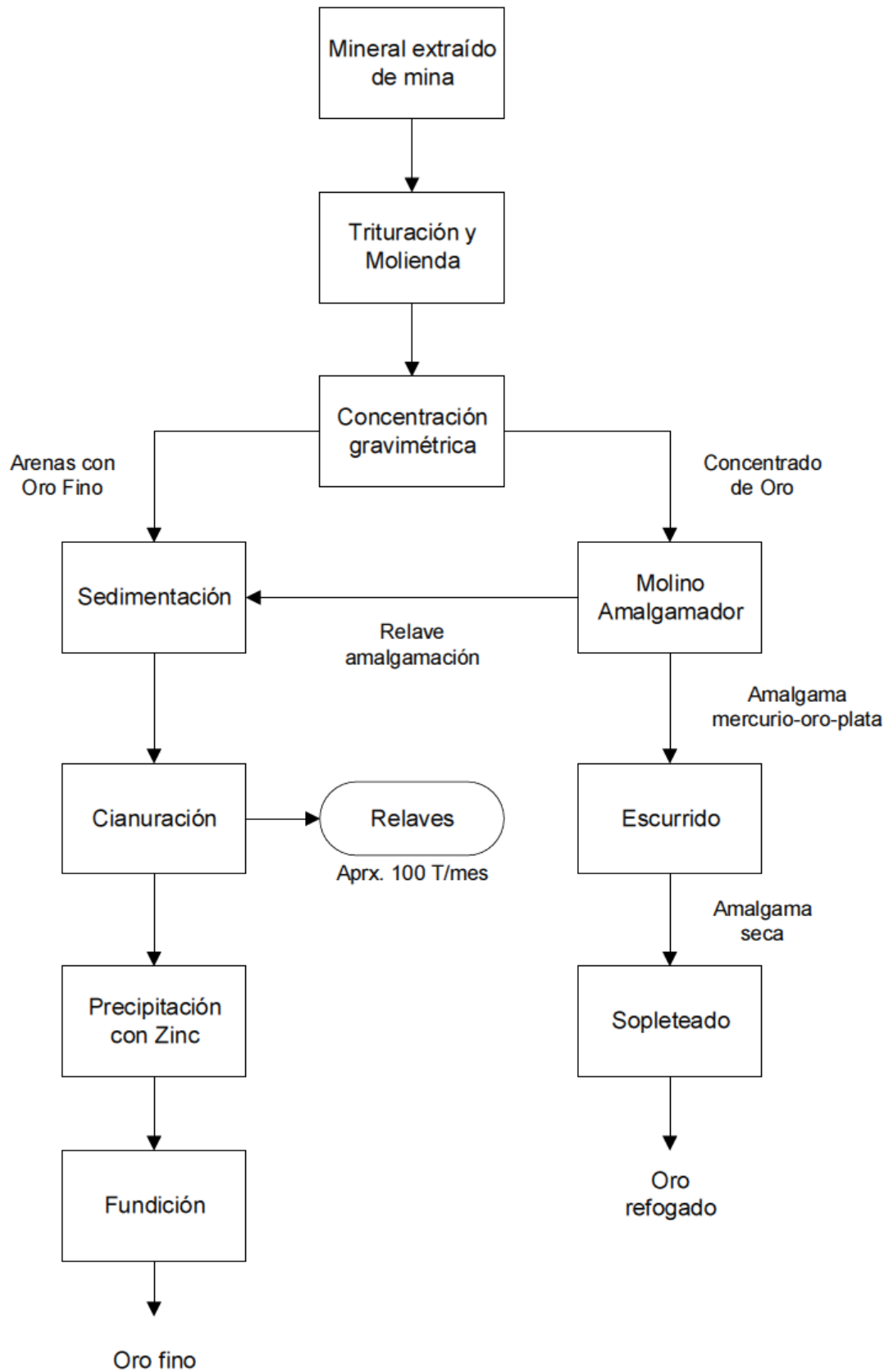


#### **4.1.4 Proceso de Explotación Mina “La Plata”**

El proyecto consistía en la realización de labores de desarrollo, preparación y explotación de la mina y el beneficio de minerales de oro y plata, lo cual requería realizar actividades de extracción de la roca, en el frente de explotación, cargue, transporte interno de roca hasta la bocamina, cargue y transporte externo hasta la planta de beneficio, molienda de la roca y separación del oro por medios físicos y químicos, paralelamente se realizaban actividades de mantenimiento, seguridad y suministros tales como: entibado de galerías inestables, ventilación, iluminación, drenaje de la mina y disposición de subproductos.

A continuación se muestra el flujograma con cada etapa del proceso que fue utilizado en la Mina “La Plata”, para la recuperación de oro.

Figura 7: Flujograma del proceso mina "la plata"



#### 4.1.4.1 Arranque

El filón explotado consistía básicamente de una composición silíceo con sulfuros de hierro (pirita), encajada en rocas de cuarzo; para el arranque se realizaban perforaciones con la ayuda de un martillo neumático acoplado a un compresor de 36 Hp, luego se introducía el explosivo (Gel 1.1), fabricado por Indumil, el cual se preparaba cortando los tacos, amarrándolos e introduciéndolos con la mecha y el fulminante. Esta operación se realizaba al final de la jornada laboral para en la noche facilitar la salida de polvo y gases (NO y NO<sub>2</sub>) producidos por la voladura; el material fragmentado era cargado con palas y dispuesto en vagonetas para sacarlo del socavón, cuando el mineral se encontraba en la bocamina era transportado hacia la planta de beneficio mediante un teleférico (vía aérea), (ver figura 8 (a) y (b)), la ventilación de la mina se hacía mediante un tajo natural, el drenaje del agua de mina por gravedad, la iluminación con lámparas colgadas, y el sostenimiento del túnel con madera.

**Figura 8.** Sistema de teleférico



#### 4.1.4.2 Trituración y Molienda

La molienda del mineral se realizaba en menor proporción con molinos de arrastre y principalmente mediante un molino californiano de 4 pisonos de acero (ver figura 9 (a)), que tenía una fuerza motriz de 6 kw suministrada por la

corriente de la quebrada “La Baja”, de la cual se utilizaban aproximadamente 50 L/s que movían la rueda Pelton (ver figura 9 (b)), que ponía en funcionamiento los pisones o martillos californianos que trituraban y molían el mineral húmedo. El tamaño de grano en la alimentación era de aproximadamente 100 mm, y se le realizaba un alto grado de trituración, para obtener un grano final menor a 2 mm, posteriormente este material húmedo pasaba a los tanques sedimentadores.

**Figura 9.** Sistema de Molienda



#### 4.1.4.3 Gravimetría y Amalgamación

El mineral molido era alimentado al concentrador (ver figura 10), del cual se obtenían dos productos, un concentrado de oro y un relave de gravimetría con contenidos de oro fino, que no es recuperable por este método, el concentrado de alta ley en oro se mezclaba con mercurio líquido en un molino amalgamador, después de un tiempo de mezcla se separa la amalgama de mercurio-oro-plata y se exprimía con una tela fina, quedando la amalgama sólida que era sopleteada, liberando el mercurio al ambiente, y obteniéndose finalmente el oro refogado. Por otro lado las colas de beneficio gravimétrico eran dispuestas en los tanques sedimentadores para posteriormente realizar la lixiviación con cianuro.

#### 4.1.4.4 Cianuración y Precipitación

La lixiviación por percolación del mineral molido, se iniciaba con el lavado del mineral en los diques para sedimentación de lodos y finos, debido a esto el material de esta etapa se volvía más permeable lo que facilitaba la recuperación de metal en los vats de cianuración, que se encuentran ubicados espacialmente por debajo de los diques de sedimentación y por encima de las cajas de precipitación. El mineral era percolado en grandes recipientes de concreto, durante 24 días con cianuro de sodio, mezclado con agua, en concentraciones de 0.1 a 0.5 kg/t, de esta etapa se obtenía una solución rica en oro que pasaba a las cajas de precipitación con zinc, donde el oro y la plata eran precipitados lentamente en cajas de zinc, posteriormente de 10 a 15 kg de precipitado eran secados y llevados a fundición, donde el zinc era oxidado y expulsado al ambiente en forma de gases o vapores. El mineral alimentado a cianuración, podía contener impurezas consumidoras de cianuro que no beneficiaban al proceso, dentro de estos contaminantes se encontraba el arsénico, antimonio, manganeso, y óxidos de cobre, altamente consumidores, que generan pérdidas de oro, sin embargo el proceso presentaba recuperaciones cercanas al 70 %

**Figura 10.** Mesa vibratoria Wilfley deteriorada



#### **4.1.4.5 Disposición de relaves**

En la Mina La Plata no se contó con un sistema de tratamiento de inertización de relaves, o un sitio de disposición que contara con las condiciones necesarias para mitigar el impacto ambiental que producen, por el contrario estos eran dispuestos en suelos a orilla de la quebrada “La Baja”, para que con el tiempo fueran arrastrados por la corriente y por la acción de la lluvia, generando con esto flujos tóxicos y contaminación en el cauce; además de la contaminación por el arrastre de partículas de polvo, debido a la acumulación de estas arenas al aire libre, no obstante aun existe una cantidad representativa de estos residuos los cuales son de interés en este trabajo.

#### **4.1.4.6 Impactos ambientales**

Dentro de los mayores impactos ambientales se encuentran, la contaminación a la quebrada “La Baja” por la descarga de residuos impregnados de elementos como Fe, Cu, Al y Zn, propios de la mena que son incorporados hasta el final del proceso, y elementos tóxicos de la transformación como cianuro, mercurio y zinc.

En análisis fisicoquímicos realizados a la quebrada “La Baja” por parte de la CDMB<sup>44</sup>, se determinó que aguas abajo el cauce presenta condiciones desfavorables debido a la presencia de reactivos como cianuro, mercurio y cobre, en concentraciones de 0.368 mg/L, 8.76 mg/L, y 2.1mg/L respectivamente, las cuales exceden los límites permisibles para vertimientos, uso agrícola y/o pecuario, y con mayor razón para consumo humano, además se pudo destacar el alto valor de sólidos aguas abajo, reflejado en la turbidez del agua.

La afectación sobre el paisaje y suelo es poca, debido a que en la mina se realizaban labores de tipo subterráneo, sin embargo se presenta contaminación debido al montaje de la infraestructura para los procesos a lo largo de la quebrada “La Baja”, y a la disposición desordenada de materiales sobrantes

---

<sup>44</sup> Archivo Eco Oro Minerals Corp. Expediente La- 0090-1998, Sociedad Minera La Plata, título 13921

como rocas, chatarra en general y relaves que liberaran material particulado por acción del aire. Por otro lado se destaca la contaminación por gases y material particulado que se producía por las voladuras dentro de las galerías, además del drenaje ácido de las mismas.

## **4.2 DESCRIPCION DE RELAVES**

La infraestructura de cianuración de la mina “La Plata”, está ubicada aproximadamente a cuatro metros de la quebrada “La Baja”, y está compuesta básicamente de cuatro tanques de concreto con falso fondo en filtro de paño y madera, por donde la solución rica en oro va saliendo poco a poco en el proceso de lixiviación, cada tanque tiene una capacidad aproximada de 16 m<sup>3</sup> y dos de ellos contienen una cantidad representativa de relaves.

