



UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLIVAR
SEDE CENTRAL
Sucre-Bolivia

CURSO DE MAESTRÍA EN “INGENIERÍA AMBIENTAL MINERA”

**“PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINA DE
LOS ACTUALES NIVELES DE EXPLOTACIÓN DEL DISTRITO MINERO
COLQUIRI, EN FUNCIÓN DE SUS CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS”**

**Tesis presentada para obtener el Grado
Académico de Magister en “Ingeniería
Ambiental Minera”**

ALUMNO: Ing. EDGAR ORLANDO CAMACHO QUIROGA

TUTOR: Dr. Ing. GERARDO ZAMORA ECHENIQUE

**Oruro-Bolivia
2010**

INDICE

DEDICATORIA	6
AGRADECIMIENTOS	7
RESUMEN	8
CAPÍTULO I: MARCO METODOLÓGICO	
I.1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA	10
I.2 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN	12
I.2.1 Objetivo General	12
I.2.2 Objetivo Específico	12
I.3 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DE HIPOTESIS	12
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	
II.1 GENERALIDADES SOBRE EL DISTRITO MINERO DE COLQUIRI	15
II.1.1 Ubicación y Geomorfología de la Zona	15
II.1.2 Geología del Yacimiento	17
II.1.2.1 Estratigrafía	17
II.1.2.2 Tectónica	18
II.1.3 Estructuras Mineralógicas	19
II.1.3.1 Veta Blanca	19
II.1.3.2 Veta Rosario	19
II.1.3.3 Veta San Antonio	20
II.1.3.4 Vetas San Carlos	20
II.1.4 Composición del Cuerpo Mineralizado	20
II.1.5 Método de explotación del Yacimiento	22
II.1.5.1 Sub Level Stopping	22
II.1.5.2 Rajos Shrinkage	22
II.1.6 Dique de Colas Colquiri	23

II.2 DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM)	25
II.2.1 Definición	25
II.2.2 Generalidades	26
II.2.3 Etapas en el desarrollo del DAM o DAR	27
II.2.4 Química de Reacciones	30
II.2.4.1 Oxidación	30
II.2.4.2 Minerales Sulfurosos	34
II.2.4.3 Neutralización	35
II.2.5 Lixiviación de Metales	37
II.2.6 Calidad del Agua	38
II.2.7 Fuentes del DAR	38
II.2.7.1 Desmonte	40
II.2.7.2 Relaves	41
II.2.7.3 Labores Subterráneas	42
II.2.7.4 Mina a Cielo Abierto	42
II.2.8 Tratamiento Activo Para Drenajes Ácidos de Mina	43
II.2.9 Prueba de Predicción Estática	44
II.2.9.1 Procedimiento de Prueba	45
II.2.9.2 Resultado de Prueba	46
II.2.9.2.1 Potencial Ácido	46
II.2.9.2.2 Potencial de Neutralización	47
II.2.9.2.3 Potencial Neto de Neutralización	47
II.2.9.3 Interpretación de Prueba Estática	48

II.3 ESTABILIDAD DE LOS MINERALES DE LAS ROCAS	49
II.3.1 Orden de Estabilidad	49
II.4 PRINCIPALES PROCESOS DE METEORIZACIÓN	51
II.4.1 Meteorización Química	51
II.4.1.1 Hidrólisis	52
II.4.1.2 Disolución	55
II.4.1.3 Hidratación	58
II.4.1.4 Oxidación	59
II.4.1.5 Carbotación	59
II.4.2 Meteorización Mecánica	60
II.4.2.1 Acción Térmica	60
II.4.2.2 Gelifracción	60
II.5 REGLAMENTO EN MATERIA DE CONTAMINACIÓN HÍDRICA	61

CAPÍTULO III: MARCO PRÁCTICO

III.1 ESTUDIO DEL MANEJO DE DAR DEL DISTRITO MINERO COLQUIRI	67
III.1.1 Balance Hídrico de Colquiri	67
III.1.2 Potencial Neto de Neutralización del Dique de Colas	69
III.1.3 Caracterización del DAR	70
III.1.3.1 Drenaje de Agua Ácida NIVEL -470	73
III.1.3.2 Drenaje de Agua Ácida NIVEL -405	75
III.1.3.3 Drenaje de Agua Ácida NIVEL -365	77
III.1.4 Neutralización-Precipitación del DAR del Nivel -470	79
III.1.4.1 Caracterización Físico – Química del Agua Ácida del Nivel -470	79
III.1.4.2 Pruebas de Neutralización- Precipitación	80

CAPÍTULO IV: MARCO PROPOSITIVO

IV.1 CONSTRUCCIÓN DE PLANTA DE TRATAMIENTO EN EL NIVEL -405	89
IV.2 CAUDAL MINA Y HORARIO DE BOMBEO	91
IV.3 CAUDAL PARA TRATAMIENTO	92
IV.4 CAUDAL REQUERIDO EN EL NIVEL -470	92
IV.5 COMPONENTES DE LA PROPUESTA DE TRATAMIENTO	93
IV.6 EVALUACIÓN ECONÓMICA	94
IV.6.1 COSTO DE INSTALACIÓN	94
IV.6.2 COSTO DE MATERIA PRIMA	94
IV.6.3 COSTO DE MANO DE OBRA	94
IV.6.4 COSTO TOTAL DE INSTALACIÓN Y TRATAMIENTO	94
IV.7 LUGAR DE DISPOSICIÓN DE LODOS EN INTERIOR MINA	95
IV.7.1 TIEMPO DE DURACIÓN DE RAJO DE VETA BLANCA ENTRE NIVEL -405 Y EL NIVEL -470	96
IV.7.2 PROPUESTA DE NUEVO BALANCE HÍDRICO DE COLQUIRI	97

CAPÍTULO V

V.1 CONCLUSIONES	99
V.2 BIBLIOGRAFÍA	100
V.3 ANEXOS	101
ANEXO-1: FOTOS	102
ANEXO-2: BALANCE DE AGUA COLQUIRI	105
ANEXO-3: ANÁLISIS QUÍMICO-SPECTROLAB	107

DEDICATORIA

A Dios que ilumina los pasos de mi vida.

A mis padres Sabina y Darío por traerme al mundo y ser ejemplo de superación y persistencia.

A mi esposa María del Carmen, mis hijas Jhosuné y Geraldine porque siempre están en mis pensamientos y en mi corazón.

AGRADECIMIENTO

Agradezco de manera muy especial al Dr. Ing. Gerardo Zamora E. y al Dr. Ing. Antonio Salas C. quienes en forma desinteresada, han colaborado en la elaboración del presente trabajo.

RESUMEN

La Compañía Minera Colquiri S.A., viene realizando actividades mineras desde Marzo del 2000 en el Distrito Minero Colquiri, bajo un contrato de arrendamiento con la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL).

Toda el agua infiltrada de los niveles superiores y la empleada en cada nivel son transportadas por cunetas hasta tazas de bombeo. A partir del nivel -470 el agua ácida de mina es bombeada a niveles superiores en donde se va mezclando sucesivamente con las aguas de los niveles -405, -365, -325, -285 y -165, obteniéndose finalmente un único drenaje de agua ácida de mina que se evacua por bocamina San Juanillo (nivel -165).

Sin embargo las características geoquímicas del Drenaje Ácido de Mina del nivel -470 no es la misma, debido al poco tiempo de explotación que tiene. El DAM del nivel -470 es menos ácida $\text{pH} = 2.9$ por lo que su tratamiento empleando el método activo de neutralización con Cal es técnicamente más fácil y barato.

El costo total estimado para la instalación de la planta de procesamiento es de 40000 dólares americanos. El costo de materia prima para la neutralización es de cinco mil dólares americanos por año. El costo de mano de obra tres mil seiscientos dólares americanos por año. El costo de operación (energía, mantenimiento) seis mil dólares americanos por año y los gastos administrativos se estiman en mil quinientos dólares americanos por año.

El agua residual final después del tratamiento ($\text{pH}=9.8$) puede ser utilizada nuevamente en interior mina, permitiendo de esta manera eliminar el déficit de agua que se tiene en interior mina e incrementar el caudal para consumo de la población civil.

CAPÍTULO-I

CAPÍTULO I MARCO METODOLÓGICO

I.1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La mina Colquiri fue conocida y explotada de manera subterránea por minerales de Ag y Pb, desde tiempos de la colonia española (antes de 1825). La explotación de Sn y Zn, en pequeña escala, data recién desde fines del siglo pasado. En 1952 la mina Colquiri pasó a formar parte de la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL) y hasta el año 2000 explotó aproximadamente desde el nivel 0 hasta el nivel -325.

En Marzo del 2000 la COMIBOL y COMPAÑÍA MINERA COLQUIRI S.A. firman contrato de arrendamiento para explotar el yacimiento por 30 años. A partir de esta fecha se viene explotando los niveles -365, -405 y -470.

Toda el agua infiltrada de los niveles superiores y la empleada en cada nivel son transportadas por cunetas hasta tazas de bombeo. A partir del nivel -470 el agua ácida de mina es bombeada a niveles superiores en donde se va mezclando sucesivamente con las aguas de los niveles -405, -365, -325, -285 y -165, obteniéndose finalmente un único drenaje de agua ácida de mina que se evacua por bocamina San Juanillo (nivel -165) con las siguientes características geoquímicas:

PARÁMETRO	CANTIDAD
Caudal	12 lt/s
Ph	2.54
SST	298 mg/l
Zinc	2483.99 mg/l
Hierro	3095,09 mg/l
Sulfatos	20800 mg/l

TABLA 1.- Características geoquímicas del DAM en bocamina San Juanillo

Sin embargo las características geoquímicas en los diferentes niveles (-470, -405, -365, -325, -285 y -165) no es la misma, debido a la variación de tiempo de explotación que se tiene en cada una de ellas. El drenaje de agua de los niveles más inferiores serían menos ácidas que el de los niveles superiores por estar menos tiempo en contacto los minerales sulfurosos con el agua y el oxígeno; por lo que su tratamiento sería más fácil y barato.

Por otra parte el trabajo de la minería subterránea requiere gran cantidad de agua y en los últimos años durante el periodo seco de los meses de Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre y Octubre el campamento del Distrito Minero Colquiri está sufriendo déficit de agua, tanto para consumo de la población como para trabajos de interior mina.

Por lo tanto:

¿CUÁL ES EL GRADO DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINA EN LOS NIVELES DE ACTUAL EXPLOTACIÓN DEL DISTRITO MINERO COLQUIRI?

¿QUÉ TIPO DE TRATAMIENTO SE PUEDE EMPLEAR A LAS ÁGUAS ÁCIDAS DE MINA, DE LOS ACTUALES NIVELES DE EXPLOTACIÓN DEL DISTRITO MINERO COLQUIRI, DE MANERA QUE PUEDAN SER EMPLEADAS NUEVAMENTE?

I.2 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

I.2.1 Objetivo General

- Proponer tratamiento diferenciado o selectivo del drenaje ácido de mina de los actuales niveles explotación del distrito Minero Colquiri, en función de sus características geoquímicas como la opción económica y técnica más apropiada para la mina Colquiri.

I.2.2 Objetivo Específico

- Realizar la caracterización físico-química de las aguas ácidas de mina de los niveles – 470, -405 y - 365 (niveles en actual explotación del centro minero Colquiri).
- Analizar y evaluar la procedencia geoquímica de las aguas ácidas de mina.
- Estudiar el tratamiento de las aguas ácidas de mina de acuerdo a su caracterización físico-química

I.3 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

Toda el agua infiltrada de los niveles superiores y la empleada en cada nivel son transportadas por cunetas hasta tazas de bombeo. A partir del nivel -470 el agua ácida de mina es bombeada a niveles superiores en donde se va mezclando sucesivamente con las aguas de los niveles -405, -365, -325, -285 y -165, obteniéndose finalmente un único drenaje de agua ácida de mina que se evacua por bocamina San Juanillo (nivel -165) hasta el dique de colas (Tabla 1).

Sin embargo las características geoquímicas en los diferentes niveles (-470, -405, -365, -325, -285 y -165) no es la misma, debido a la variación de tiempo de explotación que se tiene en cada una de ellas. El drenaje de agua de los niveles más inferiores son menos ácidas que el de los niveles superiores por lo que su tratamiento sería más fácil y barato.

Por lo tanto:

“ EL TRATAMIENTO SELECTIVO POR ALGÚN MÉTODO ACTIVO, DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINA DE LOS ACTUALES NIVELES DE EXPLOTACIÓN DEL DISTRITO MINERO COLQUIRI EN FUNCIÓN DE SUS CARACTERISTICAS GEOQUÍMICAS, PUEDE SER LA OPCIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICAMENTE MÁS APROPIADA PARA EVITAR QUE SE EVACUE DAM INDISCRIMINADAMENTE AL DIQUE DE COLAS ”.

CAPÍTULO-II

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.1 GENERALIDADES SOBRE EL DISTRITO MINERO DE COLQUIRI

La mina Colquiri fue conocida y explotada por minerales de Ag-Pb, desde tiempos de la colonia española. La explotación de Sn-Zn, en pequeña escala, data recién desde fines del siglo pasado. En 1937 La Compañía de minas Colquiri dependiente del grupo minero Hoschild, instaló una planta concentradora gravimétrica para tratar 350 tns/día.

En 1952 la Compañía pasó a formar parte de la COMIBOL, llegando a ser la segunda empresa más importante en el país como productor de Sn-Zn. El año 1986 fueron paralizadas temporalmente sus operaciones de producción, por la vertiginosa caída del precio de estaño, pasando la mina a un período de mantenimiento y rehabilitación. En agosto de 1989, se reactivaron nuevamente sus operaciones, encontrándose en periodo de prueba, el ingenio mecanizado para tratar 1,000 tons/día con minerales de 1.20 % Sn y 6.60% Zn. Por la reducción permanente de personal la producción se redujo hasta 700 tons./día.

El año 2000 la COMIBOL y COMSUR firman un acuerdo de arrendamiento del centro minero de Colquiri por 30 años. Finalmente a partir del año 2005 la Compañía Minera Colquiri S.A. cambia de razón social y actualmente es administrado por la empresa SINCHI WAYRA.

II.1.1 Ubicación y Geomorfología de la Zona

El distrito Minero de Colquiri se encuentra, ubicado en la provincia Inquisivi, al Sud Este del departamento de La Paz, se encuentra entre las siguientes coordenadas:

Latitud Sur 17° 17' 11''

Longitud Oeste 67° 07' 05''



FIG.1.- Ubicación del Centro Minero Colquiri

Está a una altura de 4, 200 m s. n. m. formando parte de la cordillera Oriental (Sta. Vera Cruz) y está conectada por caminos carreteros a la ciudad de Oruro y La Paz; de donde distan 83 y 235 Km. La mayor elevación de este sector lo constituye el cerro Ocavi con una altura aproximada de 4, 415 m s. n. m. y la mayor depresión es la quebrada Chapana con 4, 100 m s. n. m.

Morfológicamente se encuentra, en una alta meseta; ondulada; recortada por el río Colquiri y varios otros riachuelos, que son de poca importancia.

El clima es frío y variable, la vegetación es pobre teniendo así paja brava, thola , etc.

En esta región se observan afloramientos de lutitas arcillosas que predominan en la formación Pampa (Uncia), y areniscas de la formación Catavi; ambas de edad silúrica.

II.1.2 Geología del Yacimiento

II.1.2.1 Estratigrafía

La zona está representada por sedimentos correspondientes al Silúrico superior. Según Alhfeld, Thorman y McNamee se puede diferenciar en sucesión gradacional estratos de la siguiente manera:

Formación Pampa –Uncia.- 1,200 a 2, 100 m de espesor; formado por una sucesión de estratos de lútitas grises que alojan la mineralización, más bancos de lútitas y areniscas pardas.

Formación Catavi.- 400 a 1, 000 m de espesor; conformado por bancos de areniscas pardas y rojas, y esquistos que están individualmente intercalados y su espesor varia de 10 cm a 2.00 m .

Por último existe una cubierta cuaternaria constituido por sedimentos glaciares y coluviales.

II.1.2.2 Tectónica

Está relacionado al movimiento geotectónico regional que afecto a los sedimentos Ordovísicos–Devónico y que tuvieron lugar durante el Cretásico y Terciario inferior. Podemos anotar que los pliegues del distrito se relacionan directamente con los esfuerzos compresivos de dirección NE – SW, pudiendo precisarse varios pliegues que atraviesan todo el yacimiento y los de mayor importancia son:

- a).- El Sinclinal de Colquiri
- b).- El Anticlinal de Colquiri
- c).- El Sinclinal de Vilaque

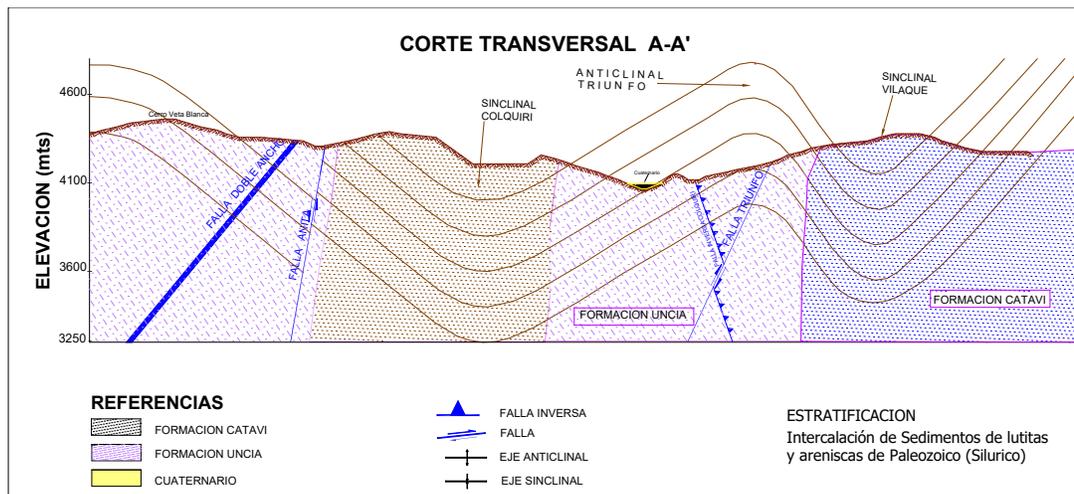


FIG.2.- Pliegues que atraviesan el Centro Minero Colquiri

Los esfuerzos compresivos también han sido causantes para la mineralización para la formación de fallas en la región, observándose fallas con $Az = 45^\circ$, 90° y 135° , con relación a los ejes sinclinales.

II.1.3 Estructuras Mineralógicas:

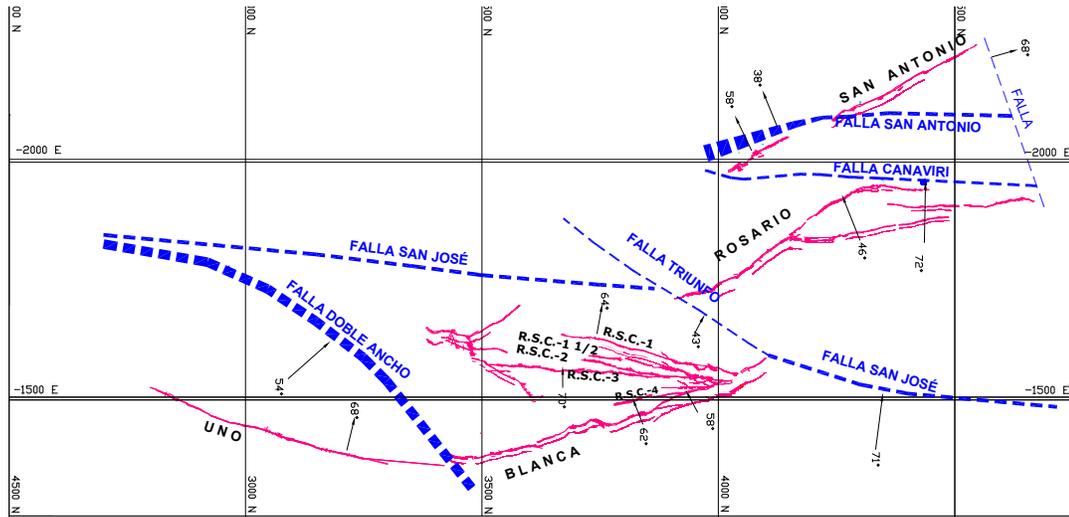


FIG.3.- Fallas y estructuras principales del Centro Minero Colquiri

II.1.3.1 Veta Blanca

Se extiende por unos 800 metros, cuyos extremos norte y sur están definidos por las fallas post mineralización; Doble Ancho y San José. Su afloramiento, conocido como Colorada, presenta mineralización pobre e irregular. Recién a partir del nivel 245, esta veta muestra una mineralización masiva y formal.

II.1.3.2 Veta Rosario

Tiene un largo de 700 metros, se ha explotado por un intervalo vertical de 345 metros, su extremo sur está definido por la falla San José. Se consideraba a la veta Rosario como la extensión desplazada de la veta Blanca por la falla post mineral, San José.

El extremo norte de esta veta ha sido controlado por la falla Canaviri, que la va acuñando hacia profundidad. Su ancho medio es de 1.80 metros y localmente aumenta a 5.0 metros.

II.1.3.3 Veta San Antonio

El contenido de estaño en esta veta es menor que en las vetas Blanca y Rosario pero tiene más altos contenidos de zinc y un alto potencial hacia profundidad

II.1.3.4 Vetas San Carlos

Compuesto por estructuras semi paralelas a la veta Blanca, pero con anchos menores, entre 0.8 a 2.0 metros y con menores contenidos de estaño y zinc.

II.1.4 Composición del Cuerpo Mineralizado

La Marmatita se presenta en cristales Xenomórficos asociado con pirrotina, calcopirita, pirita y también diseminada en ganga. La pirrotina se encuentra; en forma de cristales xenomórficos y asociados en textura de desmezcla con la marmatita.

La casiterita se encuentra en cristales hipidiomórfos a idiomórfos asociados íntimamente con minerales de alta temperatura como pirrotina, pirita, arsenopirita, y en menor grado a la esfalerita. El tamaño de cristales varía desde 30 micrones hasta 5.00 mm y excepcionalmente 10.00 mm.

La siderita se presenta en cristales hipidiomorfos, atravesando y remplazando en parte a la pirita, esfalerita y casiterita, constituyendo la parte masiva de la ganga. La fluorita se encuentra en cristales xenorfoficos asociados con la pirita, casiterita y marmatita.

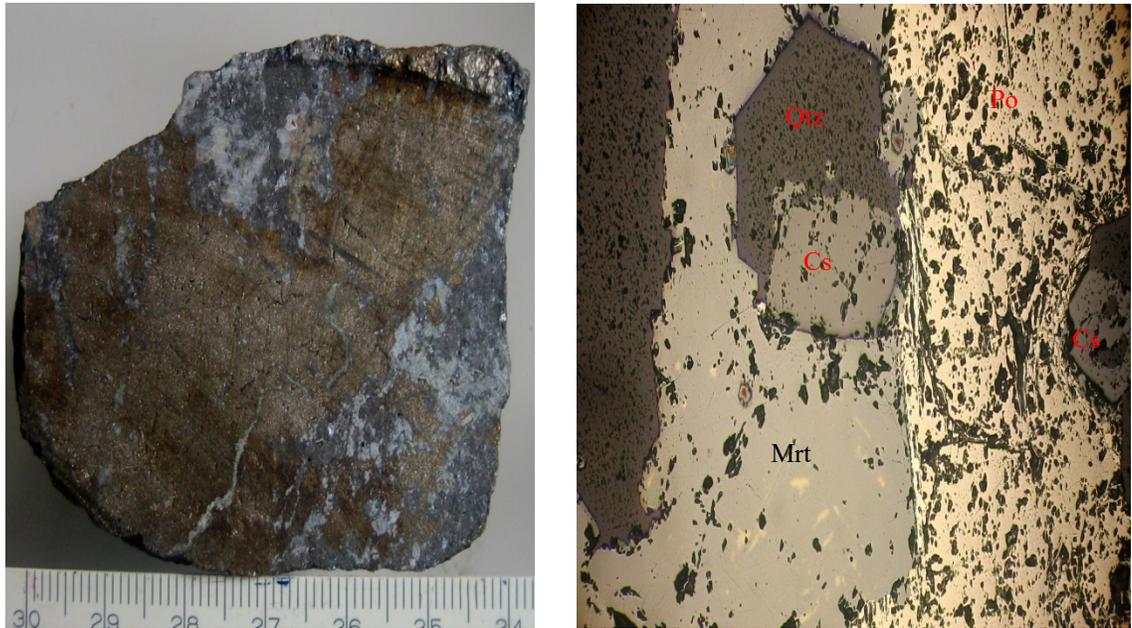


Foto 1 y Foto 2.- Muestra mineralógica del Centro Minero Colquiri (Veta Blanca)

De todo ello podemos establecer la siguiente secuencia de formación de los minerales:

MINERAL	I-FASE	II-FASE	III-FASE	FÓRMULA
CUARZO	▬			Si ₂ O
CASITERITA	▬			SnO ₂
MARMATITA		▬		ZnS
PIRROTINA		▬		FeS
PIRITA		▬		FeS ₂
MARCASITA		▬		FeS ₂
ARSENOPIRITA		▬		FeAsS
CALCOPIRITA		▬		CuFeS ₂
ESTANNINA		▬		Cu ₂ FeSnS ₄
GALENA		▬		PbS
SIDERITA			▬	CO ₃ Fe
FLUORITA			▬	CaF ₂

TABLA 2.- Fases de deposición en el Centro Minero Colquiri

II.1.5 Método de explotación del Yacimiento Colquiri

II.1.5.1 Sub Level Stopping

Es el principal método de explotación, consiste en dividir el cuerpo mineralizado en sectores aptos para el laboreo y posteriormente arrancar el mineral, a partir de subniveles de explotación mediante disparos efectuados en planos verticales, con tiros paralelos y radial, posteriormente quedando vacío el rajo después de la explotación. La cantidad de carga mineralizada que se extrae por día es de 700 ton.

La actual explotación por el método de Sub Level Stopping, con bloques de 40 mts de largo por 40 mts de alto deja espacios vacíos, los mismos que son rellenados en algunos casos con carga estéril producto de los recortes realizados en interior mina. Sin embargo otros sectores quedan sin ser rellenados y ocasionan inestabilidad. Este método inicialmente requiere mucho trabajo de preparación; pero por otro lado la producción es elevada y alcanzable con una inversión muy limitada en personal y maquinaria.

II.1.5.2 Rajos Shrinkage

Los rajos shrinkage o suspensión llamados también rajos acopio, son aquellos que se trabajan de abajo hacia arriba, acumulando parte del material arrancado dentro del espacio abierto por la explotación hasta que el bloque haya sido completamente trabajado. El mineral volado que se deja en el rajo sirve tanto como plataforma de trabajo para la perforación, como de sostenimiento de las paredes del rajo.

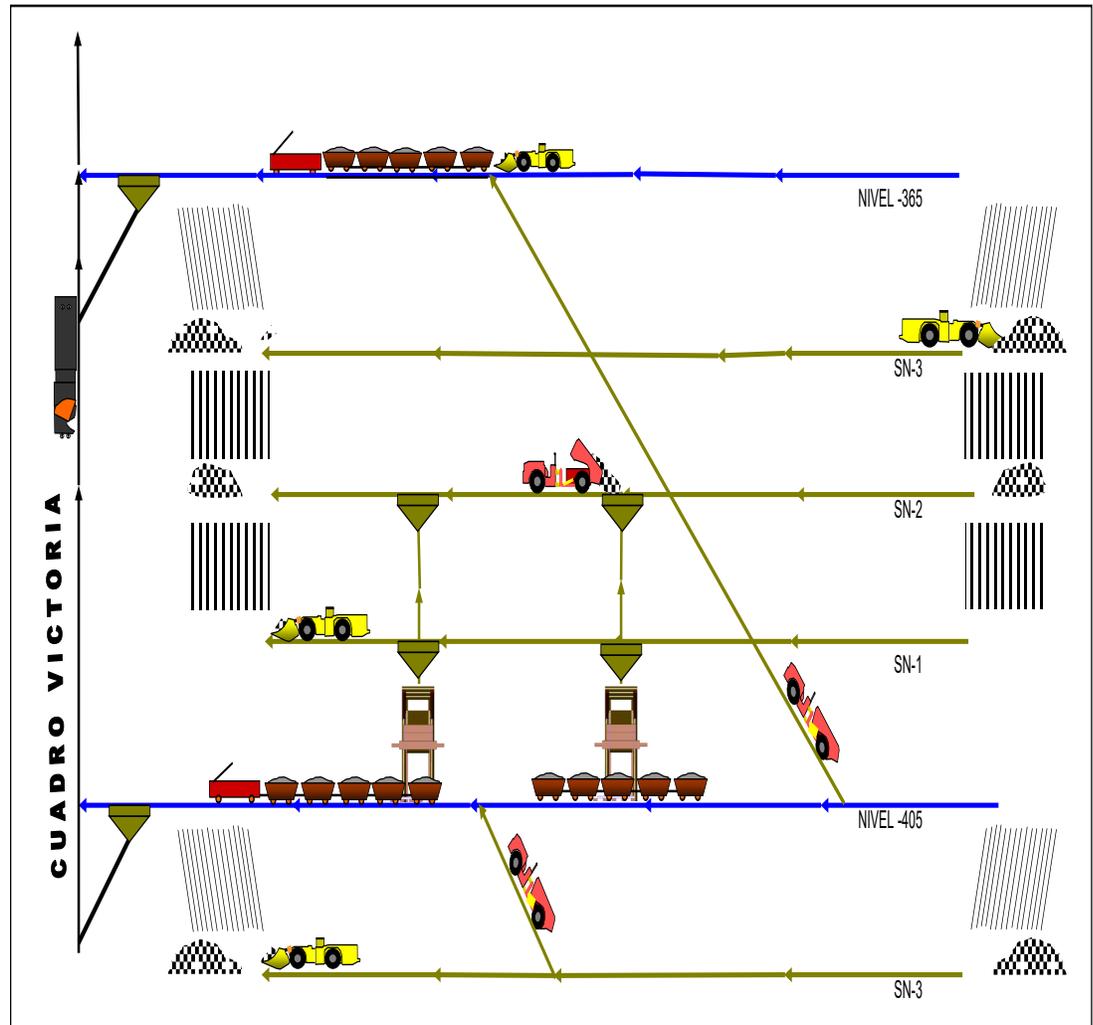


FIG.4.- Explotación S.L.S. en el nivel -405 veta Blanca del Centro Minero Colquiri

II.1.6 Dique de Colas Colquiri

La Compañía Minera Colquiri S.A. viene operando un nuevo dique de colas diseñada para 10 años. El dique está localizado aproximadamente a 2 Km. aguas abajo de la planta de Concentración, sobre el río Totoruma. El inicio de la elevación del dique es sobre el nivel 3920 m.s.n.m. Las colas están dirigidas mediante tuberías de politubo de alta densidad, y la capacidad es de 8,5 millones de toneladas.

El diseño y la supervisión de la construcción del dique fue realizado por Knight Piésold Consulting.

La implementación del Dique de Colas ha tenido los siguientes propósitos:

- Almacenar en forma permanente y segura los relaves de los 10 años de producción en un dique diseñado bajo estándares internacionales.
- Controlar la contaminación aguas abajo del dique debido a eventuales filtraciones.
- Durante la operación, controlar y recuperar el agua del dique para ser usada en la planta.
- Desarrollar la construcción del nuevo dique de colas en etapas, para que el costo final de la inversión sea racionalmente distribuido durante la vida útil del mismo.
- Se tiene instalados sistemas de monitoreo para asegurar que el dique cumpla los criterios de diseño.
- Diseñar un plan de cierre conceptual, para asegurar que no se generará contaminación post-cierre, como por ejemplo por aguas ácidas.

II.2 DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM)

II.2.1 Definición

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.

Hace sólo alrededor de 20 años, se desarrolló una preocupación ambiental asociada con esta agua ácida, rica en metales disueltos, así como el término "drenaje ácido de mina" o DAM. No obstante, el drenaje ácido no ocurre únicamente en las minas, por lo que el término "drenaje ácido de roca" o DAR también es usado comúnmente.

Cualquiera sea el término empleado -DAM o DAR- el drenaje ácido se refiere a: 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 del DAR es un proceso dependiente del tiempo que involucra procesos de oxidación tanto química como biológica y fenómenos físico-químicos.

Es importante reconocer que la definición se refiere al drenaje contaminado. El desarrollo del clásico DAR de pH bajo y rico en metales es un proceso que depende del tiempo. A lo largo del tiempo, la química del agua de drenaje cambiará, volviéndose gradualmente más ácida, con concentraciones crecientes de metales. Sin embargo, el DAR se refiere a todo drenaje contaminado como resultado de los procesos de oxidación y lixiviación de los minerales sulfurosos. Con el tiempo las características del drenaje pueden cambiar, de ligeramente alcalino hasta casi neutro y finalmente ácido.

El término drenaje contaminado (DAR) se refiere al agua de drenaje que contiene niveles de cualquier elemento o contaminante que no se encuentra dentro de los límites reglamentarios para el agua que drena de un sitio minero, o que podría ocasionar un

impacto ambiental adverso. Por lo general, este drenaje contaminado puede incluir, pero sin limitarse a ello, lo siguiente:

- . pH, acidez, alcalinidad;
- . sulfatos;
- . nutrientes;
- . metales (disueltos o totales);
- . núclidos radiactivos;
- . sólidos disueltos totales (SDT); y
- . sólidos suspendidos totales (SST).

Generalmente el DAR se caracteriza por:

- . valores de pH por debajo de 7 hasta 1.5
- . alcalinidad decreciente y acidez creciente
- . concentraciones elevadas de sulfato
- . concentraciones elevadas de metales (disueltos o totales)
- . concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales

II.2.2 Generalidades

La generación de ácido es originada por la oxidación de los minerales sulfurosos cuando son expuestos al aire y agua, lo cual da por resultado la producción de acidez, sulfatos y la disolución de metales. 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.

El proceso mediante el cual se consume ácido se denomina "neutralización". Teóricamente, cada vez que la capacidad consumidora de ácido de una roca ("potencial de neutralización") excede al potencial de generación de ácido, se consumirá toda la acidez y el agua que drene de la roca se encontrará en el nivel de pH neutro o cerca de él. El drenaje ácido generado por la oxidación de sulfuros puede neutralizarse por contacto con minerales consumidores de ácido. Como resultado de ello, el agua que drena de la roca puede tener un pH neutro y una acidez insignificante, a pesar de la continua oxidación de sulfuros.

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.

II.2.3 Etapas en el desarrollo del DAM o DAR

El desarrollo del drenaje ácido de roca es un proceso que depende del tiempo y comprende tanto reacciones químicas de oxidación como fenómenos físicos relacionados. En algunos sitios mineros, el drenaje ácido se detecta desde el principio de las operaciones. En otros, han pasado de 10 a 40 años antes de que se observe drenaje ácido. En estos sitios, las reacciones de oxidación de sulfuros y generación de ácido probablemente estuvieron ocurriendo durante el intervalo de retardación previo a la medición del agua de drenaje, pero en una baja proporción y con neutralización de los productos de oxidación.

Generalmente, se le observa como un proceso en tres etapas, definidas por el pH del agua en el microambiente de los minerales sulfurosos. Con frecuencia, las siguientes descripciones son usadas para comprender la naturaleza del DAR dependiente del tiempo y para la interpretación del DAR en el campo.

Etapa I. La acidez es generada y rápidamente neutralizada en las etapas iniciales cuando la roca que contiene minerales sulfurados es expuesta al oxígeno y al agua. El drenaje de agua es casi neutro. Mientras se produce la oxidación de los minerales sulfurosos, existe suficiente alcalinidad disponible como para neutralizar la acidez y precipitar el hierro en forma de hidróxido.

La Etapa I, es fundamentalmente un período de oxidación química. El oxígeno es el oxidante principal, al producir sulfato y acidez a partir de la oxidación de los minerales sulfurosos. Los minerales carbonatados, como la calcita (CaCO_3) presente en la roca, neutralizan esta acidez y mantienen condiciones que van de neutras a alcalinas ($\text{pH} > 7$) en el agua que fluye sobre la roca.

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. De esta manera, la velocidad de oxidación química de la pirita es relativamente baja, comparada con las etapas posteriores de oxidación, ya que el hierro férrico no contribuye como oxidante.

En esta etapa, el agua de drenaje se caracteriza generalmente por niveles elevados de sulfato, con pH cercano al neutro. El ácido producido es neutralizado mientras que el hierro férrico se precipita en forma de hidróxido. Si existen minerales de zinc asociados con los sulfuros de hierro, también podrían detectarse concentraciones elevadas de zinc en la solución.

Etapa II. A medida que continúa la generación de ácido y se agotan o se vuelven inaccesibles los minerales carbonatados, el pH del agua disminuye y el proceso se encamina hacia su segunda etapa. Cuando el pH del microambiente disminuye hasta 4.5, ocurren reacciones de oxidación tanto químicas como biológicas.

A medida que la velocidad de generación de ácido se acelera en las etapas II y III, el pH disminuye progresiva y gradualmente. Los niveles de pH relativamente constantes representan la disolución de un mineral neutralizante que se vuelve soluble a ese nivel de pH. Si la oxidación continúa hasta que se haya agotado todo el potencial de neutralización, se presentarán valores de pH por debajo de 3.5.

En esta etapa, el agua de drenaje está generalmente cerca al nivel neutro, con concentraciones elevadas de hierro ferroso y sulfato. Se observa una acidez relativamente alta, aún cuando las concentraciones de metales en la solución puedan ser bajas.

Etapa III. A medida que los minerales alcalinos se consumen o recubren, o bien, se produce acidez a mayor velocidad que alcalinidad, el pH se vuelve ácido. Las reacciones dominantes se transforman de oxidación química a principalmente oxidación biológicamente catalizada. De las reacciones de oxidación sulfurosa, se produce hierro ferroso, que se oxida biológicamente y se convierte en hierro férrico. Este, a su vez, reemplaza el oxígeno como el oxidante principal.

En esta etapa, la velocidad de oxidación es considerablemente más rápida que en la Etapa I. El descenso del pH incrementa la velocidad de oxidación. No hay estudios científicos definitivos para cuantificar la aceleración de las velocidades de oxidación debido a la oxidación catalizada biológicamente; sin embargo, en la literatura existen informes sobre la observación del aumento de velocidades de 10 a un millón de veces más que aquellas generadas por oxidación química.

El agua de drenaje es generalmente ácida, caracterizada por sulfatos y metales disueltos en concentraciones elevadas. El hierro disuelto se presenta como hierro ferroso y férrico.

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. El tiempo para cada etapa sucesiva puede variar de un período de días a un período de cientos de años, dependiendo de los factores que controlen la generación de ácido.

Dependiendo de la etapa en el proceso de oxidación se determinará la tecnología apropiada para la vigilancia y el control. En la etapa I, puede ser factible el control de las condiciones necesarias para las reacciones de generación de ácido. Se puede prevenir el impacto del drenaje contaminado sobre el ambiente mediante un control efectivo del proceso de oxidación, eliminando el reactante principal necesario para que se produzca la reacción (es decir, el oxígeno). El monitoreo se centrará en los parámetros indicadores del inicio del DAR: sulfato, bicarbonato, hierro ferroso, zinc, etc.

Una vez que se establecen las reacciones de generación de ácido (Etapas II y III), el hierro férrico se convierte en el principal oxidante. En esta etapa, la oxidación está bien establecida y el control del DAR requiere la eliminación del mecanismo de transporte, con el fin de evitar que el contaminante sea liberado en el ambiente (es decir, el agua).