Al examinar este material se pudo observar que presenta un aspecto seco en la superficie, debido a varios meses de inactividad en la mina, ya que esta debió parar actividades en el año 2010, sin embargo al inspeccionar gradualmente el material más a fondo se observó el incremento de la humedad y compactación del mismo, por otro lado se destaca la presencia de residuos sólidos en la superficie como restos de herramienta, costales, hojas, entre otros. La presencia de los relaves en estos tanques cercanos a la quebrada representa un gran riesgo ambiental, ya que se pueden presentar infiltraciones de solución a suelos y ríos. Otro riesgo sería una creciente de la quebrada lo cual podría implicar el arrastre de la infraestructura con el material contenido, lo que generaría una contaminación a este cauce.

### **4.2.1 Hallazgos**

A continuación en la figura 11, se muestra el registro fotográfico y la descripción de los relaves de la mina “La Plata” que se encuentran dispuestos en la infraestructura de cianuración por percolación.

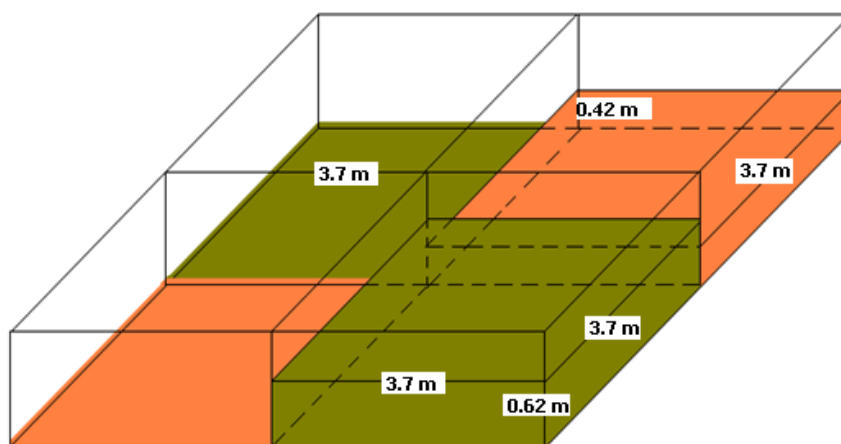
**Figura 11. Hallazgos de relaves**

Registro Fotográfico	Descripción
 <p>(a)</p>	<p>Infraestructura de cianuración cercana a la quebrada La Baja, lugar donde se encuentran dispuestos los relaves, protegidos del sol y la lluvia por un techo metálico.</p>
 <p>(b)</p>	<p>La imagen muestra el tanque designado como Vat A, el cual no contiene una cantidad representativa de relaves, se estima un contenido en total en volumen de 1 cm<sup>3</sup>, en esta figura se puede observar el falso fondo de madera que constituye el piso de cada tanque y los residuos sólidos presentes en los mismos.</p>
 <p>(c)</p>	<p>En la fotografía se observa el tanque designado como Vat B, el cual contiene una cantidad representativa de relaves, se estima un volumen total aproximado de 5.74 m<sup>3</sup>, en esta imagen es posible observar el aspecto seco en la superficie del material.</p>

 <p style="text-align: center;">(d)</p>	<p>La imagen muestra el tanque designado como B', el cual contiene residuos sólidos, y una cantidad poco representativa de relaves, se estima aproximadamente un volumen total de 1 m<sup>3</sup></p>
 <p style="text-align: center;">(e)</p>	<p>En la fotografía se observa el tanque designado como Vat A', el cual contiene una cantidad representativa de relaves, aproximadamente un volumen de 8.49 m<sup>3</sup>.</p>

La siguiente imagen es una ilustración de la infraestructura de cianuración de la mina "La plata", con el contenido de relaves total, que se estima es aproximadamente 14.43 m<sup>3</sup> en volumen.

**Figura 12.** Esquema del volumen total de relaves



### 4.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS FISICOQUÍMICOS

A continuación se analizaron los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica mediante Densidad, Humedad, Granulometría, Cianuro WAD, Test ABA, Test ICP y Test SPLP a dos muestras (Muestra A y Muestra B), provenientes de los relaves dispuestos en la Mina “La Plata” California, Santander, a fin de identificar si la muestra tiene características de peligrosidad por toxicidad, esta caracterización fue realizada por la compañía SGS Colombia S.A. a petición del Departamento de Metalurgia & Procesos de Eco Oro Minerals Corporation.

#### 4.3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

En la tabla 3 se muestra la identificación de las muestras analizadas

**Tabla 3.** Identificación de las Muestras

<b>Nº MUESTRA</b>	<b>IDENTIFICACION DE LAS MUESTRAS DE LA MINA LA PLATA</b>
<b>1</b>	<b>MUESTRA A</b>
<b>2</b>	<b>MUESTRA B</b>

Los parámetros para comparación de los resultados se realizaron con base en la normatividad vigente para el uso del agua en el país, contemplada en el Decreto 1594 de 1984, y el Decreto 3930 de 2010, este último no establece todavía cuales son los criterios, los parámetros y los valores para el uso y vertimiento que se le dé a las aguas, motivo por el cual se adoptan los niveles previstos para cada parámetro según el primer Decreto.

### 4.3.2 DECRETO 1594 DE 1984

A continuación se muestran los diferentes criterios de evaluación para las sustancias de interés sanitario contempladas en el decreto 3930 de 2010, soportado en el 1594 de 1984.

#### 4.3.2.1 Criterios de calidad admisibles

**Artículo 38:** Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso humano y domestico son los que se relacionan en la tabla 4.

**Tabla 4.** Límites máximos admisibles recurso humano y domestico.

Referencia	Expresado como	Valor mg/L
Arsénico	As	0,05
Bario	Ba	1,0
Cadmio	Cd	0,01
Cianuro	CN-	0,2
Cinc	Zn	15,0
Cobre	Cu	1,0
Cromo	Cr +6	0,05
Mercurio	Hg	0,002
Plata	Ag	0,05
Plomo	Pb	0,05
Selenio	Se	0,01

**Fuente:** Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, DECRETO 3930 DE 2010, Republica de Colombia.

**Artículo 40:** Los criterios admisibles para la destinación del recurso para uso agrícola son los que se relacionan en la tabla 5.

**Tabla 5.** Límites máximos admisibles uso agrícola.

Referencia	Expresado como	Valor mg/L
Aluminio	Al	5,0
Arsénico	As	0,1
Berilio	Be	0,1
Boro	B	( De 0,3 a 4,0 )
Cadmio	Cd	0,01
Cinc	Zn	2,0
Cobalto	Co	0,05
Cobre	Cu	0,2
Cromo	Cr+6	0,1
Hierro	Fe	5,0
Litio	Li	2,5
Manganeso	Mn	0,2
Molibdeno	Mo	0,01
Níquel	Ni	0,2
Plomo	Pb	5,0
Selenio	Se	0,02
Vanadio	V	0,1

**Fuente:** Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, DECRETO 3930 DE 2010, Republica de Colombia

**Artículo 41:** Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para uso pecuario, son los que se mencionan en la tabla 6.

**Tabla 6.** Límites máximos admisibles uso pecuario.

Referencia	Expresado como	Valor mg/L
Aluminio	Al	5,0
Arsénico	As	0,2
Boro	B	5,0
Cadmio	Cd	0,05
Cinc	Zn	25,0
Cobre	Cu	0,5
Cromo	Cr+6	1,0
Mercurio	Hg	0,01
Plomo	Pb	0,1

**Fuente:** Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, DECRETO 3930 DE 2010, Republica de Colombia

#### 4.3.2.2 Criterios de Vertimiento

**Artículo 74:** Las concentraciones para el control de la carga de las siguientes sustancias de interés sanitario se muestran en la tabla 7.

**Tabla 7.** Límites permisibles de sustancias en vertimientos

Sustancia	Expresada como	Concentración mg/L
Arsénico	As	0.5
Bario	Ba	5.0
Cadmio	Cd	0.1
Cobre	Cu	3.0
Cromo	Cr+6	0.5
Mercurio	Hg	0.02
Níquel	Ni	2.0
Plata	Ag	0.5
Plomo	Pb	0.5
Selenio	Se	0.5
Cianuro	CN-	1.0

**Fuente:** Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, DECRETO 3930 DE 2010, Republica de Colombia

**Parágrafo:** cuando los usuarios, aun cumpliendo con las normas de vertimiento, produzcan concentraciones en el cuerpo receptor que excedan los criterios de calidad para el uso o usos asignados al recurso, el Ministerio de Salud o las EMAR podrán exigirles valores más restrictivos en el vertimiento

#### 4.3.3 ENSAYO CIANURO WAD

Los Resultados obtenido de la evaluación de las especies de cianuro disociables en soluciones ligeramente ácidas, realizado a la muestra de Relaves A y B, a través del Test Cianuro WAD se muestran en la tabla 8 y son relacionados con los valores para límites permisibles en la tabla 7 y 4.

**Tabla 8.** Resultados Ensayo Cianuro Wad.

ANALISIS	UNIDADES	IDENTIFICACION DE LA MUESTRA		NORMA
		MINA LA PLATA MUESTRA A	MINA LA PLATA MUESTRA B	
CN WAD	%	0,01	0,03	S.M. 4500-CN C, E, I

El porcentaje de Cianuro que revelan los análisis para la Muestra A y la Muestra B, es 100 ppm = 100mg/L y 300 ppm = 300mg/L respectivamente, lo que indica que el comportamiento en este parámetro, excede los límites admisibles por la legislación colombiana para la destinación del recurso para recurso humano y doméstico ( $CN^- < 0,2 \text{ mg/L}$ ), y vertimientos ( $CN^- < 1,0 \text{ mg/L}$ ), contemplados en las tablas 4 y 7 respectivamente, por lo cual se establece un grado alto de toxicidad de las muestras de relaves A y B que hacen necesario un tratamiento para la inertización de este contaminante.

#### 4.3.4 TEST ABA (EPA ABA Modificado/Sobeck y Lawrence)

Los Resultados obtenidos de la evaluación del potencial de Generación Ácida, realizado a la muestra de Relaves A y B, a través del test ABA se muestran en la Tabla 10, estos valores son relacionados con el criterio establecido por el área de consultoría CIMM T & S S.A., en la tabla 9, con el fin de determinar el potencial de generación ácida representado por la muestra.

**Tabla 9.** Criterios para definición de Potencial.

Potencial Representado	Criterio de Interpretación
Bajo o Nulo Potencial de Generación de Ácido	$NPN_{\text{Neto}} > 20$ y $NP/AP > 3$
Potencial Marginal de Generación de Ácido	$NPN_{\text{Neto}} < 20$ y $1 < NP/AP < 3$
Alto Potencial de Generación de Ácido	$NPN_{\text{Neto}} < 0$ y $NP/AP < 1$

Fuente: CIMM T & S S.A., Área Consultoría Ambiental, Resultados de Test Ambientales

**Tabla 10.** Resultados Test ABA

ANALISIS	UNIDADES	IDENTIFICACION DE LA MUESTRA		METODO DE REFERENCIA
		Mina la Plata Muestra A	Mina la Plata Muestra B	
pH de Pasta	Unidades	8.23	8.20	EPA 600 / 2-78-054
Tasa de burbujeo	---	2	2	Acid Mine Drainage Prediction Manual
Peso Muestra	G	1.99	2.04	Gravimetría
HCl adicionado	mL	20.00	20.00	Volumetría
HCl	Normalidad	0.10	0.10	Volumetría
NaOH	Normalidad	0.10	0.10	Volumetría
NaOH a	pH=8.3 mL	13.57	15.22	Volumetría
pH Final	Unidades	1.72	1.51	Potenciométrico
NP	t CaCO3/1000 t	16.2	11.7	Acid Mine Drainage Prediction Manual
AP	t CaCO3/1000 t	133	120	
NP Neto	t CaCO3/1000 t	-116	-108	
NP/AP	Radio	0.12	0.10	
Azufre total	%	5.01	4.80	ASTM E1918-01 British Columbia Guidelines and Recommended Methods for the Prediction of Metal Leaching and Acid Rock Drainage
Acido lixiviable (SO4-S)	%	0.76	0.96	
Sulfuro-S	%	4.25	3.84	
Carbono total	%	0.240	0.223	
Carbonato (CO3)	%	0.049	0.023	

NP – Potencial de neutralización, AP – Potencial Ácido, T – Tonelada

Dado que el Test ABA es un método de predicción cualitativo, este solo expresa si existe o no potencial de generación de ácido para la muestra estudiada, y permite categorizar los materiales en tres niveles como lo indica la tabla de criterios. De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 10 y considerando los criterios de interpretación indicados en la tabla 9, se determinó que la Muestra A y la Muestra B, presentan un Alto Potencial de Generación de Ácido, lo que genera otro factor de peligro en este material al ser expuesto a condiciones de lluvia, ya que se generaría a partir de este, drenaje ácido, con todo lo que conlleva este fenómeno.

#### 4.3.5 GRANULOMETRIA

Los Resultados obtenidos de la Evaluación de la distribución del tamaño de partículas, realizado a la muestra de Relaves A y B, a través del Ensayo Granulométrico se muestran en la Tabla 11 (A) y (B).

**Tabla 11 (A).** Resultados Granulometría

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	DISTRIBUCION DE PARTICULAS (%)							
	MILIMETROS (mm)							
	2 - 1	1 - 0,5	0,5 - 0,25	0,25 - 0,1	0,1 - 0,05	0,05 - 0,02	0,02 - 0,002	<0,002
Mina La Plata A	0,37	6,41	22,38	25,78	5,69	12,24	15,89	11,24
Mina La Plata B	0,34	5,18	20,78	25,63	6,14	11,94	16,82	13,17

(Método: por pipeta)

**Tabla 11 (B).** Resultados Granulometría

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	GRAVA (%)	ARENA (%)	LIMO (%)	ARCILLA (%)
Mina La Plata A	0,12	60,63	28,13	11,24
Mina La Plata B	0,22	58,07	28,76	13,17

Como se puede observar en la tabla 11(A), el mayor porcentaje de material retenido se encuentra entre los tamaños de 0.5 a 0.1 mm, que son materiales clasificados como arenas, cuyo tamaño varía entre 0.070 y 2 mm. El segundo rango que cuenta con más cantidad de material retenido, es el de 0.002 a 0.05 mm, cuyo tamaño corresponde a Limos que están clasificados como materiales entre 0.070 y 0.0039 mm, estos datos pueden ser confirmados por los porcentaje de la tabla 11(B), esto quiere decir que las muestras A y B están compuestas predominantemente por arenas y limo medio, lo que le ofrece al material características altas de permeabilidad, lo cual le da mayor capacidad

al agua para pasar por medio de los poros y arrastrar componentes tóxicos. Por otro lado al contar con material de tamaño predominante de grano entre 100 y 500  $\mu\text{m}$  se puede facilitar la recuperación de oro u otros metales de interés. Sin embargo para aumentar la eficiencia de recuperación podría ser necesario realizar una remolienda, con el fin de dar más uniformidad a todos los tamaños.

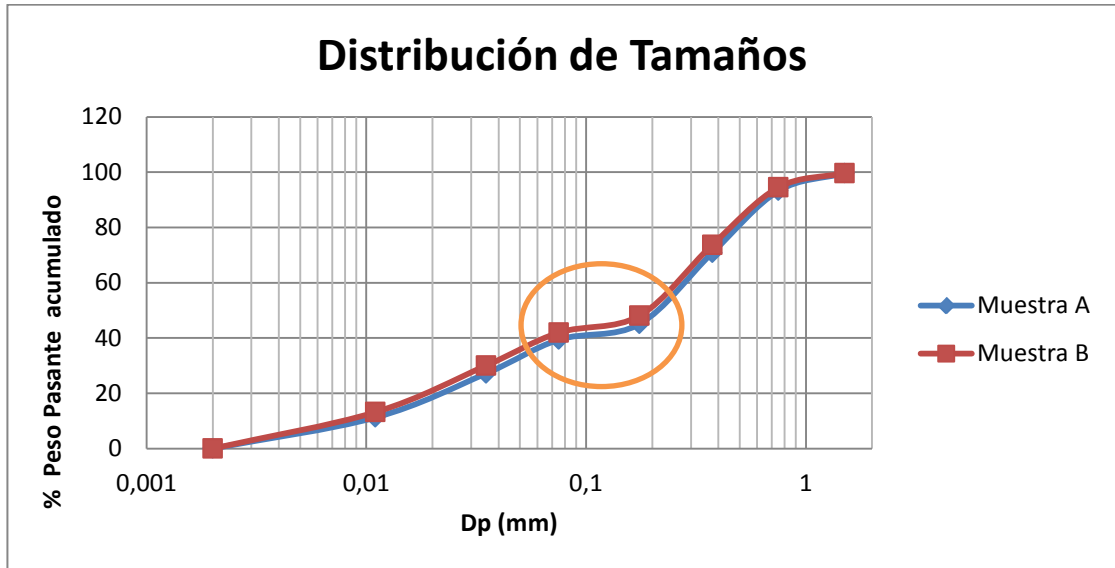
Se puede decir que este es uno de los factores más importante para determinar la utilización de los relaves en el tratamiento de Estabilización/Solidificación, con cemento portland, debido a que por medio del mismo se determinó que los relaves, presentan un tamaño de grano predominante igual a los materiales comúnmente utilizados como agregados finos en las mezclas para concretos y morteros, por otro lado al presentarse un porcentaje bajo de arcillas el proceso sería más eficiente, ya que estas absorben reactantes e impiden la polimerización y por lo tanto dejan incompleto el proceso de fraguado.

De acuerdo con los resultados obtenidos para este ensayo se realizó la tabla 12, con el fin de efectuar la construcción de la figura 13 que muestra la distribución de tamaños (Tamaño de partícula (mm) versus % Peso acumulado pasante).

**Tabla 12.** Distribución granulométrica

MUESTRA			A				B			
Tamaño superior	Tamaño inferior	Tamaño promedio	Peso	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante	Peso	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante
2	1	1,5	0,37	0,37	0,37	99,63	0,34	0,34	0,34	99,66
1	0,5	0,75	6,41	6,41	6,78	93,22	5,18	5,18	5,52	94,48
0,5	0,25	0,375	22,38	22,38	29,16	70,84	20,78	20,78	26,3	73,7
0,25	0,1	0,175	25,78	25,78	54,94	45,06	25,63	25,63	51,93	48,07
0,1	0,05	0,075	5,69	5,69	60,63	39,37	6,14	6,14	58,07	41,93
0,05	0,02	0,035	12,24	12,24	72,87	27,13	11,94	11,94	70,01	29,99
0,02	0,002	0,011	15,89	15,89	88,76	11,24	16,82	16,82	86,83	13,17
		0,002	11,24	11,24	100	0	13,17	13,17	100	0
			100				100			
<b>Modulo de finura</b>			<b>2,2475</b>				<b>2,1217</b>			

**Figura 13.** Distribución granulométrica (Dp. (mm) Vs % Peso Pasante Acumulado)



En la gráfica 13 se observa la distribución de tamaños para la muestra A y B, donde se presenta una inflexión entre los valores de 0.08 y 1.1 mm aproximadamente, lo que indica que en este material existen dos distribuciones de tamaños, la distribución que se encuentra menor a 0.08 mm y la distribución mayor a 1.1 mm.

#### 4.3.6 DENSIDAD Y HUMEDAD

Los Resultados obtenidos de la Evaluación de la Densidad Real ( $\text{g/cm}^3$ ) y Humedad de Campo (%) se muestran en la tabla 13.

**Tabla 13.** Resultados de Ensayos de Humedad (%) y Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA MINA LA PLATA	DENSIDAD REAL ( $\text{g/cm}^3$ )	HUMEDAD DE CAMPO (%)
Muestra A	2,81	6,6
Muestra B	2,81	6,5

(Método Gravimétrico)

De acuerdo con los resultados obtenidos en el porcentaje de humedad se determinó que tanto la Muestra A como la Muestra B presentan una humedad baja, lo que indica que debe existir poca movilidad de los componentes dentro de este material, además al presentar un mayor porcentaje de sólidos estas muestras cumplen con unos de los requisitos para ser estimable a la aplicación de la técnica de Estabilización/Solidificación, lo cual facilita la elaboración de las probetas e interacción de todos los componentes.

El porcentaje de los distintos constituyentes en los suelos, establece variaciones de su densidad, si la densidad real es muy inferior a  $2,65 \text{ gr/cm}^3$ , se podría pensar que el suelo posee un alto contenido de yeso o de materia orgánica, si es significativamente superior a  $2,65 \text{ gr/cm}^3$  podemos inferir que el suelo posee un elevado contenido de óxidos o metales. De acuerdo con los resultados se observó que la densidad para los relaves es relativamente alta ( $2.81 \text{ g/cm}^3$ ), esto posible consecuencia de la alta concentración de metales pesados, lo cual es soportado por el análisis por medio del test ICP, que se observa a continuación.

#### **4.3.7 TEST ICP**

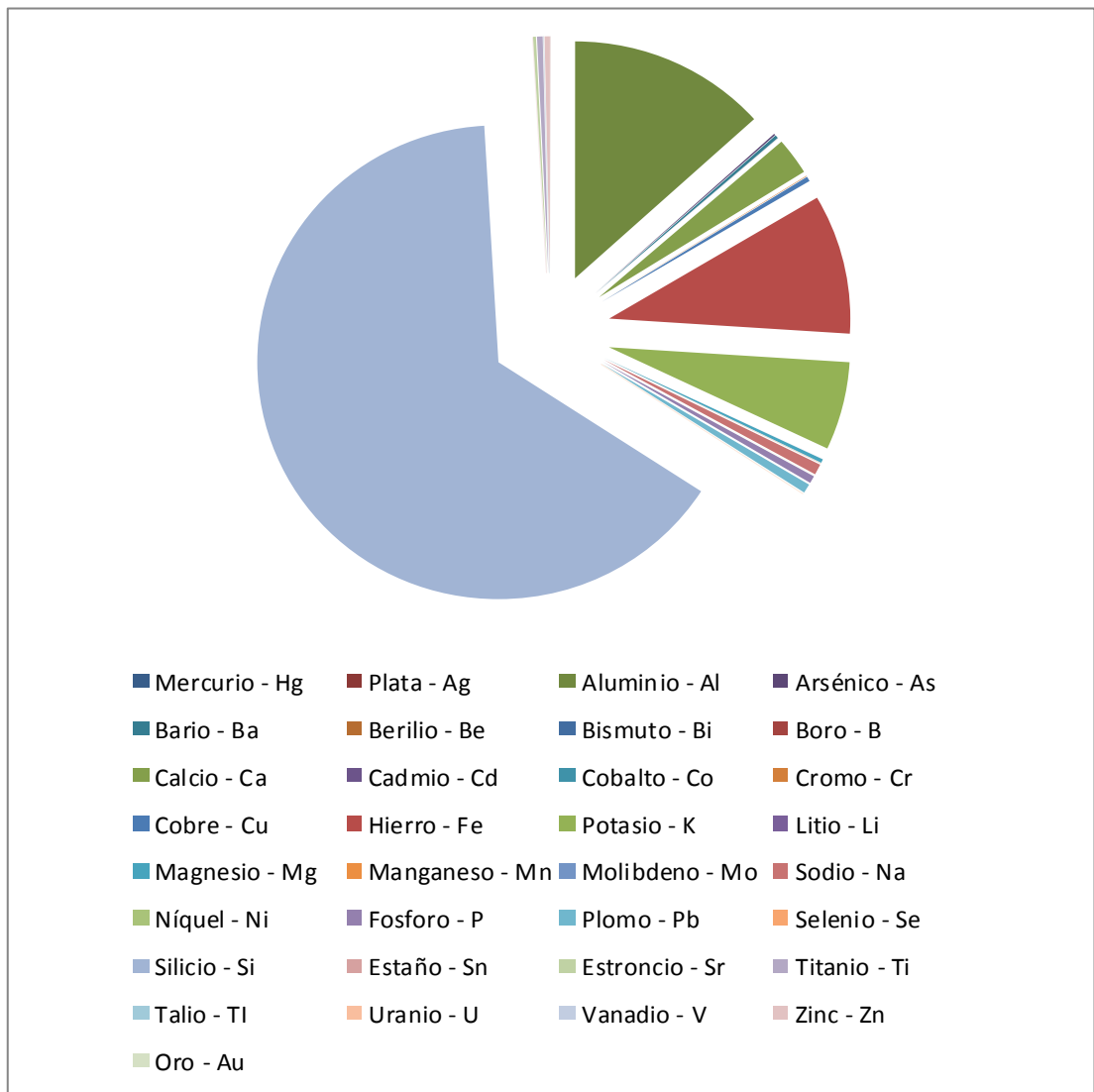
Los resultados obtenidos para la cuantificación de los elementos presentes en la muestra de relaves, mediante el Test ICP (Análisis de multielementos) se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Resultados Test ICP