II.2.4 Química de Reacciones

II.2.4.1 Oxidación

La generación y el consumo de ácido son el resultado de una serie de reacciones químicas complejas e interrelacionadas. Los factores que controlan la velocidad y la magnitud de la generación de ácido, y la consiguiente calidad del agua de drenaje, sólo han sido estudiados en detalle durante los últimos 20 años. La comprensión de estos factores, así como de los procesos químicos y de los reactantes involucrados, constituyen la clave para la predicción del potencial de generación de ácido en una muestra de roca; del mismo modo, es fundamental para identificar la tecnología apropiada, que sirva para prevenir o controlar la generación de drenaje ácido.

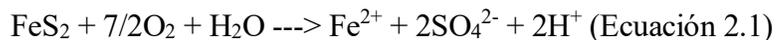
Los componentes principales para la generación de ácido son:

- . minerales sulfurosos reactivos;
- . agua o atmósfera húmeda; y
- . un oxidante, especialmente el oxígeno de la atmósfera o de fuentes químicas.

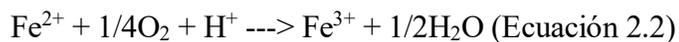
La velocidad y la magnitud de la generación de ácido son afectadas por los siguientes factores secundarios:

- . bacterias (*Thiobacillus ferrooxidans*)
- . pH
- . temperatura

Las reacciones de generación de ácido se expresan generalmente como la oxidación de la pirita, uno de los minerales sulfurosos más comunes. Inicialmente, los sulfuros reaccionan con el oxígeno y el agua para formar sulfato (SO_4^{2-}), hierro ferroso (Fe^{2+}) e iones de hidrógeno (H^+). Esta reacción total de generación de ácido, en la que se muestra la pirita siendo oxidada por el oxígeno, puede representarse por la siguiente ecuación:



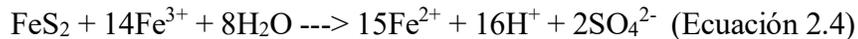
Posteriormente, el hierro ferroso reacciona con el oxígeno para formar hierro férrico:



Dependiendo del pH en el ambiente alrededor del sitio de oxidación, el hierro férrico puede luego precipitarse en la forma de hidróxido (Ecuación 2.3), o puede, a su vez, ser utilizado como oxidante (Ecuación 2.4). A niveles de pH por encima de 3.5, el hierro férrico (Fe^{3+}) tiende a precipitarse como hidróxido férrico. Esto forma el precipitado rojo que se observa en la mayoría de minas que generan ácido. Durante esta reacción, se liberan iones de hidrógeno adicionales.



A medida que se desarrolla la generación de ácido y se consume la alcalinidad disponible, el hierro férrico, a su vez, sirve como oxidante y puede promover la oxidación química de los minerales sulfurosos. En el caso de la pirita, la reacción que ocurre es la siguiente:



La oxidación química de la pirita (Ecuación 2.1) es una reacción relativamente rápida a valores de pH mayores que 4.5, pero mucho más lenta a niveles de pH más ácidos. La velocidad del suministro de oxígeno es el elemento que controla principalmente la velocidad de la oxidación química. A niveles de pH inferiores a 4.5, la oxidación por el hierro férrico se convierte en el proceso de oxidación dominante. La velocidad de producción de hierro férrico, a partir del ferroso (Ecuación 2.2), se convierte en la etapa controlante del proceso total de oxidación. Sin embargo, por catálisis biológica, esta reacción es relativamente rápida.

Por lo general, se reconoce que ciertas bacterias pueden acelerar la velocidad con la cual ocurren algunas de las reacciones anteriormente indicadas, incrementando con ello la velocidad de generación de ácido. La bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* es capaz de oxidar compuestos de azufre reducidos, así como oxidar el hierro ferroso en férrico (que entonces puede actuar como oxidante). Otras bacterias conocidas como participantes o acelerantes de la oxidación de los minerales sulfurosos son: *Thiobacillus thiooxidans* y *Sulfolobus*. La velocidad con la cual ocurre la oxidación bacteriana depende de los siguientes parámetros:

- . temperatura
- . pH
- . disponibilidad de oxígeno
- . disponibilidad de CO₂ (fuente de carbono para la reproducción de las células)
- . nutrientes (N,P)
- . área superficial del mineral sulfuroso expuesto

En general, las velocidades de oxidación se aceleran con un incremento de temperatura. Como regla empírica, las velocidades de reacción pueden duplicarse por cada 10oC de aumento de temperatura. El proceso de oxidación del sulfuro es exotérmico, genera calor y aumenta la temperatura en el sitio de la reacción. Se han registrado temperaturas superiores a los 50°C en pilas de desmonte en oxidación, ubicadas en regiones cuya temperatura de aire ambiental es menor a 5°C.

Por tanto, la oxidación continua puede crear condiciones ideales para el crecimiento de las bacterias oxidantes. La producción de H⁺ y la consiguiente disminución del pH, hasta un nivel adecuado para las bacterias que oxidan el sulfato y el hierro, la producción de hierro férrico y el aumento de temperatura debido al proceso de oxidación exotérmico, dan por resultado unas condiciones idealmente adecuadas para estas bacterias. Una vez

establecidas, las velocidades de oxidación bacteriamente catalizadas son lo suficientemente altas como para mantener condiciones de temperatura elevada y pH bajo. A temperaturas bajas, la velocidad de oxidación, tanto biológica como química, es mucho más reducida de lo que podrían ser a temperaturas ambientales. Por debajo de los 4°C, las velocidades de oxidación se consideran insignificantes.

II. 2.4.2 Minerales Sulfurosos

Los minerales sulfurosos más comunes, considerados como fuente de DAR, son los minerales de hierro, en forma especial, la pirita (FeS_2), pirrotina ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}_x$) y marcasita (FeS_2).

Dependiendo de la forma y de la estructura cristalina del mineral, como éste se presenta en el yacimiento, se observarán diferentes velocidades de oxidación. Por lo general, la marcasita, pirrotina y la pirita framboidal se oxidarán más rápidamente.

Los cristales minerales con una superficie menor, como la pirita "euhedral" de grano grueso, se oxidan más lentamente.

Todo mineral sulfuroso tiene el potencial de oxidarse y lixiviar metales. Los minerales de metales bases, tales como calcopirita (CuFeS_2), enargita (Cu_3AsS_4), galena (PbS), esfalerita (ZnS) y arsenopirita (FeAsS), pueden encontrarse asociados a cuerpos mineralizados.

La oxidación y lixiviación de los minerales, generalmente como resultado de la generación de ácido a partir de los minerales de sulfuro de hierro asociados, pueden dar como resultado la liberación de acidez y metales disueltos en el agua de drenaje.

II.2.4.3 Neutralización

Después de la oxidación de un mineral sulfuroso, los productos ácidos resultantes pueden ser:

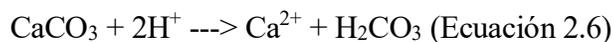
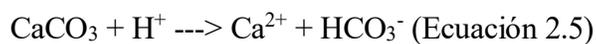
- . inmediatamente arrastrados por la infiltración de agua; o
- . extraídos de la solución, como resultado de la reacción con un mineral que consuma ácido.

Existe una serie de minerales que pueden consumir acidez y neutralizar el drenaje ácido.

Entre los minerales que consumen ácido se encuentran:

- . carbonatos (calcita)
- . hidróxidos (limonita)
- . silicatos (clorita)
- . arcillas

El mineral más común que consume ácido es la calcita (CaCO_3), que consume acidez a través de la formación de bicarbonato (HCO_3^-) o ácido carbónico (H_2CO_3):

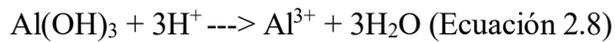


Generalmente, es el más reactivo de los minerales consumidores de ácido y, a diferencia de la mayoría de éstos, tiende a ser más soluble a temperaturas más bajas. La liberación de bicarbonato y carbonato a través de la disolución de la calcita puede resultar en la formación de minerales carbonatados secundarios, siderita (FeCO_3), mediante:



Este mineral también puede estar presente como mineral principal en la roca. Es menos soluble que la calcita, tendiendo a amortiguar el pH en el rango de 4.5 a 6.0. La calcita tiende a neutralizar soluciones llevándolas hasta un pH entre 6.0 y 8.0.

Los siguientes minerales que proporcionan alcalinidad, luego del consumo de los minerales carbonatados, generalmente son los hidróxidos, los cuales consumen acidez mediante la formación de un ión libre más agua, como se muestra en la ecuación 2.8, por ejemplo, para $\text{Al}(\text{OH})_3$:



La mayoría de rocas contendrán tanto minerales sulfurosos como minerales consumidores de ácido. La relativa cantidad y la reactividad de los dos tipos determinarán si la roca producirá finalmente condiciones ácidas en el agua que pasa sobre y a través de ella.

Las reacciones de neutralización eliminarán una porción de la acidez y el hierro de la solución, elevando el pH. Donde hay suficiente tiempo de contacto con los minerales consumidores de ácido, puede ocurrir la neutralización hacia un pH de 7. Bajo condiciones de pH neutro, la mayoría de metales presenta baja solubilidad y precipitan de la solución en forma de hidróxidos u óxidos metálicos. Sin embargo, algunos metales, como el zinc, arsénico y molibdeno, son tan solubles -o más solubles- bajo condiciones alcalinas que bajo condiciones ácidas. Los iones de sulfato también son químicamente estables en un amplio rango de pH. En consecuencia, las concentraciones de sulfato algunas veces pueden servir como indicador general de la magnitud de la generación de ácido, incluso después de que la neutralización se ha producido.

II.2.5 Lixiviación de Metales

La naturaleza mineralógica y el ambiente químico de la roca determinarán el comportamiento geoquímico de diferentes tipos de roca. La solubilidad de los diversos metales, contenidos en los minerales que se encuentran en la roca, depende de la forma en la que éstos (minerales) están presentes en la misma. La solubilidad de muchas formas metálicas aumenta a medida que el pH disminuye hacia niveles por debajo del neutro (pH 7). En dichos metales, la solubilidad aumenta con cada nivel de disminución en el pH. De manera inversa, a medida que el pH aumenta a lo largo de una ruta (debido a aumentos de nivel en el pH), algunos de los metales en solución pueden precipitarse. En ciertos casos, el drenaje contaminado también servirá como lixiviante, promoviendo la disolución de los minerales oxidados que, por lo general, pueden ser inertes o presentar baja solubilidad. Por ejemplo, la generación de hierro férrico puede servir para oxidar ciertos minerales de uranio, aumentando así la solubilidad del uranio y su velocidad de lixiviación.

En muchos depósitos, estos metales se presentan principalmente como sulfuros, que incluyen calcopirita, pirita, arsenopirita, galena y esfalerita. Ya que los minerales sulfurosos de estos metales tienden a ser difícilmente solubles en condiciones de pH neutro, la movilización requerirá de oxidación y reducción de los niveles de pH. Una vez movilizados, algunos de estos metales pueden ser redepositados como hidróxidos de metal bajo condiciones de pH neutro, si incrementa el pH. Bajo condiciones de oxidación ácida se esperan altos porcentajes de lixiviación con elevadas concentraciones de metales en la solución.

En otras zonas de mineralización, los metales asociados con minerales de cobre y oro tienden a presentarse en un estado de mayor oxidación, con algunos metales en forma de sulfo-sales. Por lo tanto, bajo condiciones de pH neutro, la solubilidad de estos metales será dictada por la solubilidad de los óxidos e hidróxidos de los metales.

II.2.6 Calidad del Agua

Es importante reconocer que la acidez y el pH bajo no son factores críticos en la definición de "drenaje contaminado" o DAR. Más bien, la preocupación fundamental la constituyen los elevados niveles de metales disueltos. Por ejemplo, el agua de drenaje que proviene de la oxidación de minerales sulfurosos de una roca que aloja carbonatos puede ser casi neutra, pero puede contener niveles elevados de metales solubles en pH neutro a alcalino, tal como el zinc. Este último metal es lixiviado de las rocas del entorno hacia el agua de drenaje ácido, a pesar de que las reacciones a lo largo de la ruta de flujo del drenaje neutralicen la acidez contenida. Entonces, es posible detectar zinc disuelto en solución, incluso en un pH casi neutro.

La preocupación fundamental en cuanto al DAR se debe a su potencial impacto adverso sobre la flora y fauna del ambiente acuático receptor y, en menor grado, a los riesgos que supone para la salud humana. Los peces y otros organismos acuáticos son más sensibles que los seres humanos a los niveles elevados de la mayoría de metales. Esta sensibilidad se ve reflejada en muchos de los reglamentos internacionales.

II.2.7 Fuentes del DAR

Los minerales sulfurosos están en todas partes en el ambiente geológico, pero se encuentran principalmente en rocas que yacen debajo de una capa de suelo y, a menudo, debajo de la napa freática. Bajo condiciones naturales, el suelo que cubre la roca y el agua subterránea minimizan el contacto con el oxígeno, permitiendo así que la generación de ácido prosiga a una velocidad tan baja que el efecto sobre la calidad general del agua será insignificante o indetectable. La exposición de roca sulfurosa reactiva al aire y al agua, como resultado de actividades tales como la construcción de carreteras o explotación minera, puede acelerar la velocidad de generación de ácido y ocasionar un impacto en el ambiente.

En un sitio minero, las fuentes primarias de drenaje ácido son las áreas en las cuales la roca de mina ha sido disturbada, y la superficie expuesta. Entre las fuentes principales del DAR están:

- . las pilas de desmonte
- . las pilas de lixiviación
- . los embalses de relaves
- . las labores mineras subterráneas
- . las minas a cielo abierto
- . la roca de construcción -relleno, represas, carreteras.

Además, el drenaje ácido de roca puede ocurrir en otras áreas del sitio minero, las cuales contienen generalmente menor volumen de roca, pero que deberían considerarse en la evaluación del lugar, por ejemplo:

- . Derrames de concentrados y relaves
- . Almacenamiento de concentrados e instalaciones de descarga
- . Apilamiento de mineral
- . Superficies de roca expuestas al cortar rocas para carreteras, etc.
- . Caminos por los cuales pasan camiones o ferrocarriles con concentrados

Es de fundamental importancia identificar todas y cada una de las fuentes potenciales de drenaje ácido de mina, tanto en el diseño como en la operación de cada sitio minero.

II.2.7.1 Desmonte

Los términos "desmonte" o "roca de mina" generalmente se emplean para hacer referencia a la sobre capa y rocas que deben extraerse para ganar acceso al mineral. La mayor parte de desmonte se produce en la explotación de minas a cielo abierto, generalmente con una proporción entre tonelaje de material estéril y tonelaje de mineral - "stripping ratio"- de 2:1 ó 3:1. Esta relación hace referencia al tonelaje de desmonte extraído por tonelada de mineral; por consiguiente, en una relación de 2:1, se extraen 2 toneladas de desmonte por cada tonelada de mineral. No obstante, cantidades menores de desmonte o escombros pueden producirse a partir del desarrollo de obras subterráneas.

Generalmente, esta roca es almacenada en la superficie, en grandes pilas o botaderos de desmonte. Esta roca también puede utilizarse para construcciones en el lugar; como relleno para la construcción de cimientos, especialmente en terreno montañoso, para la construcción de carreteras, represas, etc.

Estos botaderos de desmonte son, generalmente, mezclas de material proveniente de diferentes áreas de explotación o desarrollo minero. Los botaderos, por lo común, están constituidos por rocas gruesas y se almacenan sobre la napa freática. De este modo, cualquier mineral sulfuroso reactivo queda expuesto al aire y al agua que pasan por el botadero, inmediatamente después de haber sido depositado allí. Las reacciones de generación de ácido pueden iniciarse en cualquier lugar del botadero, y generalmente se producen en varios sitios.

La química del agua de drenaje proveniente del botadero dependerá tanto de la mineralogía de la roca en la fuente del DAR, como también de las reacciones con las diferentes rocas a lo largo de la ruta del flujo. Dado que toda pila de rocas o botadero puede estar compuesta por una mezcla de tipos de roca, puede surgir agua de química muy diferente de cada una de las diferentes áreas del mismo botadero.

II.2.7.2 Relaves

El desarrollo de DAR en un embalse de relaves es generalmente muy limitado durante la operación y se desarrolla lentamente a lo largo del tiempo, después que haya cesado la acumulación en el embalse. La ocurrencia de las reacciones de oxidación está limitada por la acumulación continua de capas frescas de relaves saturados y alcalinos durante la operación. Después de que se ha concluido la acumulación y los relaves empiezan a drenar, de manera que los sulfuros se exponen al oxígeno, en ese momento comienza la oxidación.

Dado que las reacciones de oxidación requieren tanto de oxígeno como de agua, la generación de ácido por lo general comienza en la superficie y en los lados de la represa, que son los primeros en drenar. Así, la oxidación se inicia en la superficie de la represa y progresa en profundidad, a medida que los relaves drenan y la napa freática se mueve hacia el fondo del depósito. El secado y resquebrajamiento de la superficie de los relaves puede aumentar el suministro de oxígeno hacia los relaves que están en profundidad y mejorar la oxidación más profunda.

Inicialmente, el drenaje contaminado puede ser detectado en la escorrentía superficial proveniente de los relaves. Con el tiempo, a medida que el frente de oxidación progresa a más profundidad dentro de los relaves, y a medida que el drenaje contaminado reemplaza al agua del proceso, el DAR puede detectarse a partir de la base del depósito o en el agua subterránea.

La velocidad a la cual progresa el DAR a través de los relaves depende tanto de los controles en la química del agua, como de los controles físicos en el flujo de agua (permeabilidad y pendiente hidráulica). Pueden pasar años o décadas antes de que pueda detectarse el DAR en las filtraciones provenientes de la base de los relaves.

II.2.7.3 Labores Subterráneas

Las labores subterráneas pueden ser una fuente considerable de DAR, especialmente en labores antiguas. Las paredes expuestas se encuentran usualmente en áreas mineralizadas y, por tanto, tienen contenidos de metal más elevados que el desmonte. Además, toda roca sulfurosa rota, como parte de las labores subterráneas ejecutadas por el método de explotación minera (técnicas de excavación), como resultado del colapso y hundimiento en labores antiguas, o debido al relleno, puede generar una extensa área superficial de roca quebrada que, a su vez, puede producir DAR.

La fuente de agua de las labores subterráneas es usualmente una combinación de agua subterránea e infiltración de la superficie. Los ductos de ventilación o las construcciones subterráneas, tales como los conductos de extracción tipo embudo, pueden originar la continua inundación de las obras.

II.2.7.4 Mina a Cielo Abierto

Las operaciones en minas a cielo abierto generalmente no descargan agua durante su operación, excepto durante el secado y bombeo de la mina, por eso es algo más sencillo controlar la calidad del agua de descarga de minas a cielo abierto que de las labores subterráneas. La experiencia demuestra que el potencial para la generación de ácido durante la operación, puede limitarse mediante el mantenimiento de paredes competentes "limpias", con poca roca quebrada o material suelto en los bancos. La roca quebrada presenta un área superficial más amplia y, por ello, carga potencial más elevada que las paredes expuestas de la mina.

La inundación de la mina, luego del cierre de la misma, controlará finalmente toda generación adicional de ácido, a pesar de que pueda haber oxidación y drenaje durante el

llenado de la cantera y, nuevamente, pueda ocurrir un acarreamiento de productos solubles. La mina a cielo abierto también puede emplearse para la disposición de relaves o de rocas de mina de la superficie, debajo de una capa de agua. La predicción de la carga contaminante de las paredes de la mina y de cualquier roca adicional colocada dentro de ella, exige comprender la magnitud de la generación de ácido y de la lixiviación/almacenamiento de metales dentro de la roca.

II.2.8 Tratamiento Activo Para Drenajes Ácidos de Mina

La corrección de aguas ácidas de mina puede realizarse por dos tipos de tratamiento: tratamiento activo y tratamiento pasivo.