ANALISIS	UNIDADES	IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	
		MINA LA PLATA MUESTRA A	MINA LA PLATA MUESTRA B
Mercurio - Hg	µg/g	9.1	8.6
Plata - Ag	µg/g	37	47
Aluminio - Al	µg/g	53000	49000
Arsénico - As	µg/g	410	370
Bario - Ba	µg/g	880	800
Berilio - Be	µg/g	5.1	5.2
Bismuto - Bi	µg/g	18	14
Boro - B	µg/g	11	5
Calcio - Ca	µg/g	10000	7700
Cadmio - Cd	µg/g	4.4	3.4
Cobalto - Co	µg/g	6.6	6
Cromo - Cr	µg/g	140	160
Cobre - Cu	µg/g	1300	770
Hierro - Fe	µg/g	38000	36000
Potasio - K	µg/g	24000	23000
Litio - Li	µg/g	9	8
Magnesio - Mg	µg/g	1000	830
Manganeso - Mn	µg/g	60	59
Molibdeno - Mo	µg/g	24	21
Sodio - Na	µg/g	2900	3200
Níquel - Ni	µg/g	17	16
Fosforo - P	µg/g	2000	1900
Plomo - Pb	µg/g	2480	2300
Selenio - Se	µg/g	<0.7	<0.7
Silicio - Si	g/t	259000	272000
Estaño - Sn	µg/g	1.6	1.0
Estroncio - Sr	µg/g	760	720
Titanio - Ti	µg/g	1500	1300
Talio - Tl	µg/g	1.4	1.2
Uranio - U	µg/g	22	24
Vanadio - V	µg/g	84	75
Zinc - Zn	µg/g	1400	920
Oro - Au	g/t	1.60	1.13

(Método: ICP/MS – ICP/OES)

**Figura 14.** Porcentajes de elementos en relaves Muestra A



En la figura 14 se observa un diagrama circular, útil para visualizar las proporciones que tiene cada elemento, con respecto al total (100%) de los relaves de la muestra A, analizados mediante el test ICP. En esta grafica se evidencia el sector con mayor tamaño correspondiente al silicio (Si), el cual es proporcional al porcentaje que posee en la muestra total, que es el 65%, las siguientes cantidades más representativas son las encontradas para él, Aluminio (Al) con 13%, Hierro (Fe) 10%, Potasio (K) 6 % y Calcio (Ca) 3%, y prestando especial atención a los elementos que son de interés sanitario tales como: el Plomo que se encuentra en una proporción del 1%, la cual es muy

elevada, sin embargo por medio del test SPLP se puede determinar la movilidad de este metal, la cual puede ser baja o alta, la cual es un parámetro de comparación con el decreto ambiental.

El porcentaje de oro que se determinó por este ensayo fue de 1.60 g/t y 1.13 g/t, para la muestra A y B respectivamente, lo cual indica una ley que sería rentable de explotar si se contara con una infraestructura montada para el procesamiento del material, por tal motivo es viable la inertización del material, asumiendo las pérdidas de oro.

Para determinar la concentración liberada de metales de los relaves, y realizar una comparación con el decreto ambiental vigente, se realizó el test SPLP, el cual me determina la verdadera movilidad de los elementos al ser dispuestos en un medio que proporcione el impulso, tal como el agua con bajo pH.

#### **4.3.8 TEST SPLP (Método EPA 1312)**

Los resultados obtenidos para la evaluación de la movilidad de los elementos presentes en la muestra de relaves A y B mediante el Test SPLP, se relacionan en la tabla 15.

Como se puede observar en la tabla 15, se exceden los límites de concentración permisibles para el Mercurio y Cobre de acuerdo con los criterios de calidad y vertimientos, la Plata, el Arsénico y el Molibdeno exceden los límites permisibles con respecto al criterio de calidad. La evaluación de concentraciones en exceso se debe realizar con respecto al criterio para vertimientos, por lo cual se determinó que solo se encuentran excediendo los límites de concentraciones para este criterio, el Mercurio y el Cobre, lo que indica la necesidad de aplicar un método de inertización de los relaves, donde se logre eliminar o disminuir las concentraciones de estos metales.

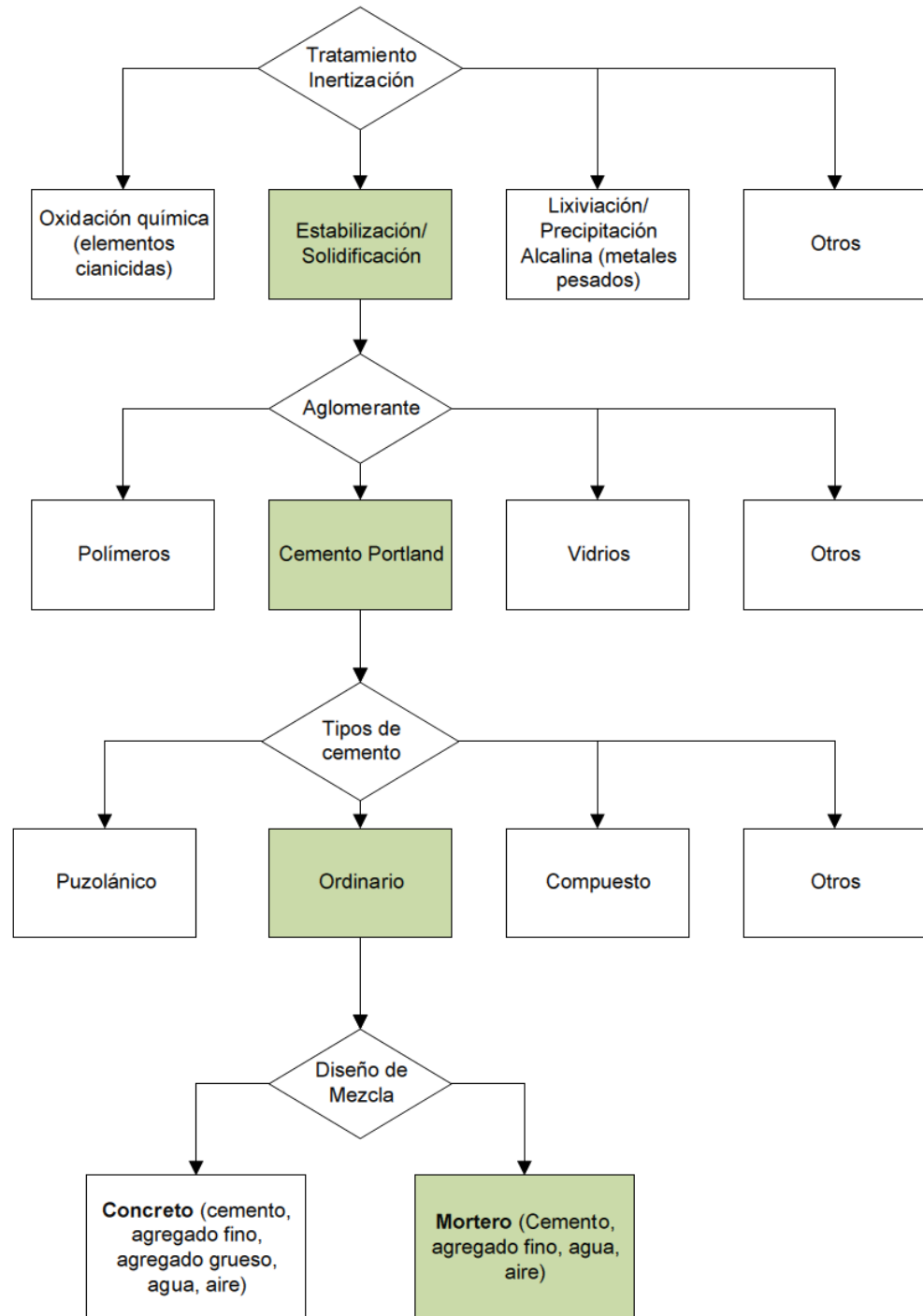
Tabla 15. Resultados Test SPLP y comparación con Decreto Ambiental

ANALISIS	UNIDADES	IDENTIFICACION DE LA MUESTRA		Criterios de calidad			
		Mina La Plata Muestra A	Mina La Plata Muestra B	Criterio de Vertimientos	Criterios de calidad		
					Uso pecuario	Uso agrícola	Uso humano
Mercurio - Hg	mg/L	0.0089	0.131	0.02	0,01		0,002
Plata - Ag	mg/L	0.366	0.356	0.5			0,05
Aluminio - Al	mg/L	0.404	0.195		5	5	
Arsénico - As	mg/L	0.0656	0.0571	0.5	0,2	0,1	0,05
Bario - Ba	mg/L	0.0079	0.0057	5.0			1
Berilio - Be	mg/L	<0.00002	<0.00002			0,1	
Bismuto - Bi	mg/L	0.00002	0.00002				
Boro - B	mg/L	0.207	0.173		5	( De 0,3 a 4,0 )	
Calcio - Ca	mg/L	198	121				
Cadmio - Cd	mg/L	0.000144	0.00006	0.1	0,05	0,01	0,01
Cobalto - Co	mg/L	0.0113	0.00616			0,05	
Cromo - Cr	mg/L	<0.0005	<0.0005	0.5	1	0,1	0,05
Cobre - Cu	mg/L	32.9	11.4	3.0	0,5	0,2	1
Hierro - Fe	mg/L	0.009	0.029			5	
Potasio - K	mg/L	9.19	9.15				
Litio - Li	mg/L	0.001	<0.001			2,5	
Magnesio - Mg	mg/L	0.391	0.634				
Manganeso - Mn	mg/L	0.00157	0.00044			0,2	
Molibdeno - Mo	mg/L	0.0833	0.0699			0,01	
Sodio - Na	mg/L	122	150				
Níquel - Ni	mg/L	0.0285	0.0179	2.0		0,2	
Fosforo - P	mg/L	<0.009	0.04				
Plomo - Pb	mg/L	0.00038	0.00063	0.5	0,1	5	0,05
Selenio - Se	mg/L	0.002	0.002	0.5		0,02	0,01
Silicio - Si	mg/L	1.06	1.3				
Estaño - Sn	mg/L	0.00002	<0.00001				
Estroncio - Sr	mg/L	0.0511	0.0235				
Titanio - Ti	mg/L	0.0004	0.0004				
Talio - Tl	mg/L	0.00042	0.00038				
Uranio - U	mg/L	0.00921	0.0065				
Vanadio - V	mg/L	0.00065	0.00057			0,1	
Zinc - Zn	mg/L	0.021	0.005		25	2	15
Antimonio	mg/L	0.0196	0.0305				
Peso de la Muestra	g	100	100				
pH Inicial	Unidades	8.88	8.82				
pH Final	unidades	8.9	8.74				

#### 4.4 INERTIZACIÓN DE RELAVES

A continuación en la figura 15 se muestra un flujograma de decisión, para la elección de la técnica de inertización y sus especificaciones más importantes.

Figura 15. Flujograma de decisión sobre viabilidad de la técnica de inertización

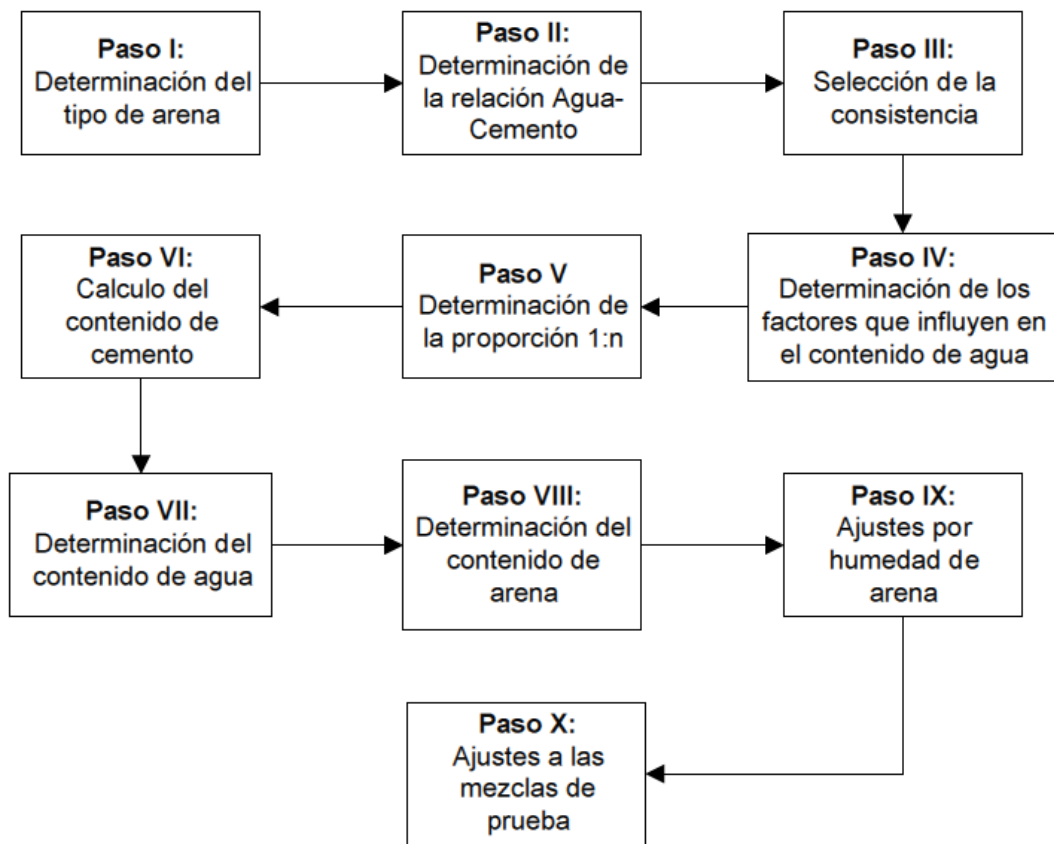


De acuerdo a una detallada revisión bibliográfica de diferentes técnicas usadas para la inertización de residuos sólidos contaminados con metales pesados y elementos cianicidas y sus especificaciones más importantes, se realizó un descarte de algunas técnicas como: la oxidación química (para elementos cianicidas) y la precipitación alcalina (para los diferentes metales pesados), entre otras, debido a que se requieren tratamientos separados para cada contaminante, además de otros factores que hacen más complicada su aplicación, como lo son los costos de materiales y equipos para llevar a cabo los procesos, entre otros aspectos; optando así, por la estabilización/solidificación como técnica de inertización de los relaves de la mina “La Plata” debido a que este método ofrece la posibilidad de tratar a la vez diferentes tipos de contaminantes como: metales pesados, elementos cianicidas, además de otras sustancias desconocidas.

#### **4.5 INERTIZACION DE RELAVES DE LA MINA “LA PLATA” MEDIANTE ESTABILIZACION/SOLIDIFICACION CON CEMENTO PORTLAND ORDINARIO.**

El objetivo principal de la técnica de Estabilización/Solidificación (E/S) utilizando cemento portland ordinario, es el reducir el potencial de los componentes de residuos peligrosos a lixiviar, por lo tanto se plantearon las etapas principales para el diseño de mezcla de un mortero impermeable y resistente (ver figura 16), donde el material utilizado como agregado fino son los relaves de la mina “La Plata”, a continuación se muestra un esquema de las etapas principales en el diseño de mezcla por peso, para un mortero impermeable y resistente, de acuerdo a la guía que ofrece el libro “Tecnología del concreto y del Mortero” de Diego Sánchez Guzmán, el cual esta soportado por diferentes normas de la NTC y ASTM.

**Figura 16.** Procedimiento de diseño de mezcla para mortero



#### 4.5.1 Determinación del tipo de arena

El agregado fino que se utilizara, serán los relaves de la mina “La Plata”, cuyo tamaño predominante de acuerdo a la caracterización granulométrica, es de “Arena”, la cual fue obtenida por medio de trituración, por lo cual su textura es rugosa y tiene forma cubica y angular, lo que implica que el acomodamiento de las partículas en la mezcla sea menos efectivo que cuando se trabaja con arenas de textura lisa y forma redonda, las cuales ofrecen morteros más resistentes. Es importante resaltar que entre mayor es la aspereza de la textura superficial de la arena, mayores serán los requerimientos de agua. El módulo de finura para las muestras de relaves A y B es de 2.2 y 2.1 respectivamente, como se observa en la distribución granulométrica (tabla 12). A continuación se observa el tipo de agregado fino utilizado (Los relaves de la mina “La Plata”).

**Figura 17.** Arena utilizada para el diseño de mezcla (Relaves)



A continuación en la tabla 16 se muestra la caracterización realizada en el laboratorio de ingeniería civil, con el fin de determinar las gravedades específicas y la absorción de una muestra de relaves de la mina “La Plata”.

**Tabla 16.** Gravedades específicas y % de Absorción de relaves

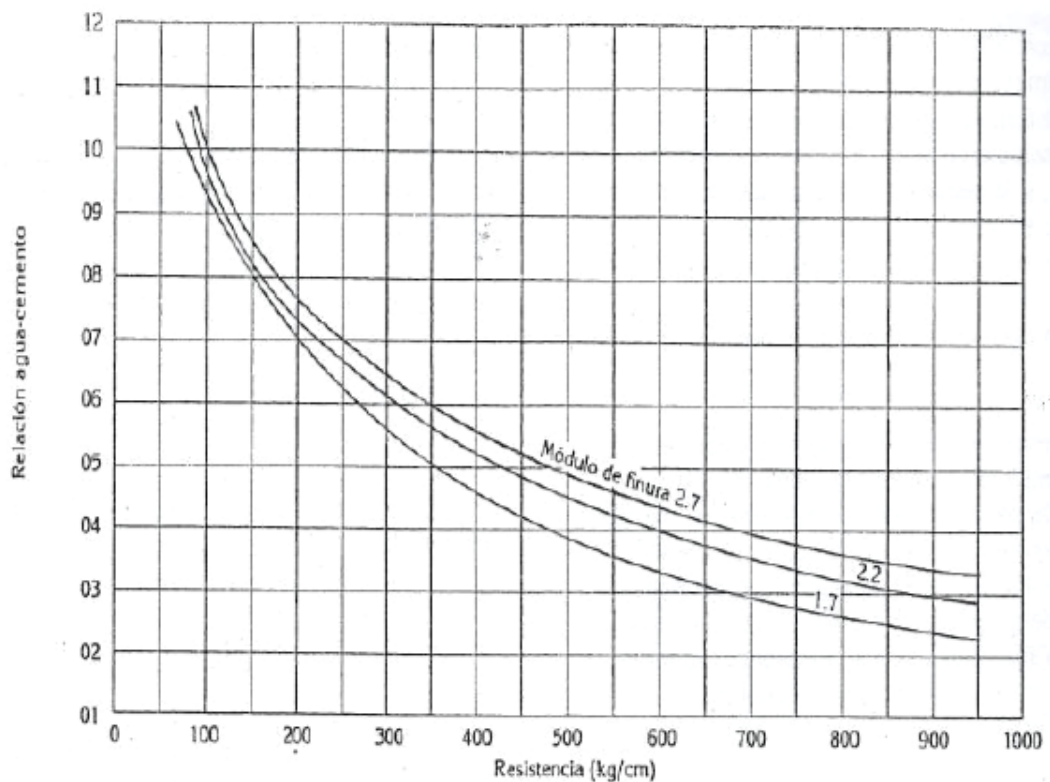
<b>GRAVEDADES ESPECIFICAS</b>			
<b>DATOS</b>			
A =	Peso del Frasco + Agua hasta la marca, en el aire .....	<u>667,8</u>	Gramos
B =	Peso de la muestra en condición S.S.S en el aire .....	<u>508</u>	Gramos
C =	Peso de la muestra. Frasco y Agua agregada hasta la marca, en el aire .....	<u>958,3</u>	Gramos
D =	Peso de la muestra secada al horno .....	<u>466,8</u>	Gramos
<b>CALCULOS:</b>			
Gravedad específica real.....	$\frac{D}{(A - C + D)}$	$= \frac{466,8}{(667,8 - 958,3 + 466,8)}$	$= \frac{2,65}{}$
Gravedad específica aparente.....	$\frac{D}{(A + B - C)}$	$= \frac{466,8}{(667,8 + 508 - 958,3)}$	$= \frac{2,14}{}$
Gravedad específica aparente S.S.S .....	$\frac{B}{(A + B - C)}$	$= \frac{508}{(667,8 + 508 - 958,3)}$	$= \frac{2,33}{}$
% de absorción .....	$\frac{(B - D) * 100}{D}$	$= \frac{(508 - 466,8) * 100}{466,8}$	$= \frac{8,82}{} \%$

#### 4.5.2 Determinación de la relación Agua-Cemento

La relación Agua-Cemento está determinada por los requisitos de resistencia a la compresión ( $\text{kg/cm}^2$ ), por lo cual en la figura 18 se observa una curva que relaciona estos dos factores para un mortero hecho con cemento portland tipo 1 y arena de forma angular y textura rugosa.