El tratamiento activo emplea los métodos ortodoxos, que precisan el uso de reactivos sintéticos, impulsados por energía externa y sedimentación intensificada. Los métodos de tratamiento activos de aguas ácidas tienen un coste elevado, por lo que no pueden ser mantenidos por un período prolongado una vez finalizada la vida de la mina. Máxime teniendo en cuenta que el problema de las aguas ácidas puede perdurar, según las estimaciones de Younger (1997), varios cientos de años.

El método activo más común es la precipitación con una base hidróxido, de modo de neutralizar el agua ácida y precipitar los iones como hidróxidos, por ejemplo As y Sb forman precipitados estables con Fe(III) o Ca. CaO o Ca(OH)₂ son los más comunes agentes neutralizantes.

También se puede precipitar los hidróxidos de los iones metálicos subiendo el pH a valores entre 8.5-9.5. Esta tecnología la cual es ampliamente utilizada genera lodos con baja densidad conteniendo 2-5% de sólidos.

Los lodos resultantes de la neutralización conteniendo sulfato de calcio, hidróxidos, arseniatos y antimoniatos deben ser dispuestos por largo tiempo. Dos factores son de gran importancia: la estabilidad y la densidad. La estabilidad es una medida del potencial de redisolución de algunos de sus componentes luego de interactuar con el ambiente y la densidad es un factor crucial para el almacenamiento. Los componentes de los lodos son insolubles bajo las condiciones producidas, sin embargo, estos se pueden solubilizar cuando estos se exponen a aguas con bajo pH.

La presencia de iones complejantes, como cloruro, cianuro o iones orgánicos, puede aumentar la solubilidad de iones metálicos. Estudios realizados en Canadá indican que los lodos se van secando con el tiempo, por lo que su lixiviabilidad (iones) disminuiría.

II.2.9 Prueba de Predicción Estática

El objetivo de la prueba estática es caracterizar el potencial de generación de ácido de una muestra. Es el primer paso en todo programa de pruebas para determinar el potencial DAR. Estas pruebas se conducen de manera simple, rápida y con costos relativamente bajos. Muchas de estas pruebas pueden utilizarse para caracterizar el material y, a partir de ello, para seleccionar muestras que servirán para pruebas (cinéticas) posteriores.

Una prueba estática define el balance entre los minerales potencialmente generadores de ácido y aquellos potencialmente consumidores de ácido en una muestra. Los minerales que producen ácido son, por lo general, minerales sulfurosos reactivos.

Los minerales que consumen ácido son principalmente carbonatos, si bien los hidróxidos, silicatos y arcillas también pueden proporcionar potencial de neutralización. En teoría, una muestra será generadora neta de ácido sólo si su potencial para la generación de ácido excede a su potencial de neutralización.

II.2.9.1 Procedimiento de Prueba

Los principales pasos en la prueba estática son:

- . análisis del contenido metálico de la muestra sólida;
- . medición del pH en pasta
- . determinación del contenido total de azufre y de las especies sulfurosas;
- . titulación para la determinación del potencial de neutralización.

En esta etapa, con frecuencia, también se efectúan análisis geoquímicos de rocas enteras o análisis elementales en muestras seleccionadas, en combinación con los análisis mineralógicos. Sobre la base de la comprensión teórica y de pruebas en muestras similares, puede ser posible estimar, a partir de estas pruebas, el potencial relativo de liberación de metales; por ejemplo, si hay presencia de productos secundarios de intemperismo, los cuales se sabe que son solubles en ambientes ligeramente alcalinos o ácidos, la muestra podría generar potencialmente drenaje contaminado.

Inicialmente, se mide el pH en pasta de la muestra, para determinar si antes del análisis ha ocurrido generación de ácido. Por lo general, si el valor del pH es mayor que 8, la muestra probablemente contenga carbonatos reactivos; si es menor que 5, probablemente haya habido generación de ácido en la muestra, o en el material circundante.

En una muestra, se mide el contenido total de azufre y las especies sulfurosas; luego, se calcula la acidez potencial máxima en la forma de ácido sulfúrico. Por lo común, el total de azufre se analiza utilizando un horno para determinar azufre tipo Leco. Las especies de azufre se precisan usando diferentes procedimientos de digestión y precipitación (APHA, 1985).

El potencial de neutralización se determina utilizando un procedimiento de titulación básico en una muestra previamente acidificada. En primer lugar, se realiza una "prueba rápida" para estimar la cantidad y la fuerza del ácido necesario para reaccionar con todos los materiales consumidores de ácido presentes en la muestra. En el procedimiento EPA (Sobek et al, 1978), se trata la muestra con un excedente de ácido clorhídrico estandarizado, luego se la calienta para asegurar la reacción completa. Se ha sugerido una modificación del procedimiento, en la cual la muestra no se calienta, sino que se agita por 24 horas. Después de que se haya completado la acidificación, se titula el ácido que no ha sido consumido con una base estandarizada a un pH 7 (por lo general, en dos o tres etapas), luego se calcula el equivalente de carbonato de calcio del ácido consumido.

El procedimiento para pruebas estáticas más comúnmente usado es el de ácido-base (Sobek), o el procedimiento modificado para prueba de balance ácido-base (BAB). Cada uno de ellos determina los minerales potencialmente generadores de ácido (expresados como potencial de acidez máxima, PA) y los minerales potencialmente consumidores de ácido (expresados como potencial de neutralización PN).

II.2.9.2 Resultados de Prueba

El pH en pasta de la muestra proporciona una indicación de la acidez total almacenada en ésta y la extensión en la que ha ocurrido la oxidación en la muestra, antes del análisis.

II.2.9.2.1 Potencial Ácido

El contenido de azufre de la muestra indica la acidez potencial total. Usualmente, se expresa como el PA o potencial de ácido y se puede calcular por:

$$PA = \% \text{ de azufre} \times 31.25$$

El factor 31,25 se basa en la acidez generada, según se derivó por estequiometria química, para la oxidación completa de la pirita y la subsiguiente hidrólisis del Fe^{3+} generado. Por tanto, este factor relaciona la acidez total producida con la alcalinidad equivalente como CaCO_3 requerida para la neutralización.

Sin embargo, es importante reconocer que el análisis del azufre total incluye todas las especies sulfurosas, comprendidos los sulfatos. El cálculo de la acidez a partir del contenido total de azufre puede sobreestimar la cantidad que realmente es generadora de ácido, ya que el azufre, presente en la forma de sulfato, no contribuirá a la generación de ácido. Si el contenido de azufre es mayor que 0.05%, puede determinarse la especie sulfurosa o el contenido de sulfuro reactivo; el contenido de sulfuro puede usarse para estimar la acidez potencial. Generalmente, se determina la especie de azufre. Por tanto, para la mayoría de pruebas BAB, un cálculo más realista del PA deberá basarse sólo en el azufre como sulfuro; es decir:

$$\text{PA} = \% \text{ de azufre como sulfuro} \times 31.25$$

II.2.9.2.2 Potencial de Neutralización

El potencial de neutralización (PN) se mide por titulación de la muestra y se calcula a partir de la masa de la muestra, el volumen, normalidad del ácido y la base añadidos. El PN se expresa en términos del equivalente en kg de CaCO_3 por tonelada de muestra.

II.2.9.2.3 Potencial Neto de neutralización (PNN)

Está dado por:

$$\text{PNN} = \text{PN} - \text{PA}$$

Además, la proporción entre las especies que consumen ácido y aquellas que lo generan se calcula por:

$$PN/PA.$$

La descripción de este método y del modificado, así como de otros métodos y opciones de predicción estática, están disponibles en el Draft Technical Guide, (B.C. AMD Task Force, 1989); y se describen con mayor detalle en el Prediction Test Procedure Manual (CANMET- MEND, 1990).

II.2.9.3 Interpretación de Pruebas Estáticas

La diferencia entre la acidez potencial máxima y el potencial de neutralización bruta nos da el potencial de neutralización neta.

Por eso, las pruebas estáticas se refieren a la composición geoquímica de una muestra, y no a la velocidad ni a la magnitud de las reacciones que pueden producir o consumir acidez. Por eso, los procedimientos para pruebas estáticas son igualmente aplicables en cualquier región climática o geológica.

En teoría, una muestra es generadora neta de ácido si su PNN es menor que cero. Sin embargo, la experiencia demuestra que valores de PNN entre -20 y +20 toneladas de $\text{CaCO}_3/1000$ toneladas de muestra (-2 a +2% de CaCO_3) pueden ser generadores de ácido. Este rango de incertidumbre puede atribuirse a errores inherentes a los procedimientos de prueba, a las conversiones a acidez total, a error analítico y al tamaño pequeño de la muestra.

II.3 ESTABILIDAD DE LOS MINERALES DE LAS ROCAS

La estabilidad de un mineral consiste en su resistencia a la alteración. Los minerales están, en el momento de su formación, presumiblemente en equilibrio con el medio que los rodea y por lo tanto son estables. Pero, llevados a un nuevo medio, distinto de aquel en que se formaron, están propensos a ser disueltos o descompuestos.

Muchos minerales componentes de rocas se forman en el interior de la Tierra a temperaturas y presiones elevadas. Cuando estos minerales son llevados a bajas temperaturas y presiones, y a ambientes ácidos, tales como los que prevalecen en la superficie de la Tierra o cerca de ella, muchos se vuelven inestables y son disueltos o descompuestos. La desaparición de minerales, o su ausencia, en suelos y otros residuos derivados de rocas en los que han estado presentes, es demostración segura de su inestabilidad.

Si hay un orden definido, o velocidad diferencial de pérdida de los óxidos químicos, es evidente que las rocas en que estos óxidos constituyen minerales, tendrán también diferentes grados de estabilidad. Así los minerales férricos, como grupo, son menos estables que los feldespatos alcalinos, los feldespatos potásicos son menos estables que los sódicos, y así sucesivamente.

II.3.1 Orden de Estabilidad

No todos los minerales tienen igual inmunidad ante la disolución y la alteración. Ha habido numerosos intentos de determinar la estabilidad relativa de los minerales en los suelos y sedimentos. Estos hechos han sido resumidos por Milner (1940), Boswell (1933), Pettijohn (1941), Allen (1948), Reiche (1950) y Smithson (1950).

Goldich (1938), como resultado de estudios cuantitativos de perfiles del regolito, ordenó los minerales comunes que componen las rocas en una “serie de estabilidad mineral”, la cual es casi idéntica en disposición a la serie de reacción de Bowen.

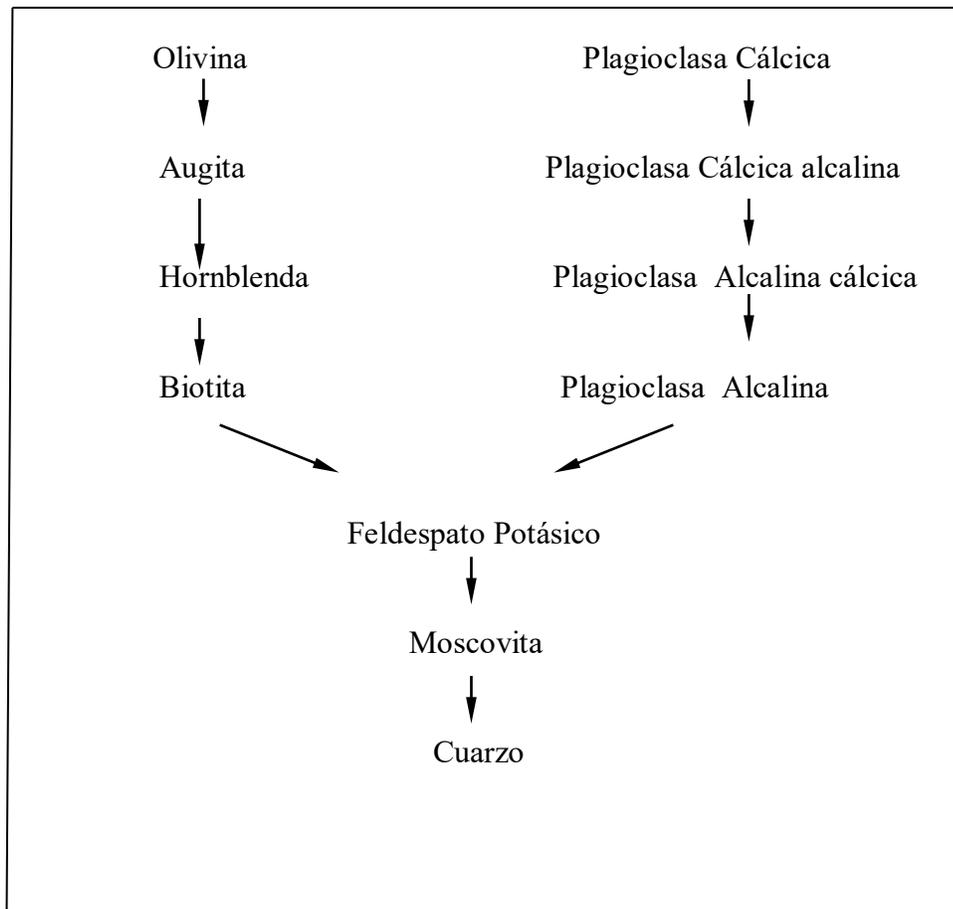


FIG.5.- Serie de Estabilidad de Mineral-Meteorización, según GOLDICH

II.4 PRINCIPALES PROCESOS DE METEORIZACIÓN

II.4.1 Meteorización Química

La meteorización química se verifica por la acción del agua, ácidos, oxígeno y bióxido de carbono sobre los constitutivos inestables de las rocas. La meteorización química es promovido por la temperatura elevada, así por ejemplo al incrementarse en 10° C la temperatura aumenta en un 100% - 150% la velocidad de las reacciones de hidrólisis.

El agua es el agente principal de la meteorización química; pues suministra continuamente iones activos de H y OH. Ningún otro líquido puede compararse con el agua en el número de sustancias que puede disolver, ni en las cantidades que puede mantener en disolución.

El agua en su ciclo encuentra suelos y rocas lo que le permite incorporar en su composición elementos tanto trazas, como mayores, derivados de la desintegración y disolución de los minerales de las rocas. Esto resulta fundamentalmente de la reacción del ión H^+ con minerales alúminosilicatos y carbonatos permitiendo la liberación de cationes y sílice y la formación de minerales arcillosos.

Al caer la lluvia a través de la atmósfera disuelve cierta proporción de CO_2 pero en cambio es muy rica en sustancias disueltas que tienen una influencia muy activa en el consecuente ataque de los constituyentes de las rocas. Es el agente más activo de la meteorización. Su acción viene determinada por:

- La solución, el traslado, deposición de compuestos químicos en la corteza de meteorización.
- La solución de agentes sólidos, líquidos y gaseosos agresivos (el oxígeno, ácido carbónico, ácidos y otros) y su transporte a las áreas de destrucción de las rocas.
- La descomposición de los minerales formadores de mena de la roca madre durante la hidratación en hidrólisis.

La regulación de las condiciones físico-químicas de los procesos de transformación de las rocas en la corteza de meteorización, condicionada por la variación de su acidez alcalina (pH), el potencial de oxidación-reducción (Eh) y la composición química de las sustancias disueltas. La meteorización química llevada hasta su terminación origina la producción de sustancias estables. De allí en adelante, las sustancias estables pasan por uno o más ciclos subsecuentes de erosión, transporte y depositación sin sufrir ya meteorización química alguna, o muy poca. Los principales procesos químicos son: Hidrólisis, disolución, hidratación, oxidación y carbonatación.

II.4.1.1 Hidrólisis

La transformación química fundamental de la meteorización es la hidrólisis y *el agua es su agente esencial*. La hidrólisis consiste en la entrada o penetración de iones H^+ y OH^- en la estructura de los minerales (silicatos en su mayoría) y ella, por consiguiente, se acelera con la presencia en solución de componentes capaces de aumentar la concentración (actividad) de tales iones.

La hidrólisis o metasomatismo del ión hidrógeno, es un fenómeno muy importante que implica la descomposición iónica de H_2O en H^+ y OH^- . En la alteración hidrotermal el H^+ (ó OH^-) es consumido durante la reacción con los minerales silicáticos.

La conversión de silicatos anhídricos a silicatos hidratados (e.g. micas o arcillas) es una reacción que consume H^+ y libera iones metálicos en la solución. Estos a su vez influye en el pH de la solución y su fuerza para disolver o conservar los cationes dentro la misma.

Así por ejemplo cuando el pH es 4 y 5, las solubilidades del Al_2O_3 y del SiO_2 son bajas, pues tienden a combinarse con los iones H^+ para formar minerales arcillosos de composición caolinítica. En las soluciones alcalinas (pH de 8 a 9), está presente mucho más SiO_2 , promoviendo así la formación de montmorillonita.

La hidrólisis puede ser:

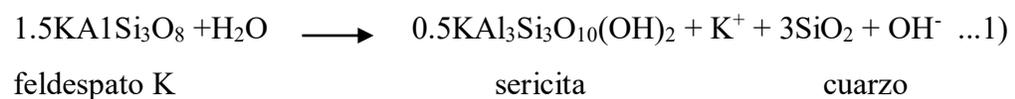
- a) Siliática o Arcillosa

Hay formación de minerales de arcilla y no se disuelven los ácidos silícicos. El proceso por el cual se forman las arcillas se denomina a veces silitización.

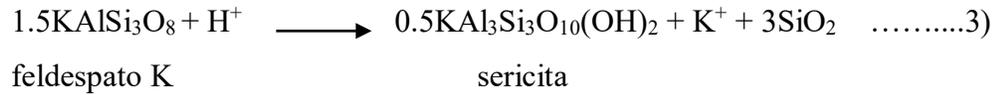
La hidrólisis de los silicatos consiste en la ruptura de la estructura cristalina por el enlace iónico que une a los cationes Na, K, Ca, Mg, Fe, etc con los aniones $(\text{AlSi}_3\text{O}_8)^-$, $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)^{2-}$, $(\text{SiO}_3)^{2-}$, $(\text{SiO}_4)^{4-}$, etc. El catión H^+ reemplaza a los cationes y estos entran en solución en equilibrio con los aniones OH^- , $(\text{CO}_3)^{2-}$ y $(\text{HCO}_3)^-$ (con excepción del hierro que oxida y se precipita casi inmediatamente).

La estructura silicática, donde el hidrógeno ocupa ahora los sitios de los cationes metálicos, es inestable e se rompe convirtiéndose en un arreglo amorfo que tiende a reordenarse después, esta vez con el aluminio de los feldespatos en coordinación octaédrica para formar capas adosadas a otra capa, constituida a su vez por tetraedros de $(\text{SiO}_4)^{4-}$. Esta estructura laminar da origen a arcillas de diferentes tipos.

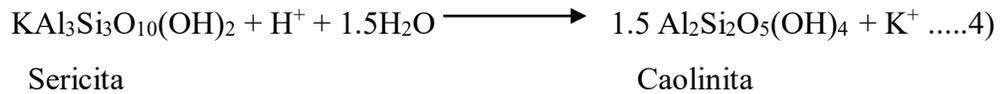
Un ejemplo típico es la descomposición del feldespato, y está dado por:



La suma de la primera y segunda ecuación dan:



finalmente:



Se puede observar en la tercera y cuarta reacción que el K^+ es liberado y H^+ es consumido.

b) Alítica o hidrática

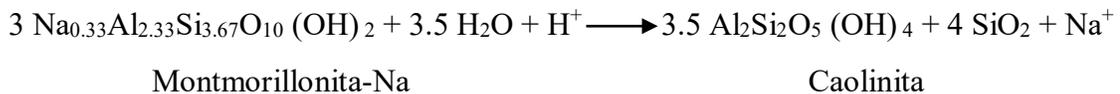
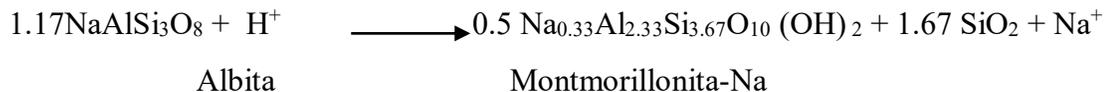
Hay disolución y en parte desaparición de la sílice, acumulación de aluminio y hierro. Generalmente se presenta en rocas sometidas a una lixiviación intensa, como ocurre en las regiones tropicales y subtropicales, no sólo los cationes alcalinos y alcalinos-térreos son eliminados a través del agua freática, sino que también es movilizada la sílice, quedando en su sitio solamente la alúmina (Al_2O_3) y el hierro [$\text{Fe}(\text{OH})_3$]. Esta hidrólisis extrema, con producción de alumina libre, se denomina “alitización”.