Para determinar la resistencia del diseño, se tuvo que a bajas relaciones agua-cemento, se obtienen más impermeabilidad en el mortero, por lo cual una relación de agua-cemento de 0,45, en la curva de 2,2 arroja una resistencia de  $500 \text{ kg/cm}^2$ , como se observa en la figura 18.

**Figura 18.** Correspondencia entre relación A/C y resistencia a la compresión.



**Fuente:** SANCHEZ de Guzman, Diego, Tecnología del concreto y del mortero, p 313

### 4.5.3 Selección de la consistencia

De acuerdo con los requerimientos que se tienen en la disposición del mortero y en la homogeneidad que se desea en este, se determinó realizar una mezcla que tuviera una consistencia plástica (100 – 120% de fluidez), debido a que no se requieren características importantes para su disposición, pero si una lubricación de todos los componentes presentes y un mayor porcentaje de sólidos por unidad de área en la mezcla final, lo cual se puede asegurar con una fluidez del 110 %. A continuación en la tabla 17, se presentan las diferentes consistencias del cemento por las que se puede optar.

**Tabla 17.** Diferentes consistencias del mortero

CONSISTENCIA	% DE FLUJO
Seca	90%
Plástica	110%
Fluida	130%

Fuente: SANCHEZ de Guzman, Diego, Tecnología del concreto y del mortero

### 4.5.4 Determinación de factores que influyen en el contenido de agua

Dependiendo de los requerimientos de agua del cemento y de la arena, se obtendrá la consistencia deseada, por ejemplo al presentarse una mayor cantidad de finos y mayor aspereza en las partículas, las cantidades de agua de mezclado por unidad de volumen requeridas serán mayores. La expresión matemática sugerida para determinar el requerimiento de pasta de cemento (relación agua-cemento), para una consistencia determinada es la siguiente<sup>45</sup>:

$$\frac{A}{c} = Ke^{bn} \quad \text{Ecuación 2}^{46}$$

---

<sup>45</sup> Ibíd. p. 314

<sup>46</sup> Ibíd. p. 314

Donde:

- A/C = Relación agua-cemento
- n = Proporción de mezcla (numero de partes de arena por una de cemento).
- b = Factor que relaciona la consistencia requerida (modulo de finura, forma y textura de la arena)
- e = 2,7183 (Base de logaritmos neperianos)
- K = Relación agua-cemento para la consistencia requerida en términos de fluidez de la pasta de cemento.

Para determinar el valor de K se elaboraron varias pastas (Agua.- Cemento), con lo cual se establecieron los porcentajes de fluidez, por medio del ensayo de la mesa de flujo, de acuerdo a la norma (ASTM C-230), para finalmente realizar la construcción de la curva que relaciona el porcentaje de flujo y la relación-agua-cemento (figura 19)

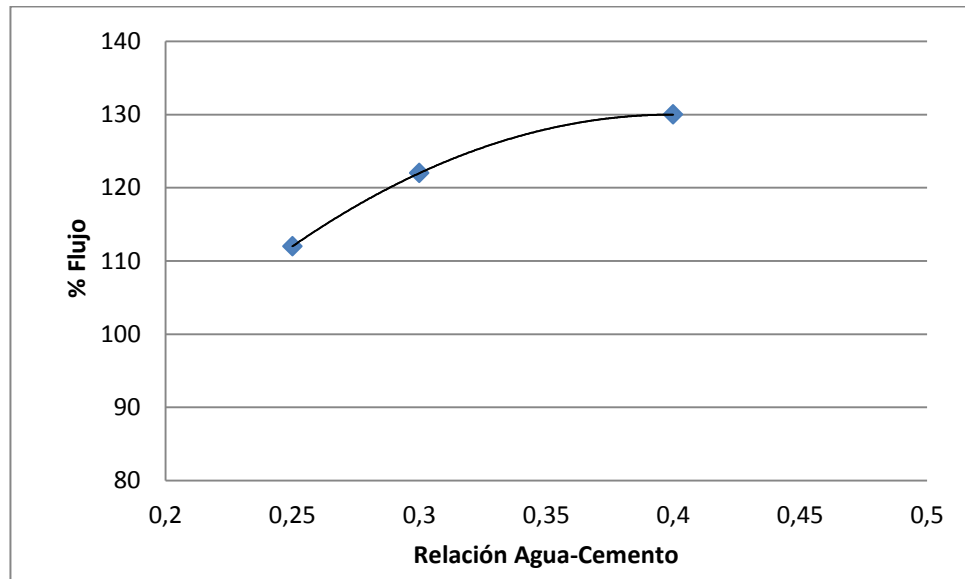
A continuación se muestran los datos obtenidos en el ensayo de la mesa de flujo (tabla 18), aplicado a la pasta hecha con cemento portland ordinario de la empresa Cemex, el cual presenta una densidad de 2,99 gr/cm<sup>3</sup>

**Tabla 18.** Relación entre % fluidez y relación agua-cemento

Relación A/C	% Fluidez
0,25	112
0,30	122
0,40	128

Fuente: SANCHEZ de Guzman, Diego, Tecnología del concreto y del mortero

**Figura 19.** Relación entre % fluidez y relación agua-cemento



Fuente: SANCHEZ de Guzmán, Diego, Tecnología del concreto y del mortero

De acuerdo a la tabla 18 y la figura 19, se puede observar que la relación agua cemento para la consistencia elegida (110% fluidez), es de 0,24 ( $k = 0,24$ ).

Para obtener el valor de  $b$ , se ha sugerido utilizar la tabla 19, la cual arroja un valor de 0.2947, para una arena de granos angulares y textura rugosa, de consistencia plástica (110%), y modulo de finura de 2,2.

**Tabla 19.** Valores de  $b$  para distintas consistencias y módulos de finura

Consistencia	Módulo de finura	Arenas de granos redondos y lisos	Arena de granos angulares y rugosos
Seca (90 %)	1,7	0,3293	0,3215
	2,2	0,3110	0,3028
	2,7	0,2772	0,2930
	3,2	0,2394	0,2494
Plástica (110%)	1,7	0,3242	0,3238
	2,2	0,3033	<b>0,2947</b>
	2,7	0,2734	0,2879
	3,2	0,2368	0,2477
Fluida (130%)	1,7	0,3172	0,3216
	2,2	0,2927	0,3003
	2,7	0,2687	0,2949
	3,2	0,2340	0,2629

Fuente: SANCHEZ de Guzmán, Diego, Tecnología del concreto y del mortero

#### 4.5.5 Determinación de la proporción 1: n

La ecuación sugerida para hallar el valor de n es la siguiente:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{A}{C}\right) - \ln(K)}{b} \quad \text{Ecuación 3}^{47}$$

Remplazando en la ecuación se obtiene:

$$n = \frac{\ln(0,45) - \ln(0,24)}{0,2947}$$

$$n = 2,13$$

#### 4.5.6 Cálculo del contenido de cemento

La cantidad de cemento por unidad de volumen se obtendrá a partir de una base de cálculo de 1 m<sup>3</sup>, entonces, se sugiere la siguiente expresión para hallar el contenido de cemento:

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{G_c} + \frac{n}{G_a} + \frac{A}{C}} \quad \text{Ecuación 4}^{48}$$

Donde:

- C = Cemento en kg
- G<sub>c</sub> = Peso específico del cemento
- G<sub>a</sub> = Densidad aparente seca de la arena

---

<sup>47</sup> Ibíd., p. 315

<sup>48</sup> Ibíd., p. 316

Entonces:

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{2,99} + \frac{2,13}{2,14} + 0,45}$$

$$C = 578,10 \text{ kg}$$

#### 4.5.7 Determinación del contenido de agua

La expresión sugerida para determinar el contenido de agua en la mezcla final es la siguiente:

$$A = (A/C)C \quad \text{Ecuación 5}^{49}$$

Entonces:

$$A = (0,45) * 578,10$$

$$A = 260,145 \text{ kg}$$

#### 4.5.8 Determinación del contenido de arena

La ecuación sugerida para determinar el contenido de arena en la mezcla final es la siguiente:

$$a = nC \quad \text{Ecuación 6}^{50}$$

Entonces:

$$a = 2,13 * 578,10$$

$$a = 1.231,35 \text{ kg}$$

---

<sup>49</sup> Ibíd., p. 316

<sup>50</sup> Ibíd., p. 316

#### 4.5.9 Ajustes por humedad de arena

Puesto que la humedad de la arena no hace parte de la mezcla final, es necesario realizar las correcciones pertinentes, por medio de la siguiente expresión sugerida:

$$A_c = P_s(H - CA)/100 \quad \text{Ecuación 7}^{51}$$

Donde:

- $A_c$  = Agua en exceso o defecto respecto de la condición de S.S.S.
- $P_s$  = Peso seco del agregado
- $H$  = Humedad del agregado
- $CA$  = Capacidad de adsorción del agregado

$$A_c = 1.231,35 (6,6 - 8,82)/100$$

$$A_c = -27,33 \text{ L/m}^3$$

Por lo tanto los requerimientos de agua de mezclado corregida en la dosificación son:

$$260,145 - 27,33 = 232,815$$

#### 4.5.10 Ajustes a las mezclas de prueba

A continuación se muestran las dosificaciones de materiales que se deben realizar para una mezcla final de 1 metro cúbico.

---

<sup>51</sup> Ibíd., p. 211

**Tabla 20.** Dosificación por metro cúbico de mortero en proporción (1:2,13)

Material	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso específico g/cm <sup>3</sup>	Volumen L/m <sup>3</sup>
Cemento	578,10	2,99	193,344482
Arena	1.231,35	2,14	575,397196
Agua	232,815	1,00	249,785
TOTAL	2.042,265		1.001,5567

Teniendo en cuenta que la cantidad de relaves que se estiman en la mina “La Plata” es de 14 m<sup>3</sup>, entonces se realizarán los respectivos ajustes, para determinar la cantidad total de cemento a gastar.

**Tabla 21.** Dosificación para los 14 m<sup>3</sup> de relaves en la mina “La Plata”

Material	Peso seco Kg	Peso específico g/cm <sup>3</sup>	Volumen L
Cemento	14.065,73	2,99	4.704,26
Arena	29.960	2,14	14.000
Agua	5.664,62	1,00	5.664,62
TOTAL	49.690,34		24.368,86

La cantidad de cemento portland que se requiere para tratar mediante estabilización/solidificación, la totalidad de relaves (14 m<sup>3</sup>), es de 14.066 kilogramos y 5.665 litros de agua.

A continuación se muestra el ajuste a las mezclas de prueba en probetas con dimensiones de 20 cm de altura y 10 cm de diámetro aproximadamente.

**Tabla 22.** Dosificación para mezclas de prueba

Material	Peso seco Kg	Peso específico g/cm <sup>3</sup>	Volumen L
Cemento	0,8641	2,99	0,2889
Arena	1,840	2,14	0,8590
Agua	0,347	1,00	0,347
TOTAL	1.259,82		1,4949

#### **4.5.11 RESULTADOS EN PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS**

Con el fin de dar soporte a la técnica y estimar la aplicación de la estabilización/Solidificación con cemento portland ordinario en la inertización de los relaves de la mina “La Plata”, se observaron los primeros resultados en el proceso de elaboración de las probetas, el cual fue satisfactorio debido a que la mezcla logró fraguar, endurecer y tomar la forma del molde, como se puede observar en las figuras del anexo B.

Al realizar las pruebas de resistencia a la compresión se observó, estas no alcanzaron las estimadas en el diseño, ya que se plantearon para alcanzar una resistencia de 500 kg/cm<sup>2</sup>, y las alcanzadas se encuentran en 241.76 kg/cm<sup>2</sup>, por lo que se muestra un decremento del 51 %, teniendo valores por debajo de lo estimado, lo cual se debe quizás a la alta concentración de metales pesados en los relaves, que pueden generar una interferencia en el alcance de las resistencias esperadas, o quizás a la presencia de grumos que no lograron mezclarse íntimamente con el cemento. Dentro de los usos que se le podría dar al mortero de acuerdo a su resistencia a la compresión, sería en pavimentación de suelos, donde las resistencias varían entre 100 y 250 kg/cm<sup>2</sup>, sin embargo para poder estimar su aplicación en este campo, es necesario analizar la estabilidad mecánica por otros ensayos y la estabilidad química por diversas técnicas que determinen que el material tendría un comportamiento químicamente inerte bajo las condiciones de aplicación.

A continuación se muestra un fragmento obtenido después del ensayo de compresión realizado sobre el mortero hecho a base de relaves.

**Figura 20.** Superficie sólida de fragmento de mortero a base de relaves



Como se observa en la figura, la mezcla logró constituirse y endurecerse, además se observa la presencia de gran cantidad de grumos de relave (material de color anaranjado), los cuales se presentan debido a la cantidad de granos de relave de tamaño fino, además de altos contenidos de humedad, la presencia de estos, nos indica que la muestra no logró mezclarse íntimamente con todos los componentes en su totalidad lo que puede tener influencia sobre su resistencia final y sobre la liberación de componentes tóxicos que no lograron reaccionar con los componentes propios del cemento y del agua. Por lo tanto tales grumos son susceptibles a la liberación de componentes propios de los relaves, y por tal razón se sugiere realizar un secado del material al aire antes de ser mezclado, con el fin de eliminar la humedad que logra confinar estos grumos, al igual que una molienda para desmoronar estos pedazos.

El éxito de la estabilización/solidificación de relaves con cemento portland depende mucho si este residuo contiene ciertos elementos orgánicos como carbón u otros, o ciertas sales metálicas de cobre, estaño o algunos metales pesados en concentraciones muy altas, que serían incompatibles con el cemento impidiendo su fraguado y curado, dando un producto mecánicamente débil que origina el deterioro de la matriz de cemento con el tiempo.<sup>52</sup>

Con el propósito de analizar la estabilidad química del mortero se realizó el análisis de la concentración de Hg, Cu en el lixiviado por absorción atómica del mortero, ya que estos elementos se presentan en concentraciones que exceden los límites permitidos en el lixiviado de SPLP de los relaves. A continuación se observa la concentración en mg/L de estas sustancias obtenidas por medio de absorción atómica.

**Tabla 23.** Resultados absorción atómica

Sustancia	Método	Concentración (mg/kg)
Mercurio (Hg)	EPA 3050 STANDARD METHODS 3114B	1,87
Cobre (Cu)	EPA 3050 STANDARD METHODS 311B	348,8

La concentración que se muestra en la tabla anterior es el porcentaje total que existe en la muestra de mortero (mezcla relaves/cemento), la cual debe ser analizada con la concentración obtenida por el test ICP, con el fin de tener una referencia en la disminución de la concentración de la sustancias que se encuentra en porcentajes muy altos o que exceden los límites permisibles en vertimientos. A continuación se muestra la comparación en la concentración de mercurio, cobre, obtenida por medio del test ICP en la muestra de relaves A y B, con los resultados obtenidos por medio del ensayo de absorción atómica aplicado al lixiviado obtenido del mortero.

<sup>52</sup> Manaham, Stanley E, Introducción a la química ambiental, UNAM, México, 2007, p.642

**Tabla 24.** Comparación de concentración de sustancias entre mortero y relaves

Sustancias	Concentración en relaves (mg/kg) ICP		Concentración en mortero (mg/kg) AA
	Muestra A	Muestra B	
<b>Mercurio</b>	9,1	8,6	<b>1,87</b>
<b>Cobre</b>	1300	700	<b>348,8</b>

Como se puede observar en la tabla anterior la concentración de mercurio y cobre que se pudo hallar en el lixiviado de los morteros por absorción atómica es significativamente menor a la obtenida en la mezcla de relaves, aproximadamente entre un 78 y 80 %, lo cual indica que por ende la concentración que se determinaría en el mortero por medio del test SPLP, podría ser menor en un 78 a 80%, siendo conservadores, ya que no se tienen en cuenta las posibles reacciones de encapsulamiento de contaminantes, que se dan por los componentes propios del cemento y el agua de la mezcla. Por su parte el test SPLP, puede estimar la liberación de metales desde residuos puestos en un vertedero y expuestos a condiciones de lluvia ácida, cabe resaltar en este punto que las condiciones de lluvia ácida simuladas por medio del test SPLP, son muy diferentes a las condiciones de acidez que se utilizan para extraer el lixiviado que se analizará por absorción atómica, es decir por este método se obtiene el contenido total de contaminantes de una muestra y por medio del test SPLP, solo el que se lixivia en condiciones de lluvia ácida. Si la disminución de concentración es un 80% se puede inferir que la concentración que se puede obtener en el lixiviado de SPLP, será menor mínimo en un 80%, ya que el cemento puede reaccionar químicamente con los residuos (por ejemplo el calcio y la base del cemento portland reaccionan químicamente con los residuos inorgánicos como los metales pesados, reduciendo su solubilidad), Sin embargo, la mayoría de los residuos se sostienen físicamente en la matriz rígida del cemento portland, con lo que están sujetos a lixiviación.

## 5 CONCLUSIONES

- En la mina “La Plata” se realizaban procesos de beneficio para la recuperación de oro y plata por medio de las técnicas de amalgamación y cianuración, por ende los reactivos propios de estos procesos tales como: mercurio y cianuro, se deben presentar en las colas, debido a que durante el tiempo que estuvo en operación la mina, no se realizó un tratamiento descontaminante de relaves, los cuales eran dispuestos sobre la quebrada “La Baja”. En la actualidad en esta mina no se realizan actividades, pero toda su infraestructura implica grandes riesgos ambientales, debido a que se encuentra ubicada a lo largo de esta quebrada, la cual usualmente por las condiciones climáticas presenta crecientes, que podrían arrastrar consigo diversos contaminantes tales como escombros, chatarra, aguas contaminadas y relaves.
- Los dos factores que determinaron la aplicación de la técnica de estabilización/solidificación con cemento portland en la inertización de relaves, son el tamaño de grano predominante de arena por el que están constituidos los relaves, el cual ofrece buenos resultados en la mezcla, y por otro lado la baja humedad, ya que no existió la necesidad de eliminarla por medio de algún proceso de secado, sin embargo al realizar la elaboración de las probetas y someterlas a falla, fue posible observar una superficie que presenta grumos posiblemente por humedad, además de los finos presentes en la muestra.
- Los relaves de la mina “La Plata” se caracterizan por tener un alto nivel de peligro por toxicidad, representado por su alto potencial de generación de ácido, altas concentraciones de metales pesados como aluminio en un 16%, hierro en un 10%, y potasio en un 6% del peso de una muestra total, además de altas concentraciones de cianuro WAD (entre 100 y 300 mg/L), y concentraciones en el lixiviado de SPLP para mercurio entre 8,6 y 9,1mg/L y para cobre entre 700 y 1300 mg/L, las cuales superan los límites máximos

permisibles del decreto 3930 de 2010, el cual establece concentraciones máximas de 0,02 mg/L de mercurio y 3,0 mg/L de cobre.

- Las probetas elaboradas a base de relaves y cemento presentaron un buen fraguado, ofreciendo resultados en la prueba de compresión considerablemente altos de 241,76 kg/cm<sup>2</sup>, sin embargo 50% por debajo de lo estimado en el diseño 500 kg/cm<sup>2</sup>, lo cual puede estar determinado por las altas concentraciones de metales pesados u otras sustancias, o quizás debido a la falta de eliminación de grumos de relaves antes de realizar la mezcla.
- Los resultados en el análisis de Hg, Cu, total en el lixiviado del mortero, obtenida por absorción atómica, pudo establecer la disminución en la concentración de estas sustancias en aproximadamente un 80%, para llevar a cabo esta reducción, la cantidad de cemento y agua utilizada fueron, aproximadamente una parte de agua por cinco de relaves y 1 parte de cemento por dos de relaves.
- Por medio de este trabajo fue posible ofrecer una metodología práctica y efectiva para llevar a cabo la disminución en la concentración de contaminantes en los relaves de la mina “La Plata”, la cual se basa en la estabilización/solidificación del residuo con cemento portland, y donde se realiza un diseño de mezcla para morteros (relaves/cemento), lo cual es una salida económica y fácil, ya que para neutralizar este residuo solo se haría uso de cemento portland, el cual es muy económico y fácil de manipular.
- Este trabajo ofreció una alternativa aplicable a los relaves de la mina “La Plata”, la cual puede ser una base para estudios a futuro, donde se determinen las mejores condiciones para un material estabilizado, siendo esta técnica una salida viable no solo para el manejo de los relaves de la mina “La Plata”, sino para los de las demás minas del municipio de California y Vetás, y quizás un camino efectivo para el manejo de los residuos de este tipo, que se producen en la demás minas de Colombia.

## 6 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un trabajo posterior, donde se puedan efectuar una mayor cantidad de pruebas a escala de laboratorio y piloto, en el cual se determinen las mejores condiciones para obtener un material que presente la mas baja lixiviación de componentes tóxicos y buenas propiedades mecánicas, por lo cual se sugiere realizar otro tipo de ensayos mecánicos y químicos, además de los realizados en este trabajo.
- De acuerdo a las pruebas de resistencia a la compresión, extracción del lixiviado y absorción atómica, se pudo establecer que la técnica E/S, ofrece estabilidad mecánica y estabilidad química al producto final, sin embargo es importante realizar un mayor número de ensayos químicos para dar mayor soporte a la técnica, desde el punto de vista de la estabilidad química del mortero, dentro las técnicas sugeridas que se deben aplicar al material se encuentra el test SPLP y el test ABA.
- Es importante realizar un análisis microscópico de la mezcla final y de las reacciones que se presentan entre todos los componentes que integran la mezcla de relaves/cemento.
- Se recomienda antes de realizar la elaboración de probetas con cemento, eliminar la humedad presente en los relaves por medio de un secado al aire, además de eliminar los grumos que impiden la interacción de los relaves en su totalidad con los componentes propios del cemento.