La movilización es favorecida por la naturaleza química del silicato: la hidrólisis de los “nesosilicatos” [$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ olivinos], cuyas unidades tetraédricas SiO_4 están unidas entre sí por puentes catiónicos, produce los compuestos H_4SiO_4 y $(\text{SiO}_4)^{4-}$, formas en que la sílice es transportada en solución. Esto se hace más difícil en los silicatos de estructura más polimerizada, donde los puentes catiónicos son reemplazados en parte por unión directa de los vértices de los tetraedros, o faltan totalmente como en el cuarzo. Los “inosilicatos” o silicatos en cadena (píroxeno, anfíboles) son algo menos favorables que los nesosilicatos, si

bien mucho más que los tectosilicatos. Por esta razón es que la sílice es lavada más fácilmente de las rocas básicas que de las graníticas.

El cuarzo, cuya estructura y composición no admite la hidrólisis, resulta prácticamente insoluble en la mayoría de los ambientes, aunque en los expuestos a la lixiviación intensa puede ser disuelto en proporciones mínimas, pero perceptibles, si el proceso dura suficiente tiempo.

Un ejemplo típico es la descomposición de la albita, y está dado por:



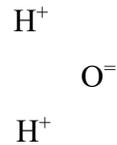
II.4.1.2 Disolución

Se refiere a la disolución de sales en el agua. Casi todos los minerales reaccionan en cierta manera al agua, sin embargo, hay algunos minerales más susceptibles de ataque que otros y podemos dividirlos en dos grupos:

- Los resistentes tales como cuarzo, muscovita y zirconio
- Los no resistentes como los feldespatos y la mayor parte de los ferromagnésicos.

Los iones de los minerales y las rocas atraen a las moléculas de agua; los cationes atraen a los extremos negativos del dipolo del agua; los aniones, a los extremos positivos. Se origina

un dipolo químico cuando existe una distribución desigual de carga entre dos átomos dentro de una molécula. En el caso del agua, la carga negativa reside en el oxígeno y las cargas positivas en los hidrógenos; el dipolo es aquí esencialmente una resultante, como se muestra por:



El número de moléculas de agua que pueden ser atraídas alrededor de un ión dado, depende del tamaño del ión; cuanto más grande es, mayor es el número de moléculas de agua atraídas hacia él. La hidratación de un ión es, sin embargo proporcional a su carga (Z), e inversamente proporcional a su radio (r). Al factor Z/r se le conoce como el potencial iónico. El potencial iónico influye en la capacidad de solvatación de los elementos en agua. La clasificación de los elementos puede establecerse por medio del potencial iónico, fue escrito primero por G.H. Cartledge en 1928, y fue aplicado a los minerales y rocas por V.M. Goldschmidt en 1937. El potencial iónico de un elemento determina en gran parte su lugar de depositación durante la sedimentación. Los elementos de bajo potencial iónico, como el Cs, K, Na, Ca, Mg, etc, permanecen en disolución durante el proceso de transporte y de sedimentación. Los elementos de potencial iónico intermedio son precipitados por hidrólisis y sus aniones se asocian con los hidroxilos para formar hidrosilicatos. Los elementos de potencial iónico aún más altos forman aniones ácidos solubles con el oxígeno. Esto resulta fundamentalmente de la reacción del ión H^+ con minerales aluminio-silicatos y carbonatos permitiendo la liberación de cationes y sílice y la formación de minerales arcillosos. La cantidad de roca o suelo disuelto por el agua depende de la cantidad de tiempo disponible para la reacción, de la cantidad de CO_2 y de otros ácidos disponibles. A medida que los minerales se disuelven por este proceso, la cantidad de elementos mayores y trazas en el agua, tienden a crecer proporcionalmente a la cantidad total de sólidos disueltos en el agua.

SEPARACIÓN GEOQUÍMICA EN BASE A SU POTENCIAL IÓNICO

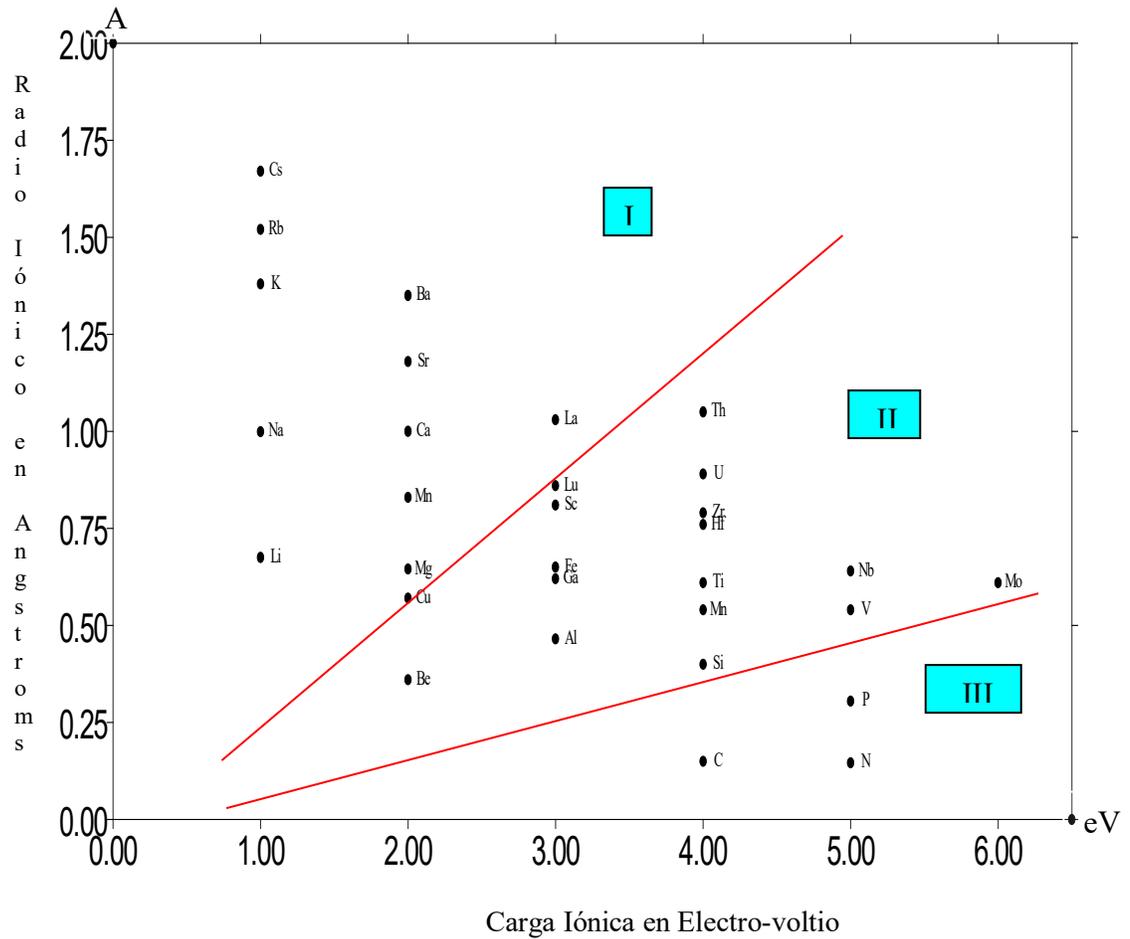
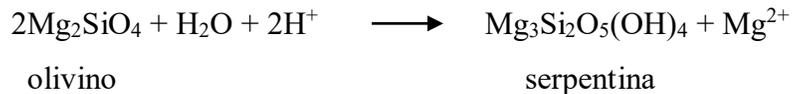


FIG.6.- Clasificación de los elementos, según su potencial iónico, en el ciclo exógeno (según Goldschmidt). I, cationes que forman compuestos fácilmente solubles. II, iones que forman hidróxidos insolubles. III, iones que forman con O_2 moléculas aniónicas solubles.

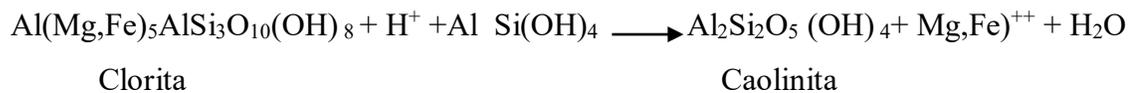
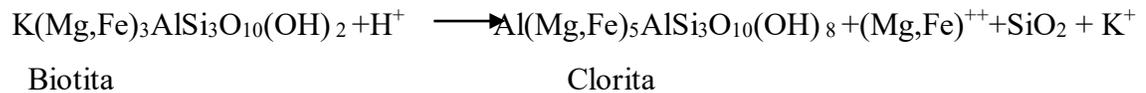
II.4.1.3 Hidratación

La agregación de agua a un mineral o roca se le llama hidratación. La hidratación ocurre comúnmente durante la hidrólisis, la oxidación y la carbonatación. El aumento de tamaño de las sustancias acompaña generalmente a la hidratación.

La presencia de agua en los silicatos inestables de aluminio de las rocas cristalinas los convierte en minerales arcillosos. En los minerales magnesíferos un ejemplo típico es la conversión del Olivino a Serpentina, de acuerdo a:



Los minerales ferromagnéticos se convierten en clorita.



II.4.1.4 Oxidación

La oxidación está condicionada por un alto potencial del oxígeno del sector cercano a la superficie de la corteza terrestre que se extingue rápidamente con la profundidad.

El proceso de oxidación comprende la alteración de los minerales y la producción de óxidos. El oxidante más activo es el oxígeno presente en la atmósfera y disuelto en el agua. Es muy activa con los minerales ferríferos formando los óxidos: hematita, limonita que son los principales colorantes de las rocas y produce los tintes rojo pardo y amarillo tan comunes en la superficie que han sufrido intemperismo.

II.4.1.5 Carbonatación

En la carbonatación los minerales se convierten en carbonatos. Muchos minerales están sujetos a este tipo de descomposición, pero este proceso es más efectivo en aquellos que contienen los metales alcalinos sodio y potasio, así como calcio y magnesio. Otros menos importantes de alteración pueden producir varios sulfatos y cloruros. El agua disuelve o se combina con el dióxido de carbono para formar los ácidos carbónicos:



El efecto de descomposición es por tanto, el de producir sustancias solubles como carbonatos, sulfatos y cloruros dejando un residuo insoluble consistente en silicatos y óxidos hidratados mezclados con minerales tales como cuarzo y mica blanca que han sufrido poco o ningún ataque de los agente de la interpedie.

II.4.2 Meteorización Mecánica

Este tipo de fuerzas de destrucción de rocas y liberación de minerales actúa preferentemente en climas áridos y cordilleranos, debido a que los poros de la superficie de una roca, bajo una lluvia continuada, pueden llenarse de una solución sobresaturada de sal. Habrá entonces un crecimiento de los cristales que puede producir un exceso de presión hidrostática y la desintegración correspondiente de la roca.

Los cristales mismos pueden aumentar el volumen considerablemente debido a la continua hidratación y contribuir de esta forma al aumento de presión hidrostática.

II.4.2.1 Acción Térmica

El calentamiento cíclico a alta temperatura y su enfriamiento subsiguiente puede también destruir una roca, sobre todo si los minerales constituyentes son calcita o feldespato. La dilatación en un cristal de ortoclasa será más de 12 veces mayor en una dirección (la del eje a) que en otra (la del eje b), aunque no haya contracción.

La plagioclasa (feldespato sódico) y el cuarzo tienen coeficientes de dilatación diferentes en dos direcciones perpendiculares entre sí. Estas diferencias pueden producir un resbalamiento irreversible de los cristales y un aumento en volumen, por calentamiento y enfriamiento cíclico. Este proceso se observa más claramente en las regiones cordilleranas, por la gran diferencia de temperaturas entre el día y la noche.

II.4.2.2 Gelifracción

Es la meteorización producida como consecuencia del aumento de volumen (1/9) que se produce al congelarse el agua contenida en grietas, poros y fisuras de la roca. Origina material anguloso, sobre todo cuando es frecuente el proceso hielo – deshielo.

II.5 REGLAMENTO EN MATERIA DE CONTAMINACIÓN HÍDRICA

Este reglamento establece procedimientos para la prevención y control de la contaminación de aguas y es aplicable a cualquier actividad que potencialmente pueda degradar la calidad de los recursos hídricos. Asimismo, describe las sanciones administrativas para las infracciones relacionadas con la contaminación de aguas.

El reglamento presenta los límites establecidos para las descargas de efluentes líquidos, además la clasificación de cuerpos de agua de acuerdo a su aptitud de uso y establece los procedimientos de inspección, supervisión, monitoreo, evaluación, prevención, protección y conservación de la calidad del agua. Esta clasificación general de cuerpos de agua; en relación con su aptitud de uso, obedece a los siguientes lineamientos (Art. 4):

- CLASE “A”- Aguas naturales de máxima calidad, que las habilita como agua potable para consumo humano sin ningún tratamiento previo, o con simple desinfección bacteriológica en los casos necesarios verificados por laboratorio.
- CLASE “B”- Aguas de utilidad general, que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.
- CLASE “C”- Aguas de utilidad general, que para ser habilitadas para consumo humano requieren tratamiento fisicoquímico completo y desinfección bacteriológica.
- CLASE “D”- Aguas de calidad mínima, que para consumo humano, en los casos extremos de necesidad pública, requieren un proceso inicial de pre sedimentación, pues pueden tener una elevada turbiedad por elevado contenido de sólidos en suspensión, y luego tratamiento fisicoquímico completo y desinfección bacteriológica especial contra huevos y parásitos intestinales.

La Tabla (Anexo A, cuadro A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica) presenta los parámetros más importantes de esta clasificación. En la clasificación de los cuerpos de agua se permitirá que hasta veinte de los parámetros especificados en el Cuadro N° A-1 (Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica) superen los valores máximos admisibles indicados para la clase de agua que corresponda asignar al cuerpo, con las siguientes limitaciones: Ninguno de los veinte parámetros puede pertenecer a los PARÁMETROS BÁSICOS del Art. 6°, El exceso no debe superar el 50% del valor máximo admisible del parámetro (Art. 7).

PARAMETRO	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
Ph	6.0-8.5	6.0-9.0	6.0-9.0	6.0-9.0
Sólidos Disueltos Totales	1000	1000	1500	1500
Sólidos Suspendidos Totales	<10 mg/l	30 mg/l - 0.1 ml/l	<50mg/l	100 mg/l
Arsénico (total)	0.05	0.05	0.05	0.1
Boro	1.0	1.0	1.0	1.0
Calcio	200	300	300	400
Cadmio	0.005	0.005	0.005	0.005
Cianuro	0.02	0.1	0.2	0.2
Cloruros	250	300	400	500
Cobre	0.05	1.0	1.0	1.0
Cobalto	0.1	0.2	0.2	0.2
Cromo+6	0.05 (total Cr)	0.05 (Cr+6)	0.05 (Cr+6)	0.05 (Cr+6)
Cromo+3	-	0.6 (Cr+3)	0.6 (Cr+3)	1.1 (Cr+3)
Estaño	2.0	2.0	2.0	2.0
Fenoles [$\mu\text{g/l}$]	1	1	5	10
Hierro (soluble)	0.3	0.3	1.0	1.0
Fluoruros	0.6-1.7	0.6-1.7	0.6-1.7	0.6-1.7
Magnesio	100	100	150	150
Manganeso	0.5	1.0	1.0	1.0
Mercurio	0.001	0.001	0.001	0.001
Litio	2.5	2.5	2.5	5
Níquel	0.05	0.05	0.5	0.5
Nitratos	20.0	30.0	50.0	50.0
Nitritos	< 1.0	1.0	1.0	1.0
Nitrógeno (total)	5	12	12	12
Plomo	0.05	0.05	0.05	0.1
Plata	0.05	0.05	0.05	0.05
Sodio	200	200	200	200
Sulfatos	300	400	400	400
Azufre	0.1	0.1	0.5	1.0
Zinc	0.2	0.2	5.0	5.0

TABLA 3.-(Anexo A, cuadro A-1 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica)
Clasificación de Aguas de Acuerdo a su Aptitud de Uso (unidades en mg/l excepto si se especifican otras)

La autorización para descargar efluentes en cuerpos de agua, estará incluida en la DIA, en la DAA y en el Certificado de Dispensación establecidos en el Reglamento de Prevención y Control Ambiental (Art. 16). La DIA, la DAA y el Certificado de Dispensación incluirán la obligación del REPRESENTANTE LEGAL de presentar semestralmente a la Autoridad Ambiental Competente un informe de caracterización de aguas residuales crudas o tratadas emitido por un laboratorio autorizado, y de enviar al mismo tiempo una copia de dicho informe al Organismo Sectorial Competente. El informe deberá caracterizar aquellos parámetros para los que fija límites permisibles el Anexo A del presente Reglamento y que están directamente relacionados con la actividad y definidos por el Organismo Sectorial Competente en coordinación con el MDSMA (Art. 17).

Todas las descargas de aguas residuales crudas o tratadas a ríos o arroyos, procedentes de usos domésticos, industriales, agrícolas, ganaderos o de cualquier otra actividad que contamine el agua, deberán ser tratadas previamente a su descarga, si corresponde, para controlar la posibilidad de contaminación de los acuíferos por infiltración, teniendo en cuenta la posibilidad de que esos ríos y arroyos sirvan para usos recreacionales eventuales y otros que se pudieran dar a estas aguas. Para el efecto se deberá cumplir con lo siguiente: en caso de arroyos, dichas aguas residuales crudas o tratadas deberán satisfacer los límites permisibles establecidos en el presente reglamento para el cuerpo receptor respectivo; toda descarga de aguas residuales a ríos, cuyas características no satisfagan los límites de calidad definidos para su clase, deberá ser tratada de tal forma que, una vez diluida, satisfaga lo indicado en el Cuadro N° 1 del presente reglamento; cuando varias industrias situadas a menos de 100 metros de distancia una de la otra descarguen sus aguas residuales a un mismo tramo de río, la capacidad de dilución será distribuida proporcionalmente al caudal de descarga individual, considerando el caudal mínimo del río y como está descrito en el Art. 45 del presente Reglamento (Art. 47).

La extracción y recarga de aguas subterráneas con calidad para el consumo humano -Clase A- por medio de pozos profundos, requerirá de la DIA o DAA en los siguientes casos (Art. 63):

- La realización de proyectos u obras nuevas que signifiquen la descarga de residuos sólidos, líquidos o gaseosos que puedan contaminar por infiltración las aguas subterráneas, o que se descarguen directamente a los acuíferos.
- Las inyecciones de efluentes tratados en el subsuelo, que pudieran sobrepasar la recarga natural del acuífero poniendo en peligro su calidad físico-química o su subsistencia.
- La realización de proyectos de riego que signifiquen regulación y aporte de aguas cuya infiltración en el suelo pueda afectar el nivel piezométrico de la napa freática, produciendo empantanamiento o salinización de los suelos.
- La perforación de pozos y explotación de aguas subterráneas en zonas donde exista contacto con aguas salinas que puedan contaminar los acuíferos para consumo humano o que puedan provocar su fuga a estratos permeables.
- Cualquier otra actividad que el MDSMA identifique como peligrosa a los fines de la protección de la calidad de las aguas subterráneas para consumo humano.

Para la recarga directa o inyección de aguas residuales crudas o tratadas en acuíferos, estas aguas deben cumplir con los límites máximos permisibles establecidos para la clase del acuífero. En los acuíferos en los que en forma natural uno o más parámetros excedan en más del 50% los límites máximos permisibles, la calidad del agua residual, cruda o tratada, deberá en lo referente a los parámetros excedidos ser inferior a la del acuífero (Art. 64).

En ningún caso se permitirá descargas instantáneas de gran volumen de aguas residuales crudas o tratadas a ríos. Estas deberán estar reguladas de manera tal que su caudal máximo, en todo momento, sea menor o igual a 1/3 (un tercio) del caudal del río o cuerpo receptor (Art. 44).

**TABLA 4.- LÍMITES PERMISIBLES PARA DESCARGAS LÍQUIDAS EN (mg/l)
(Anexo 2, del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica)**

NORMAS PARÁMETROS	PROPUESTA	
	DIARIO	MES
Cobre	1.0	0.5
Zinc	3.0	1.5
Plomo	0.6	0.3
Cadmio	0.3	0.15
Arsénico	1.0	0.5
Cromo +3	1.0	0.5
Cromo +6	0.1	0.05
Mercurio	0.02	0.001
Fierro	1.0	0.5
Antimonio(&)	1.0	
Estaño	2.0	1.0
Cianuro libre (a)	0.2	0.10
Cianuro libre (b)	0.5	0.3
pH	6.9	6.9
Temperatura	+5°C	+5°C
Compuestos fenólicos	1.0	0.5
Sólidos Susp. Totales	60.0	
Colifecales(NMP/100 ml)	1000	
Aceites y Grasas (c)	10.0	
Aceites y Grasas (d)	20.0	
DBO5	80.0	
DQO (e)	250.0	
DQO (f)	300.0	
Amonio como N	4.0	2.0
Sulfuros	2.0	1.0

(a), (c), (e) aplicable a descargas de procesos mineros e industriales en general

(b), (d), (f) aplicable a descargas de procesos hidrocarburíferos mineros e industriales en general

(&) En caso de descargas o derrames de antimonio iguales o mayores a 2500 Kg, se deberá reportar a la autoridad ambiental.

CAPÍTULO-III

CAPÍTULO III

MARCO PRÁCTICO

III.1 ESTUDIO DEL MANEJO DE DAR DEL DISTRITO MINERO COLQUIRI

III.1.1 Balance Hídrico de Colquiri

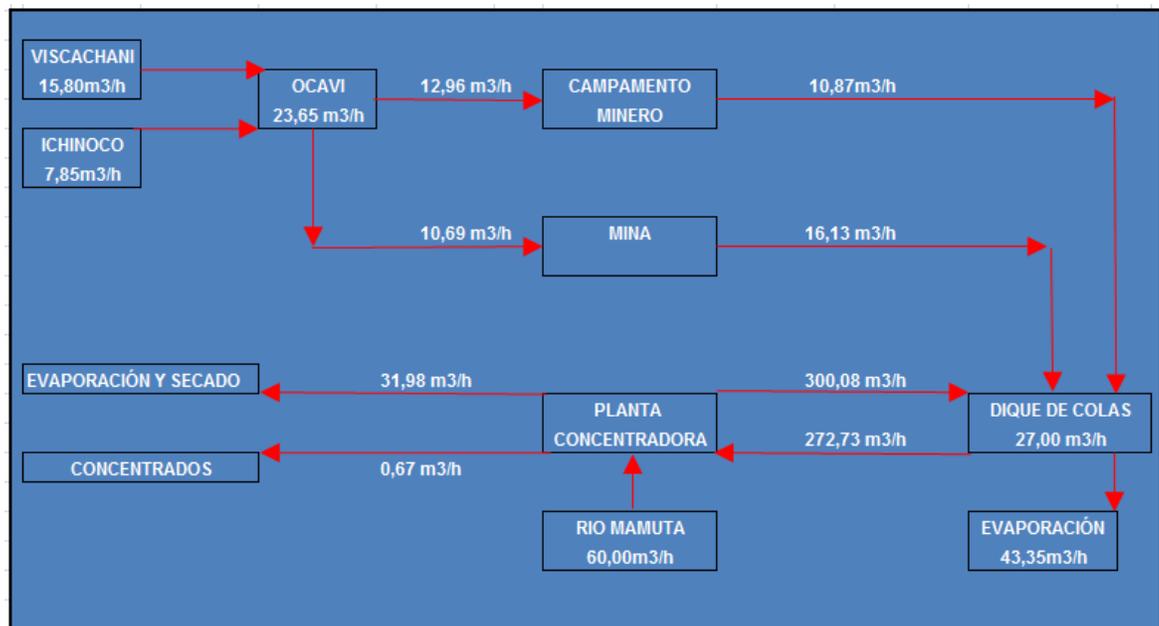


FIG.7.- Balance Hídrico del Centro Minero Colquiri

El balance hídrico muestra que a interior mina ingresa 10,69 m³/h de agua potable proveniente del sector de Ocavi y se evacúa 16,13 m³/ h. El exceso de agua al momento de la evacuación se debe a que en interior mina existe aguas subterráneas y aguas de infiltración desde superficie que son evacuadas junto con el agua potable, proveniente del sector de Ocavi.

La distribución de los 10, 69 m³/h en interior mina se lo realiza de la siguiente manera:

Item	Descripción	Consumo Unit. (l/tal)	Cantidad Parajes	No. Total Taladros	Consumo diario (m ³ /día)
1	Perforadora stoper	35	10	150	5,3
2	Perforadora jckleg	50	20	640	32,0
3	Perforadora BD-94	50	2	64	3,2
4	Drill Carrier	135	1	8	1,1
5	Stope Master	2295	3	45	103,3
6	Simba	2700	1	5	13,5
7	Jumbos	500	2	70	35,0
8	Desquinches	50	2	80	4,0
9	Regado carga y otros				10,0
10	Duchas				15,0
11	Dresser				17,3
12	Alimak	35	2	37	1,3
13	Compresoras				40,0
14	Imprevistos				28,1
Total Mina					309,0

TABLA 5.- Consumo de Agua en Interior Mina del Centro Minero Colquiri

$$309 \text{ m}^3/\text{día} = 12,875 \text{ m}^3/\text{h}$$

El consumo total de agua en interior mina vs. el caudal que ingresa revela que existe un déficit de agua:

$$\text{Deficit de agua} = 12,875 \text{ m}^3/\text{h} - 10,69 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Deficit de agua} = 2,185 \text{ m}^3/\text{h}$$

El déficit de agua para los trabajos en interior mina es mayor los meses de Mayo, Junio, Julio, Agosto y Septiembre, debido a que en los mismos, las precipitaciones pluviales son escasas.

Por lo tanto:

El reemplazo del drenaje ácido de mina de los actuales niveles de explotación del centro minero Colquiri, luego de ser tratadas, podría mitigar en gran medida este déficit.

III.1.2 Potencial Neto de Neutralización del Dique de Colas



Foto 3.- Ubicación de Toma de Muestra en el Dique de Colas del Centro Minero Colquiri

La fotografía muestra el sector de donde se tomó la muestra para determinar el PNN del dique de colas y el resultado obtenido de la prueba estática se presenta en la siguiente tabla:

MUESTRA	S	SO ₄	S _{SO₄}	S total Calculado	Kg CaCO ₃ equiv./ton material			
	%	%	%	%	NP	AP	PNN	NP/AP
COLQ-D01	26,20	12,00	4,00	22,20	465,08	693,75	-228,67	0.67

TABLA 6.- Resultado de muestra Dique de colas Colquiri

De la misma se tiene que las colas se constituyen en una fuente potencial de DAR, puesto que actualmente requiere 228,67 Kg CaCO₃/tn de residuo para su neutralización.

Por lo tanto:

El tratamiento del DAM de los actuales niveles de explotación del centro minero Colquiri, en interior mina, podría mitigar la cantidad de residuo a ser tratado en el dique de colas al momento del cierre de operaciones.

La relación de NP/AP es menor a 3: por lo que, según normativas canadienses, se requerirá realizar la “restauración del dique de colas” y por otra parte no debemos olvidar que cuanto menor es la relación NP/AP, los costos de restauración serán significativamente mayores.

III.1.3 Caracterización del DAR

- La unidad de estudio del presente trabajo de tesis son las *aguas ácidas de mina de los actuales niveles de explotación del Distrito Minero Colquiri*:
 - DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM): NIVEL -470
 - DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM): NIVEL -405
 - DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM): NIVEL -365



FIG.8.- Ubicación de Toma de Muestra en Interior de Mina del Centro Minero Colquiri

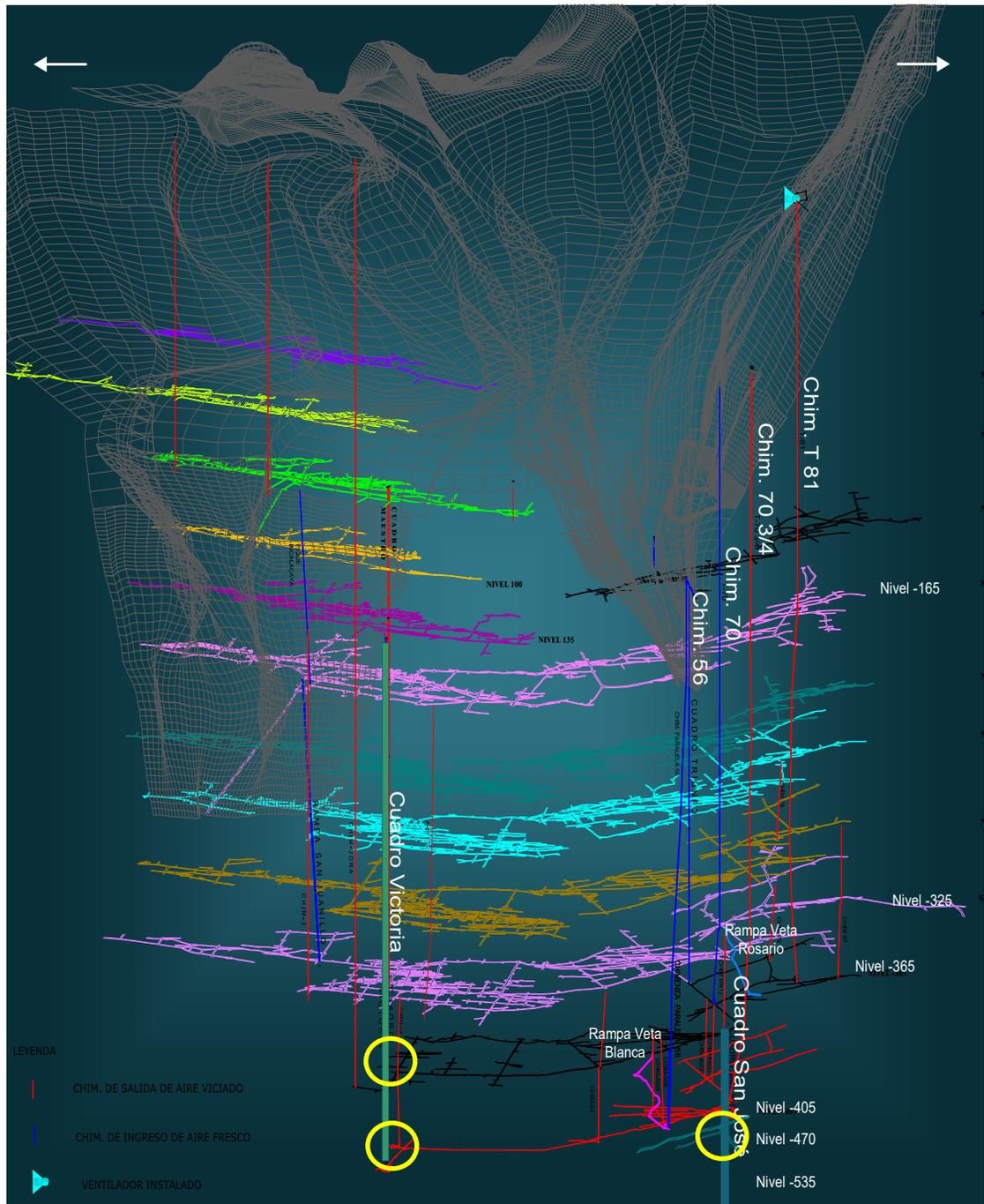


FIG.9.- Plano de interior mina del Centro Minero Colquiri

Las muestras recogidas, fueron analizadas químicamente en el Laboratorio de SPECTROLAB.

PARÁMETRO	UNIDAD	AGUA CLASE D	N-470	N-405	N-365	N-165
Ph	(uS/cm)	6,0 – 9,0	2,9	2,7	2,5	2,54
Conductividad	(mg/l)		12480	10810	12550	
Sólidos Disueltos	(mg/l)	1500	25500	23162	28238	
Sólidos Suspendedos	(mg/l)	<50	185	722	939	298
Cianuro libre	(mg/l)	0,2	<0,02	<0,002	<0,002	
Cloruro	(mg/l)	500	17	28	94	
Bicarbonato	(mg/l)		<3	<3	<3	
Sulfatos	(mg/l)	400	14365,6	11968	18161,8	20800
Sulfuro	(mg/l)	1	0,001	<0,001	<0,001	
Antimonio	(mg/l)	0,01	0,003	0,002	0,002	
Arsénico	(mg/l)	0,1	0,011	0,029	0,037	
Calcio	(mg/l)	400	286,22	186,75	51,67	
Cadmio	(mg/l)	0,005	0,23	0,38	3,57	
Cobre	(mg/l)	1,0	0,2	0,7	3,53	
Cromo VI	(mg/l)	0,05	<0,005	<0,005	<0,005	
Estaño	(mg/l)	2,0	<0,5	<0,5	<0,5	
Hierro	(mg/l)	1,0	3387,39	2883,19	3639,13	3095,09
Magnesio	(mg/l)	150	674,39	462,97	684,87	
Plomo	(mg/l)	0.1	1,01	0,62	0,43	
Potasio	(mg/l)		13,04	6,94	1,51	
Silicio	(mg/l)		26,641	37,431	18,014	
Sodio	(mg/l)	200	2,97	2,14	9,11	
Zinc	(mg/l)	5,0	1616,37	1736,59	2567,14	2483,99

TABLA 7.- Resultado de Análisis Químico proporcionado por SPECTROLAB (En ANARANJADO, concentraciones que sobrepasan a la clase de agua D)

La tabla 7 muestra que las aguas de interior mina del nivel -470, -405, -365 y la evacuada por el nivel -165 al dique de colas, son bastante ácidas, con contenidos de sulfatos y metales disueltos muy por encima de los límites permisibles, incluso comparados con el tipo de cuerpo de agua “D” indicado en el reglamento en materia de contaminación hídrica.

III.1.3.1 Drenaje de Agua Ácida NIVEL -470

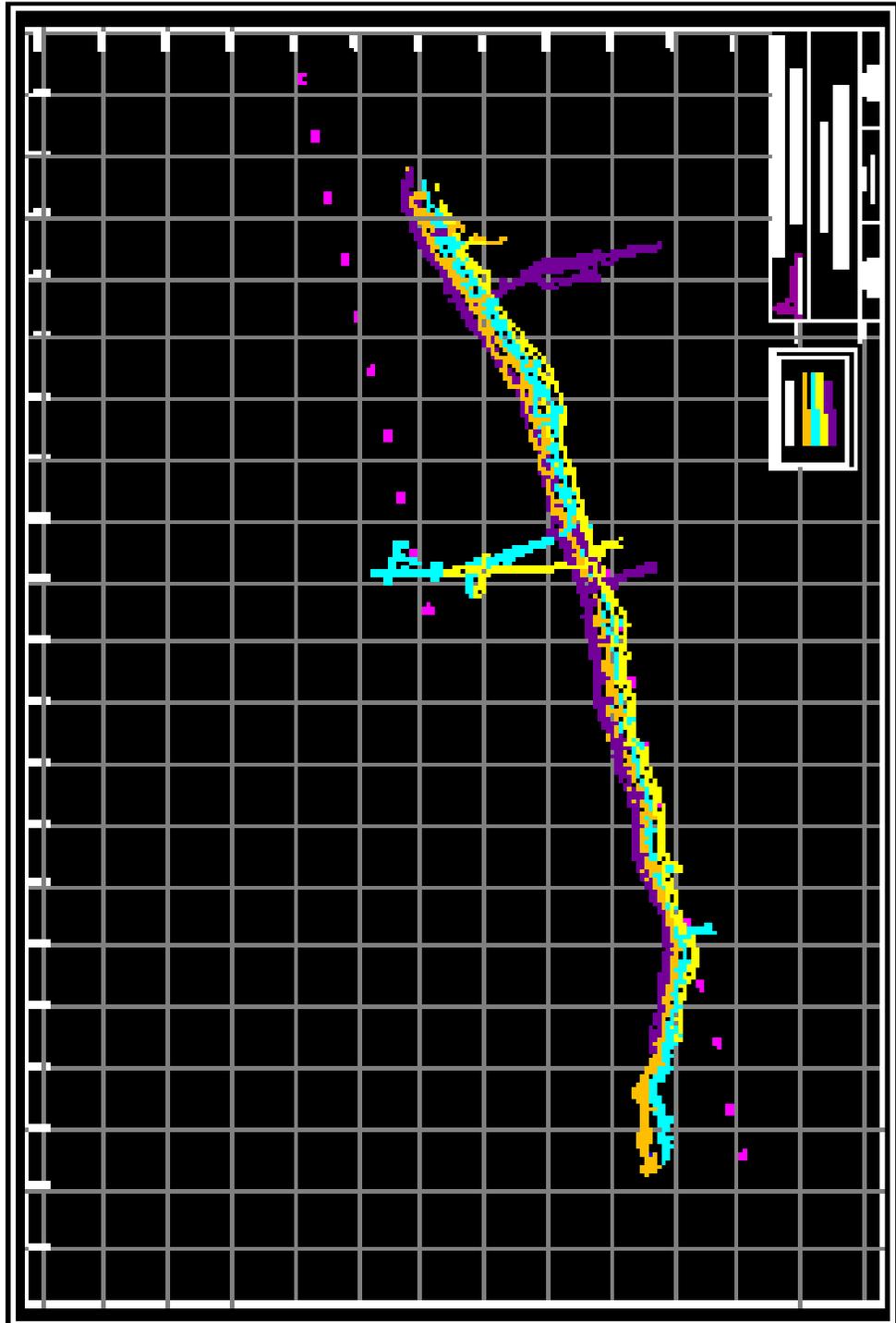


FIG.10.-Nivel -470 y Subniveles

El nivel -470 se halla a una profundidad de 350 m del nivel -165 (Bocamina San Juanillo) y llega a ser el nivel más bajo de actual explotación del Centro Minero Colquiri. El caudal de DAM que se genera en este nivel es de 10.560 m³/h y debido a que el desarrollo del nivel -470 empezó el año 2003, los procesos de oxidación química y biológica tendrían aproximadamente 6 años antigüedad.

El alto grado de acides (pH = 2.9) se debería a la gran cantidad de agua que se infiltra de los niveles superiores a través de los rajos explotados sobre veta Blanca. El contenido de sólidos suspendidos, Zn, Pb y Fe son superiores a los límites permisibles de descarga debido a que el yacimiento es de tipo sulfuroso. Los contenidos de Cd, Cr y As se encuentran por debajo de los límites permisibles de descarga.

Comparando los parámetros de la muestra de agua del nivel -470 con las del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica se observa que no puede ser empleada ni como agua de clase D y que necesariamente se debe realizar un tratamiento de ella antes de proceder a emplearla incluso para trabajos de interior mina, debido a la gran cantidad de sulfatos que contiene, los mismos que provocarían encostramiento en las cañerías.