## BIBLIOGRAFIA

- American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM D D6009 – 96 (Reapproved 2006) Standard Guide for Sampling Waste Piles.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM D D6233 – 98 (Reapproved 2009) Standard Guide for Data Assessment for Environmental Waste Management Activities.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM C 230/ C230M – 08 Standard Specification for flow table for use in test if Hydraulic Cement
- A.S.R. Perera, A. Al-Tabbaa, J.M. Reid, J.A. Stegemann, Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation, Part IV: Testing and performance criteria, Taylor & Francis Group, London 2005.
- BAIRD Colin. Química Ambiental, Editorial Reverté S.A. España 2001
- Barrera S. & Lara J. Geotechnical Characterization of Cycloned Sands for the Seismic Design of Tailings Deposits, 3rd International Congress on Environmental Geotechnics. Lisboa 1998.
- Bastidas B. María E. Aplicación del Test ABA y SPLP a una muestra de Relave de Compañía Minera Falda Verde. Informe Final, Agosto de 2007,[en línea], [ref. 30 de agosto de 2011] Disponible en: [https://www.e-seia.cl/archivos/dae\\_Anexo6.pdf](https://www.e-seia.cl/archivos/dae_Anexo6.pdf)
- Cáceres G. A. Hidrometalurgia y Electrometalurgia, Universidad de Atacama, Copiapó, 2007.
- CRUZ G, Grisell, Solidificación de Desechos Industriales mediante Cementación con Cemento Puzolánico, Universidad de las Américas Puebla

México, 2006. [en línea], [ref. sept. 15] Disponible en Web: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lpro/cruz\\_g\\_g/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lpro/cruz_g_g/capitulo4.pdf)

- DELGADO M. Jesús A & ORTIZ P. Jaime A., Estudio del proceso de neutralización del cianuro presente en los residuos del proceso de lixiviación de minerales auríferos en el distrito minero de Vetas y California, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga-Colombia, 2009
- Environmental Protection Agency, EPA; A Citizen's guide to Solidification/Stabilization, US, 2001
- ESTUDIOS MINEROS DEL PERÚ S.A.C, Manual de Minería, , [en línea], [ref. 10 de agosto], lima Perú disponible en: [http://www.estudiosmineros.com/ManualMineria/Manual\\_Mineria.pdf](http://www.estudiosmineros.com/ManualMineria/Manual_Mineria.pdf)
- GASKELL. David R. Introduction to the thermodynamics of materials, Tesis. Taylor & Francis. Forth edition. New York , 2003.
- GAVIRIA Ana C. MEZA S Luis A. Análisis de alternativas para la degradación del Cianuro en efluentes líquidos y sólidos del municipio de Segovia, Antioquia y en la Planta de Beneficio de la Empresa Mineros Nacionales, municipio de Marmato, Caldas, Universidad nacional de Colombia, sede Medellín, facultad de minas, mayo de 2006.
- Ge'rald J.Zagury, Kahina Oudjehani, Louise Desche^nes, Characterization and availability of cyanide in solid mine tailings from gold extraction plants, Science of the Total Environment 320 (2004) 211–224, August 2003
- GÓMEZ O David, CRESPO Tomás M, JOSÉ MARÍA ESBRI José María. Geoenvironmental Characterization of the San Quintín Mine Tailings, Ciudad Real (Spain), January 7 th, 2009.

- Guía ambiental para el manejo de relaves mineros, Ministerio de Minas y Energía del Perú, [En línea], [Ref.10 de agosto de 2011], Disponible en: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/relaveminero.PDF>
- Instituto internacional para el manejo del cianuro definiciones y siglas, enero de 2011[en línea] [ref. 25 agosto de 2011] Disponible en: [http://www.cyanidecode.org/sppdf/Definitions%20Acronyms\\_SP.pdf](http://www.cyanidecode.org/sppdf/Definitions%20Acronyms_SP.pdf)
- Kitis, M., Akcil, A., Karakaya, E., Yigit N.O., Destruction of cyanide by hydrogen peroxide in tailings slurries from low bearing sulphidic gold ores Minerals Engineering 18 (2005) 353–362 June 2004
- LAZARO Javier D. Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados, tese de Doutoramento, facultad de Biología universidad de Santiago de Compostela [en línea], [ref.15 agosto] disponible en Web: <http://books.google.com.co/books?id=Epe1R7qLn9oC&pg=PA20&dq=suelos+contaminados#v=onepage&q&f=false>
- Linares G. Nataniel M.; Manejo Ambiental de Residuos de cianuración de Oro en El laboratorio Metalúrgico de La Facultad de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional JORGE BASADRE GROHMANN; Tacna, Perú, 2008.[en línea ],[ref. 1 de septiembre] Disponible en web: <http://es.scribd.com/doc/8270675/Manejo-Ambiental-de-Residuos-de-Cianuracion-de-Oro-en-El-Laboratorio-Metalurgico-de-La-Facultad-de-Ingenieria->
- LOGSDON Mark J. HAGELSTEIN Karen. MUDDER Terry I. The Management of Cyanide in Gold Extraction. The International Council on Metals and the Environment, April 1999.

- Manahan, Stanley E. Introducción a la química ambiental, Universidad Autónoma de México, Editorial Reverte UNAM, México, 2007.
- MÁRQUEZ R. Fernando Manejo seguro de Residuos Peligrosos, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción Concepción-Chile [en línea], [ref. 28 agosto], Disponible en: [www2.udec.cl/matpel/cursos/residuos\\_peligrosos.pdf](http://www2.udec.cl/matpel/cursos/residuos_peligrosos.pdf)
- MARSDEN John O, HOUSE C. The Chemistry of Gold extraction, Lain, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME), Second Edition, Colorado USA 2006.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo territorial, DECRETO 3930 DE 2010 Usos del agua y residuos líquidos., Republica de Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía del Perú, Guía ambiental para el manejo de drenaje ácido, , [En línea], [Ref.20 de agosto de 2011], Disponible en: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/manedrenaje.PDF>
- MUDDER, Terry y Botz, Mike.2004. El cianuro y la sociedad; Disponible en Web: <http://www.panoramaminero.com.ar/Per%FA%20Cianuro%20Espa%F1ol.doc>
- Nava-Alonso F., Elorza-Rodríguez, E., Uribe-Salas A. y Pérez-Garibay, R. Análisis químico de cianuro en el proceso de cianuración: revisión de los principales métodos; Revista de Metalurgia, 43 (1) enero-febrero, 20-28, 2007,[en línea], [ref.11-08-20], Disponible en: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/48/48>
- NORMA TECNICA COLOMBIANA, Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas. NTC 121 (1995).

- NORMA TECNICA COLOMBIANA, Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones químicas. NTC 321 (1995).
- NORMA TECNICA COLOMBIANA, Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para determinar la densidad y absorción de agregados finos. NTC 237 (1995).
- NORMA NMX – C – 414 – ONNCCE – 1999. Cementos Hidráulicos: Especificaciones y Métodos de prueba, México.
- ORTEGA Richard. Heavy Metals in the Environment, Chapter 2, University of Bordeaux, Gradignan, France, Marcel Dekker, Inc. France 2002.
- ORTIZ, M. Jesús, R. 2006. Estudio de la estabilización y solidificación de metales pesados mediante la técnica de cementación, México, 2004 [en línea], [ref. sept. 15] Disponible en Web: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leia/ortiz\\_m\\_jr/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/ortiz_m_jr/)
- Rodríguez, J.J.; Irabien, A. (1990). Los residuos peligrosos. Caracterización tratamiento y gestión. Ed: Síntesis, Madrid, España.
- Romero, Alfonso A, Flores, Silvana L. Medina, Rosa, Estudio de los metales pesados en el relave abandonado de Ticapampa, Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG Vol. 11, N. ° 22, 13-16 (2008) UNMSM, Colombia noviembre de 2008.
- SANCHEZ De Guzmán, Diego, Tecnología del concreto y del mortero, Pontificia Universidad Javeriana- Facultad de Ingeniería, Bhandar editores Ltda. Santafé de Bogotá, D.C. – Colombia 1996.
- Suministro de espectrómetro ICP para análisis de contaminación en suelos con metales pesados, así como para la caracterización química de elementos constitutivos de suelos. [en línea], [ref. 15 de agosto], Disponible en: [www.cedex.es/castellano/noticias/ppt804045.pdf](http://www.cedex.es/castellano/noticias/ppt804045.pdf)

- U.S. Environmental Protection Agency: Solidification/Stabilization and its Application to Waste Materials, EPA/ 30/R-93/012 (1993).
- UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. Análisis termodinámico de especies cianuradas de oro plata y cobre sometidas a cementación con zinc y aluminio. *Scientia et Technica* [online] Año XIV; No 38, Junio de 2008, p. 156. Disponible en Internet : <http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/181338155>
- VOLKE, S. Tania; VELASCO, Juan A; DE LA ROSA, P. David, Suelos contaminados por metales y metaloides, Instituto Nacional de Ecología, México

## **ANEXOS**

### **Anexo A**

#### **Elaboración de Probetas y Ensayos**

Con el fin de medir la capacidad estabilizadora de los relaves por parte del cemento, en la mezcla de mortero, además de medir la capacidad del mortero para fraguar y endurecer, se realizaron mezclas de prueba a escala de laboratorio en moldes de 20 cm de alto y 10 cm de diámetro, para esto se determinaron las cantidades necesarias de componentes, y se realizó la homogeneización, mezclando primero los relaves con el cemento, y luego el agua, con el fin de integrar efectivamente todos los componentes, una vez terminada la mezcla, se engrasaron los moldes y se realizó el vertimiento de la mezcla en tres capas, que fueron apisonadas 25 veces cada una, luego se proporcionaron golpes laterales con un martillo de goma, con el fin de tener una estructura uniforme en el producto final, la cual esté libre de huecos, una vez realizados los golpes, se dejó reposar la mezcla durante 24 horas con el fin de que esta pudiera fraguar, endurecer y tomar la forma del molde, posterior a esto, con el fin de recuperar el agua pérdida en la reacción al mezclar el material, además de alcanzar la resistencia para la cual fue diseñado el mortero, se realizó el procedimiento de curado, donde la probetas fueron sumergidas en agua durante 28 días.

Una vez fraguada y curada la probeta se sacó del agua, se dejó secar y fue sometida a ensayos de compresión simple, cabe resaltar que para realizar estos ensayos es necesario que las superficies de los extremos sean totalmente planas, por lo cual se realizó el "Cabeceo de Azufre", con lo cual se aseguró que la fuerza de compresión, fuera distribuida uniformemente en el cilindro, esta técnica utiliza azufre en polvo, el cual fue sometido a una temperatura cercana a los 400°C, con el fin de fundirlo, y luego depositarlo en un molde metálico totalmente plano, en donde fue puesto el cilindro de mortero, generándose una reacción casi inmediata de cristalización del azufre, obteniéndose así extremos planos de azufre cristalizado .

Una vez se tenían los cilindros preparados, se paso a la máquina de compresión donde se empezó a ejercer presión mediante una palanca hasta que la aguja del indicador comenzó a moverse, entonces el movimiento se realizó mas suavemente hasta que la aguja cabeceo, lo que dio un indicativo de que el cilindro había cedido, por lo cual fue registrada la resistencia máxima obtenida.

Una vez realizada la prueba de compresión los fragmentos resultantes de la falla de los cilindros, fueron enviados al laboratorio CEIAM, con el fin de realizar la extracción del lixiviado, lo cual se realizo pulverizando la muestra y agregándole diferentes reactivos como acido ácido nítrico y ácido clorhídrico entre otros, en diferentes concentraciones, de acuerdo al estándar para cada sustancia de análisis utilizada por este laboratorio, posteriormente fue medida la concentración total de sustancias en el lixiviado, por medio de absorción atómica, los elementos analizados en esta etapa, fueron mercurio y cobre, debido a que la concentración determinada por medio del test SPLP (el cual simula las condiciones de lluvia acida), excede los límites permisibles en vertimientos, contempladas en el decreto 3930 de 2010.

## Anexo B

### Memoria fotográfica



Muestra de Relave en estado S.S.S



Muestra de Relave secada al horno



Muestra de Relave con agua  
(Determinación % de Absorción)



Mezcladora para pasta de cemento  
(Ensayo mesa de Flujo)



Pasta de cemento (Mesa de flujo)



Pasta de cemento (Mesa de Flujo)



Porciones de cemento/relave para mezcla de mortero



Mezcla final en estado plastico dispuesta en formalestas



Probetas Endurecidas



Probeta después de cabeceo de Azufre



Probeta en prensa de compresion



Probeta Mortero sometida a compresion