III.1.3.2 Drenaje de Agua Ácida NIVEL -405

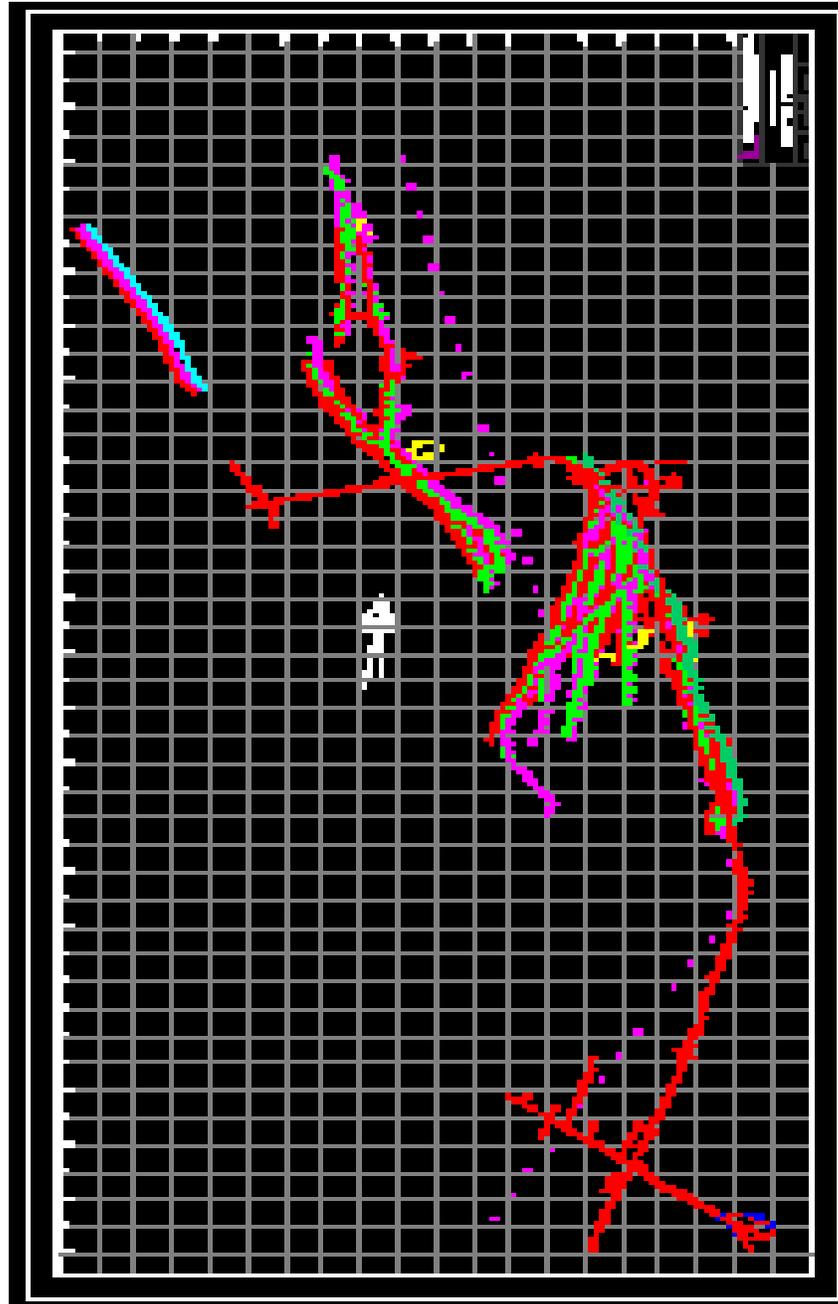


FIG.11.- Nivel -405 y Subniveles

El nivel -405 se halla a una profundidad de 240 m del nivel -165 (Bocamina San Juanillo) y llega a ser el nivel intermedio de actual explotación del Centro Minero Colquiri. El caudal de DAM que se genera en este nivel es de 14550 m³/h y debido a que el desarrollo del nivel -405 empezó el año 1980, los procesos de oxidación química y biológica tendrían aproximadamente más de 29 años antigüedad.

El pH de 2.7 revela que existe un leve incremento de acides con relación al nivel -470. Los sólidos suspendidos representan un 400 % de incremento con respecto al nivel -470. Su contenido bajo de Cobre se halla incrementado en un 250% con respecto al nivel -470 y se debería al mayor tiempo meteorización de la Calcopirita (Cu FeS₂). El contenido de Zn, Pb y Fe son superiores a los límites permisibles de descarga debido a que el yacimiento es básicamente de tipo sulfuroso. Los contenidos de Cd, Cr y As se encuentran por debajo de los límites permisibles de descarga, pero son superiores a los del nivel -470.

Comparando los parámetros de la muestra de agua del nivel -405 con las del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica se observa que no puede ser empleada ni como agua de clase D y que necesariamente se debe realizar un tratamiento de ella antes de proceder a emplearla para trabajos en interior mina, debido a la gran cantidad de sulfatos que contiene, los mismos que provocarían encostramiento en las cañerías.

III.1.3.3 Drenaje de Agua Ácida NIVEL -365

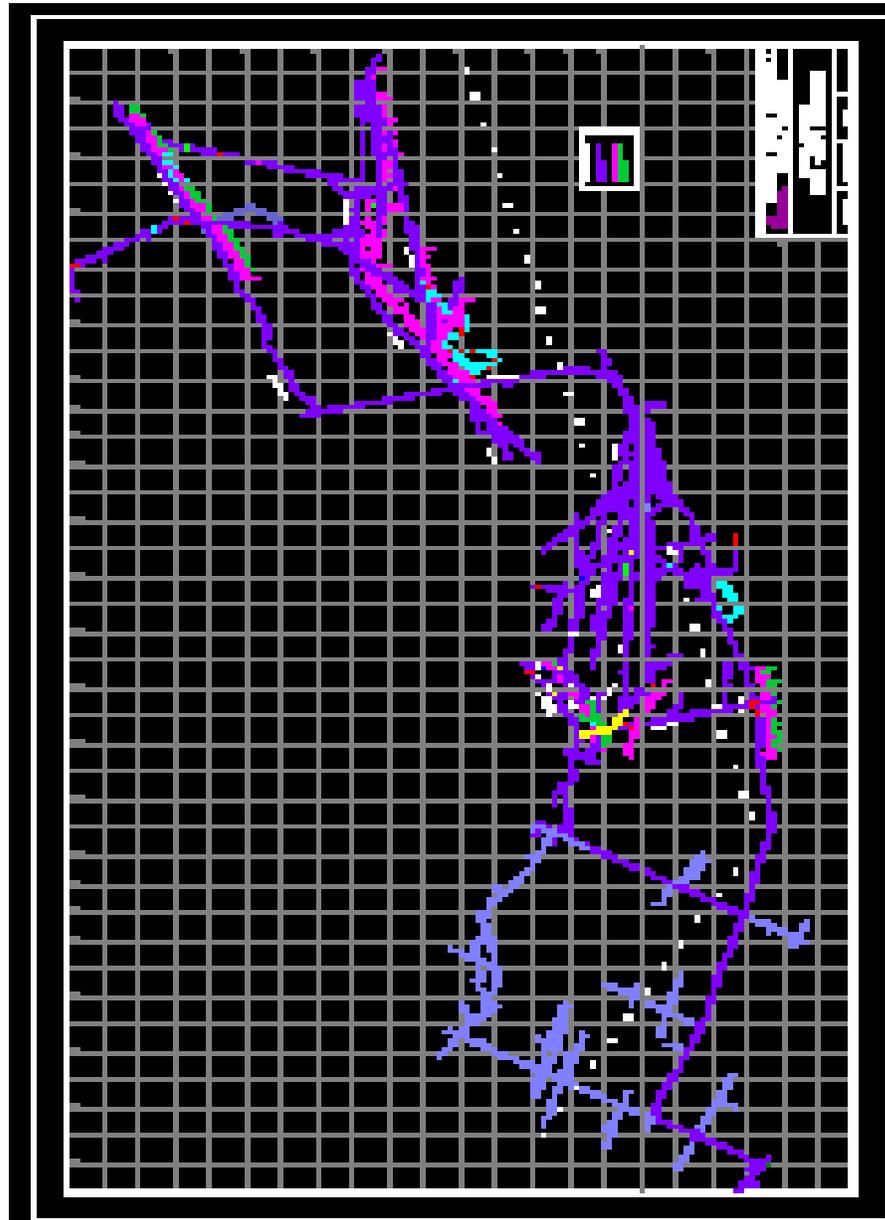


FIG.12.- Nivel -365 y Subniveles

El nivel -365 se halla a una profundidad de 200 m del nivel -165 (Bocamina San Juanillo) y llega a ser el nivel más alto de actual explotación del Centro Minero Colquiri. El caudal de DAM que se genera en este nivel es de 12.077 m³/h y debido a que el desarrollo del nivel -365 empezó en la década de 1970, los procesos de oxidación química y biológica tendrían aproximadamente 40 años antigüedad.

El pH de 2.5 revela que existe un leve incremento de acides con relación al nivel -405. Los sólidos suspendidos representan un 25 % de incremento con respecto al nivel -405. Su contenido bajo de Cobre se halla incrementado en un 500% con respecto al nivel -405 y ello se debería al mayor tiempo meteorización de la Calcopirita (Cu FeS₂). El contenido de Zn, Cd y Fe son superiores a los límites permisibles de descarga y a los del nivel -405. El contenido de Pb es inferior al límite permisible de descarga y al del nivel -405. Los contenidos de Cr y As se encuentran por debajo de los límites permisibles de descarga, pero son superiores a los del nivel -405. Comparando los parámetros de la muestra de agua del nivel -365 con las del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica se observa que no puede ser empleada ni como agua de clase D y que necesariamente debe realizarse un tratamiento de ella antes de proceder a emplearla para trabajos en interior mi, debido a la gran cantidad de sulfatos que contiene, los mismos que provocarían encostramiento en las cañerías.

Por lo tanto:

Si bien se tiene tres DAM (-470, -405 y -365) con características geoquímicas diferentes, se recomienda la neutralización con cal del DAM del nivel -470 en virtud de que:

El caudal de DAM que expulsa el nivel -470 (10,560 m³/hr) es muy próximo al caudal de agua que ingresa a interior mina (10,69 m³/hr) desde la estación de bombeo de Ocavi. Los resultados químicos proporcionados por el laboratorio de SPECTROLAB, revelan que el DAM del nivel -470 presenta menor contenido de acidez, sólidos suspendidos, cadmio, cobre, zinc, arsénico.

III.1.4 Neutralización – Precipitación del DAR del Nivel -470

III.1.4.1 Caracterización Físico – Química del Agua Ácida del Nivel -470

Para la caracterización del Agua Ácida de Mina del Nivel N-470, se tomaron aproximadamente 2 litros de muestra.

Los resultados del análisis físico-químico, llevado a cabo en SPECTROLAB, es presentado en la Tabla 8.

Parámetro	Norma	Límite de Detección	Agua Acida N - 470
pH	ASTM D 1293	+/- 0.01	2.9
Sólidos Disueltos	ASTM D 2540 C	5 ppm	25500
Conductividad	ASTM D 1125	5 μ S/cm	12470

TABLA 8.- Resultados del Análisis físico químico del Agua Acida de la Mina Colquiri – Nivel -470 m

Los resultados del análisis químico por metales pesados de la muestra de las Aguas Ácidas de la Mina Colquiri – Nivel -470 m, es presentado en la Tabla 9.

Elemento	Norma	Límite de Detección (ppm)	Agua Acida N -470 (ppm)
Arsénico As	ASTM D 2972	0.002	0.011
Cadmio Cd	ASTM D 3557 A	0,01	0.23
Cobre Cu	ASTM D 1688 A	0,02	0.2
Hierro Fe	ASTM D 1068 A	0,03	3387.39
Plomo Pb	ASTM D 3559 A	0,1	1.01
Zinc Zn	ASTM D 1691	0,005	1616.37

TABLA 9.- Resultados Análisis Químico por Metales Pesados del Agua Acida de Mina Colquiri Nivel -470 m

Finalmente, el análisis por Aniones de la muestra es resumida en la Tabla 10.

Elemento	Norma	Límite de Detección (ppm)	Agua Acida N-470(ppm)
Sulfato	ASTM D 516	1	14365.6

TABLA 10.-Resultado del Análisis de Anión Principal del Agua Acida de la Mina Colquiri – Nivel -470 m

III.1.4.2 Pruebas de Neutralización- Precipitación

Las pruebas de Neutralización – Precipitación fueron realizadas en un vaso de precipitación con agitación magnética con volúmenes de 500 ml. de agua ácida de mina.

La Fotografía 4, muestra la disposición del equipo en el que se realizaron las pruebas de neutralización precipitación.

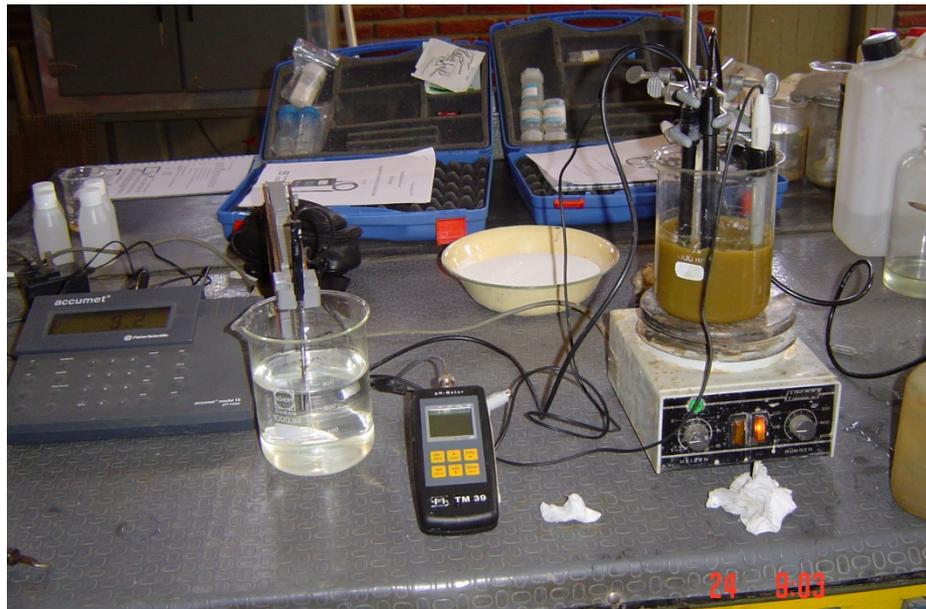


Foto 4.- Disposición del Equipo utilizado para las pruebas de Neutralización - Precipitación

Los instrumentos de medición empleados fueron:

- Medidor de pH
- Medidor de Conductividad y Temperatura

El agente empleado para la neutralización fue cal.

La Tabla 11, muestra el análisis químico de la cal empleada.

Cal	
% CaO	62.35

TABLA 11.- Resultado del Análisis de la Cal empleada

Se corrieron pruebas preliminares de neutralización – precipitación a objeto de determinar el comportamiento del pH en función de la adición de cal.

La figura 13 muestra los resultados obtenidos.

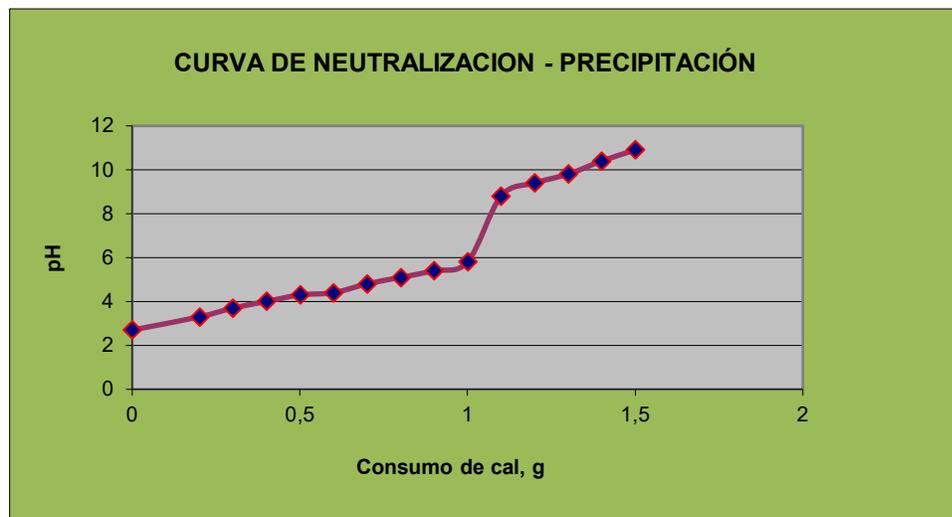


Fig. 13.- Curva de Neutralización – precipitación Con Cal

Después de llevar adelante las pruebas de neutralización – precipitación por agitación con cal, se efectuó la filtración al vacío usando el equipo preparado para este efecto y que es presentado en la Fotografía 5.



Foto 5.- Disposición del Equipo utilizado para la Filtración al Vacío de los productos de la Neutralización – Precipitación

La Tabla 12, muestra los datos obtenidos en la etapa de la filtración.

Datos Técnicos	Resultados
pH final de la pulpa	9.8
Volumen de filtrado (ml)	490
Peso Húmedo del Queque (gr)	26.05
Peso Seco del Queque (gr)	8.23
Humedad del Queque (%)	68.41
Peso Específico del Queque Seco (gr/cm ³)	2.685

TABLA 12.-Resultado de la precipitación del Agua Ácida de Mina del Nivel -470 m de la Mina Colquiri con Cal

Los resultados del análisis químico de la solución filtrada efectuado en SPECTROLAB y su comparación con los límites permisibles establecidos en el Anexo 2 del Reglamento en materia de Contaminación Hídrica de la Normativa Ambiental Boliviana, es presentada en la Tabla 13.

Parámetros	Unidad	Método	Límite Detección/ppm	N-470	Límite Permisible
pH		ASTM D 1293		9.8	6 – 9
Arsénico As	[mg/L]	ASTM D 2972	0.002	<0,002	1.0
Cadmio Cd	[mg/L]	ASTM D 3557 A	0,01	0.03	0.3
Cobre Cu	[mg/L]	ASTM D 1688 A	0,02	<0,02	1.0
Hierro Fe	[mg/L]	ASTM D 1068 A	0,03	< 0,03	1.0
Plomo Pb	[mg/L]	ASTM D 3559 A	0,1	<0,1	0.6
Zinc Zn	[mg/L]	ASTM D 1691	0,005	2.96	3.0

TABLA 13.- Resultados de la prueba de Neutralización – Precipitación del Agua Ácida de Mina del Nivel -470 m de la Mina Colquiri con Cal

De los resultados de la tabla anterior, es posible deducir que la descarga de la solución del Tratamiento por Neutralización – Precipitación de las Aguas Ácidas del Nivel -470m de la Mina Colquiri, **puede ser utilizada incluso para riego.**

A objeto de determinar los datos técnicos referidos a la decantabilidad del producto precipitado, que serán necesarios para el diseño y dimensionamiento de los equipos de espesamiento, se realizaron pruebas de decantación sin y con uso de floculante.

Las curvas de decantación normal vertical, son presentadas en la figura 4 y 5.

La Fotografía 6 permite mostrar la disposición de la probeta utilizada para las pruebas de sedimentación.



Foto 6.- Disposición de la Prueba de Probeta utilizada para determinar las Curvas de Sedimentación de los productos de la Neutralización – Precipitación

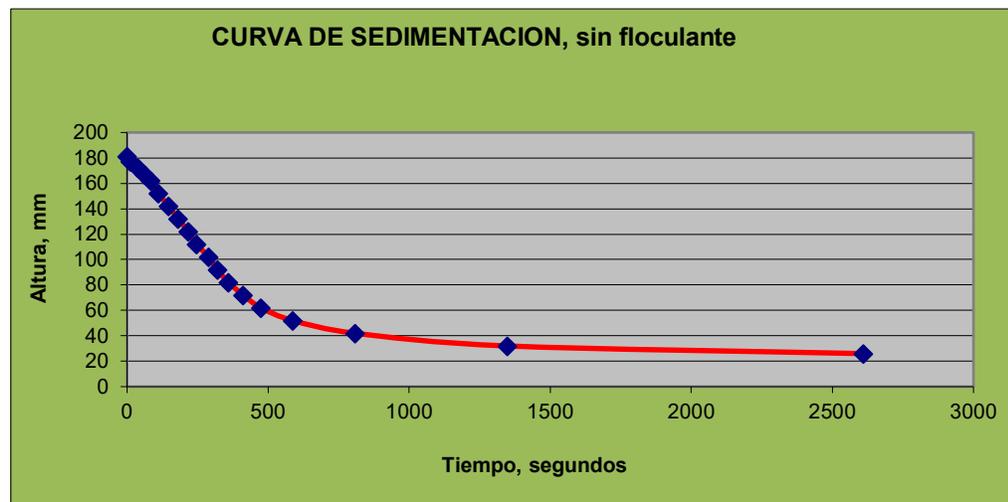


Fig.14.- Curva de Sedimentación del Producto de la Neutralización-Precipitación usando cal (sin el uso de floculante)

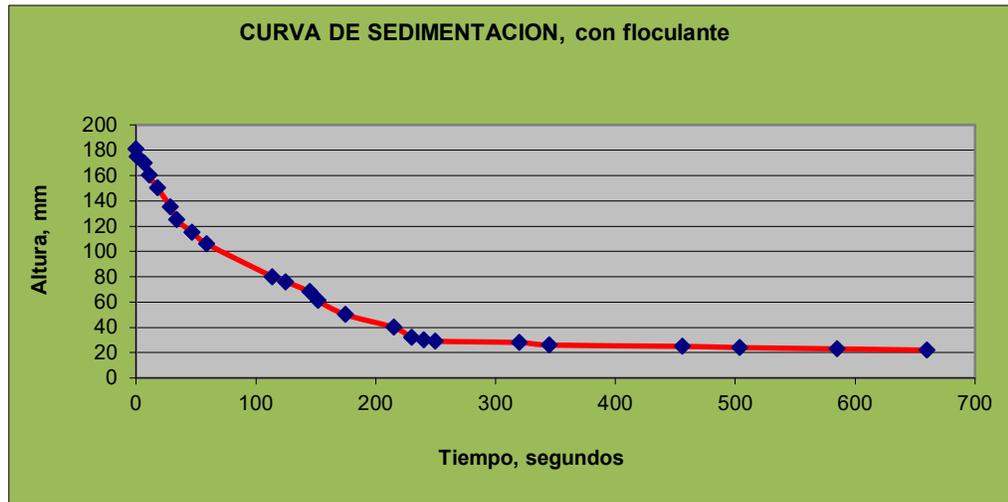


Fig.15.- Curva de Sedimentación del Producto de la Neutralización-Precipitación usando cal (con el uso de floculante)

Para el cálculo del área requerida para el diseño y dimensionamiento de sedimentadores tipo “lamela”; es necesario, obtener datos de sedimentación con probeta inclinada. Los resultados obtenidos en dichas pruebas son presentadas en las figuras 6 y 7.

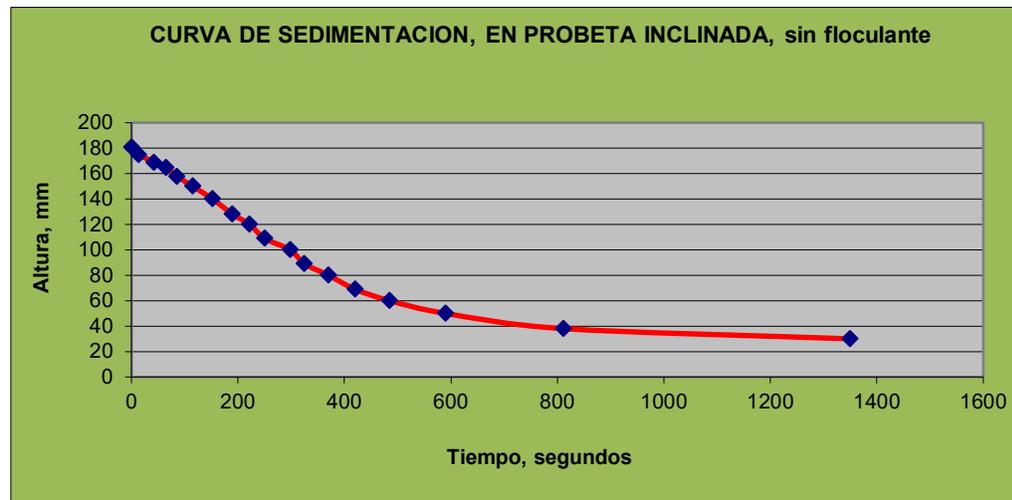


Fig. 16.- Curva de Sedimentación del Producto de la Neutralización-Precipitación usando cal en probeta inclinada (sin el uso de floculante y probeta inclinada)

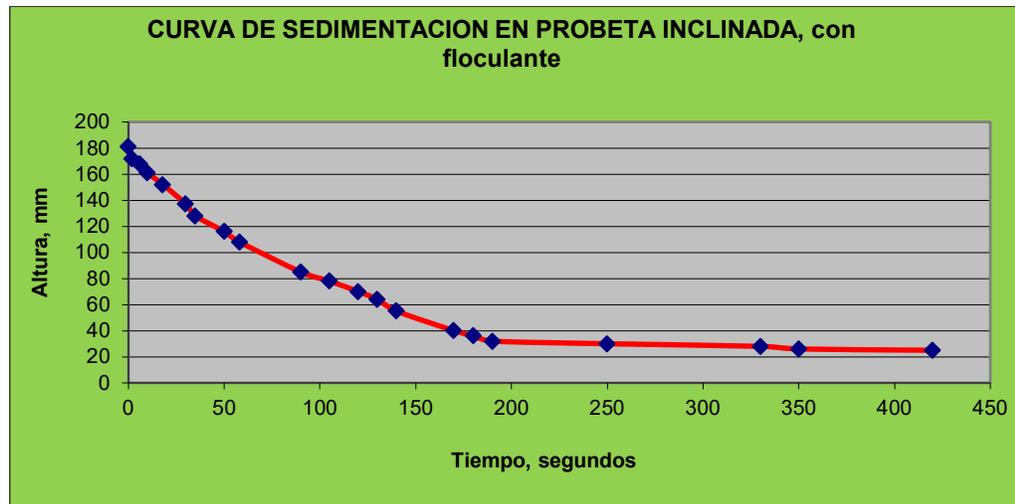


Fig. 17.- Curva de Sedimentación del Producto de la Neutralización-Precipitación usando cal en probeta inclinada (con el uso de floculante y probeta inclinada)

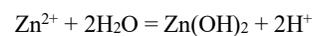
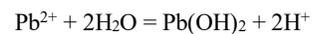
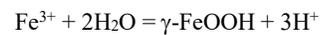
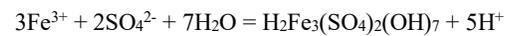
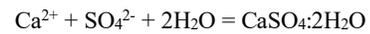
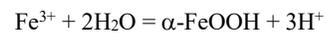
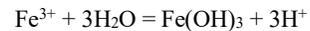
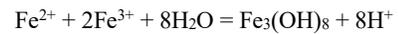
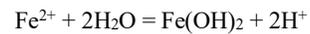
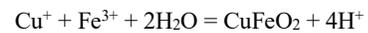
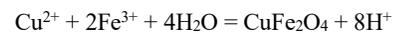
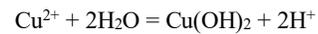
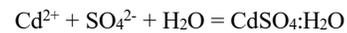
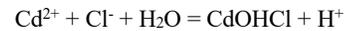
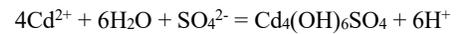
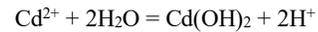
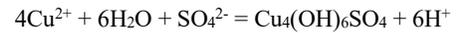
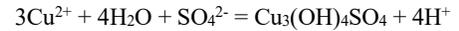
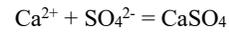
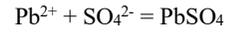
De la prueba de toxicidad con el producto de precipitación fue desarrollada de acuerdo a la normativa 40 CFR 261.30 (EPA 1312). De los resultados obtenidos, se puede concluir que los precipitados obtenidos “no son estables químicamente”; por lo que, su deposición final requerirá de medidas ambientales.

Finalmente, se llevó a cabo la predicción de los productos de precipitación mediante el software “Visual Minteq”. Los resultados obtenidos son presentados en la Tabla 14.

Fase Sólida	Mineral	log IAP	Indice de Saturación S.I.
PbSO ₄	Anglesita	-14.595	-6.732
CaSO ₄	Anhidrita	-3.736	0.580
Cu ₃ (OH) ₄ SO ₄	Antlerita	-18.558	-27.346
Cu ₄ (OH) ₆ SO ₄	Brocantita	-16.333	-32.789
Cd(OH) ₂		13.966	-0.253
Cd ₄ (OH) ₆ SO ₄		30.634	2.234
CdOHCl		2.168	-1.557
CdSO ₄ ·H ₂ O		-11.281	-9.747
Cu(OH) ₂		2.224	-6.793
CuFe ₂ O ₄	Ferrita cúprica	10.722	3.456
CuFeO ₂	Ferrita cuprosa	4.928	13.749
Fe(OH) ₂		13.314	-0.250
Fe ₃ (OH) ₈		21.746	1.524
Fe(OH) ₃	Ferrihidrita	4.216	0.579
α-FeOOH	Goethita	4.232	3.373
CaSO ₄ ·2H ₂ O	Yeso	-3.769	0.847
H ₂ Fe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₇	H-Jarosita	-37.848	-27.151
γ-FeOOH	Lepidocrocita	4.232	2.861
FeSO ₄ ·7H ₂ O	Melanterita	-12.032	-9.699
Pb(OH) ₂		10.636	2.130
Zn(OH) ₂		10.703	-1.497
ZnSO ₄ ·H ₂ O		-14.544	-14.174

TABLA 14.-Índice de Saturación de la Especies Sólidas (pH=9.8)

Stoichiometry and mineral components



Nota.- En ANARANJADO, las especies que precipitaron. (Índice de Saturación > a 1.0)

CAPÍTULO-IV

CAPÍTULO IV

MARCO PROPOSITIVO

IV.1 CONSTRUCCIÓN DE PLANTA DE TRATAMIENTO EN EL NIVEL -405

Como observamos en el capítulo anterior el reemplazo del drenaje ácido de mina del nivel -470 del Centro Minero Colquiri (10.560 m³/h), luego de ser tratada, es favorable por las siguientes consideraciones:

- Mitigaría el déficit de agua que se tiene actualmente en interior mina
- Permitiría reducir el volumen de agua destinada a la mina desde el sector de Ocavi
- Incrementaría el volumen de agua potable para el uso de la población civil.
- Reduciría la cantidad DAM que es enviado al dique de colas y con ello la cantidad de residuo a ser tratado al momento del cierre de operaciones del Centro Minero Colquiri.

En virtud de ello proponemos:

Realizar neutralización del DAM del nivel -470 en el nivel -405, sector de veta Blanca.

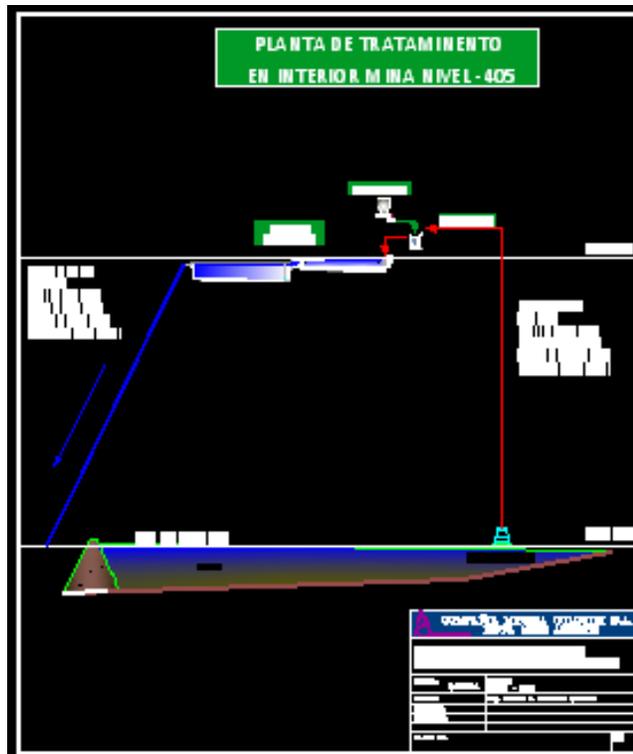


Fig. 18.- Propuesta de Planta de Tratamiento (DAR del Nivel -470) en el Nivel -405



Foto 7.- Ingreso a la tasa de bombeo del Nivel -470



Foto 8.- Bomba Estacionaria en el Nivel -470 de 100 HP

IV.2 CAUDAL MINA Y HORARIO DE BOMBEO

Los cuadros siguientes muestran el volumen de DAM bombeado desde el Nivel -470 al Nivel -405, el 2009 cuyo caudal promedio alcanzó a 10.56 m³/Hr

NIVEL DE BOMBEO NIVEL -470	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Días Mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Total m3 bombeado a niv-405	7326,6	6550	7504,8	9124,8	9184,4	8436	6974,4	7687	7758,6	6957	7355,4	7604,4	92463,4
Tiempo de bombeo niv-470 (Hrs)	133	144	215	265	267	208	215	188	147	157	127	132	2199
Horas de Bombeo día Promedio	4,29	5,14	6,94	8,83	8,61	6,93	6,94	6,06	4,90	5,06	4,23	4,26	6,02
Volumen m3 de Bombeo día promedio	236,34	233,93	242,09	304,16	296,27	281,20	224,98	247,97	258,62	224,42	245,18	245,30	253,32
Volumen m3 de Bombeo/hr promedio	9,85	9,75	10,09	12,67	12,34	11,72	9,37	10,33	10,78	9,35	10,22	10,22	10,56

TABLA 15.-Resumen Bombeo de Agua Nivel -470 de Interior Mina (Gestión 2009)

HORARIOS PROMEDIO DE BOMBEO DEL NIVEL -470						
PRIMER TURNO			DE		A	TIEMPO
MAÑANA	1		6:00		6:45	0:45
	2		9:00		9:50	0:50
TARDE	3		13:30		14:30	1:00
	4		15:45		16:30	0:45
						3:20
SEGUNDO TURNO			DE		A	TIEMPO
MAÑANA	5		18:30		19:30	1:00
	6		22:00		22:45	0:45
TARDE	7		1:30		2:10	0:40
	8		3:00		3:35	0:35
						3:00

TABLA 16.-Horarios Promedio de Bombeo del nivel -470

Se observa que el bombeo se realiza en promedio 6h y 20 min cada día.

IV.3 CAUDAL PARA TRATAMIENTO

De acuerdo a los registros de caudal y horario de bombeo se realiza el siguiente análisis para establecer el volumen promedio de agua, caudal de tratamiento y Dimensión del Tanque de Regulación:

Análisis (Caudal y Tiempo de Bombeo)

Caudal de Bombeo Máx. = 2,93 l/s	10,56 m ³ /hr
Tiempo de Bombeo MAXIMO =	6,33 Hr
Volumen de Bombeo día =	66,84 m ³
Volumen Asumido día =	70,00 m³

IV.4 CAUDAL REQUERIDO EN EL NIVEL -470

Item	Descripción	Consumo Unit. (l/tal)	Cantidad Parajes	No. Total Taladros	Diario (l/día)	Diario (m ³ /día)
1	Perforadora stoper	35	2	30	1050	1,1
2	Perforadora jckleg	50	2	64	3200	3,2
3	Stope Master	2295	3	15	34425	34,4
4	Simba	2700	1	5	13500	13,5
5	Jumbos	500	1	35	17500	17,5
Total Requerimiento de Agua en el Nivel -470					69675	69,7

TABLA 17.-Consumo de Agua Requerida en el Nivel -470

Volumen Requerido en Nivel -470 día = 69,7 m³

Del análisis del caudal tratado y el caudal requerido en el nivel -470 se concluye que toda el agua tratada del nivel -470, podría ser reutilizada para trabajos en el mismo nivel.

IV.5 COMPONENTES DE LA PROPUESTA DE TRATAMIENTO

Se propone los siguientes componentes:

- a) **Tubería de Conducción**, esta conducirá el agua de bombeo de interior mina del nivel -470 al nivel -405.
- b) **Galería Abandonada entre el Nivel -405 y el Nivel -470 para Lodos**, el tratamiento del DAM del nivel -470 por su pH bajo, requiere adición de cal, la cual sumada a la turbidez generada por los lodos, serán depositados en el rajo de veta Blanca.
- c) **Tanque de Regulación**, necesario para realizar la regulación del agua de bombeo del nivel -470 y dotar de un caudal de aporte constante a la planta de tratamiento.
- d) **Tanque Acondicionador y Agitador**, tiene por objetivo realizar el mezclado del reactivo (cal) y floculante antes de su ingreso a la piscina de tratamiento.
- e) **Sistema Dosificador de floculante**, se plantea la adición de floculante para coadyuvar a la decantación dentro de la piscina de tratamiento.
- f) **Sistema de Vibración para Adición de Cal**, se plantea un sistema por vibración para la adición de cal, el cual será regulando la misma tomando en cuenta los requerimientos para tratamiento.

IV.6 EVALUACIÓN ECONÓMICA

IV.6.1 Costo de Instalación

ITEM	DESCRIPCIÓN DE ITEMS	COSTO (\$us)
1	TUBERIA DE HDPE 3.2 KG/CM2 110 MM	1136,90
2	STUB END HDPE 6 KG/CM2 110 MM	91,83
3	DOSIFICADOR FLOCULANTE	2200,00
4	TANQUE ACONDICIONADOR Y AGITADOR	4800,00
5	TANQUE DE REGULACIÓN	4400,00
6	SISTEMA DE VIBRACIÓN Y DOSIFICADO DE CAL	3800,00
7	BOMBA WARMAN PARA LODOS (100HP)	20000,00
8	IMPREVISTOS	3571,27
	TOTAL	40000,00

TABLA 18.-Costo de Instalación de Propuesta

IV.6.2 Costo de Materia Prima

AGENTE	CONSUMO ESPECÍFICO (Kg/l)	CONSUMO DIARIO AGENTE ALCALIZANTE (Ton/día)	COSTO DIARIO AGENTE ALCALIZANTE (\$us/día)
Cal	2.685	0.154	13.12

TABLA 19.-Costo de Materia Prima

La tabla 19, muestra el costo diario que representaría el tratamiento del drenaje ácido del nivel -470 (\$us 13.12). De la misma se deduce que anualmente se emplearía 56.21 ton de Cal y el mismo tendría un costo total de \$us 5000.

IV.6.3 Costo Mano de Obra

CANTIDAD	PERSONAL	(\$US/Mes)	(\$US/Año)
3	Obreros	300	3600

TABLA 20.-Costo Mano de Obra

IV.6.4 Costo Total de Instalación y Tratamiento

ITEM	DESCRIPCIÓN DE ITEMS	COSTO (\$us)
1	COSTO DE INSTALACIÓN	40000
2	COSTO DE MATERIA PRIMA (CaO)	5000
3	MANO DE OBRA	3600
4	MANTENIMIENTO Y REPARACIONES	4000
5	ENERGÍA Y COMBUSTIBLE	2000
6	GASTOS ADMINISTRATIVOS	1500
7	IMPREVISTOS	900
	TOTAL	57000

TABLA 21.-Costo Total de Instalación y Tratamiento

IV.7 LUGAR DE DISPOSICIÓN DE LODOS EN INTERIOR MINA

La masa de residuo producido en la neutralización (lodos) se dispondrán a los largo del rajo de veta **Blanca** que se extiende por unos 800 metros entre el nivel -405 y el nivel -470 (desnivel de 65 m y un ancho promedio de 10m).

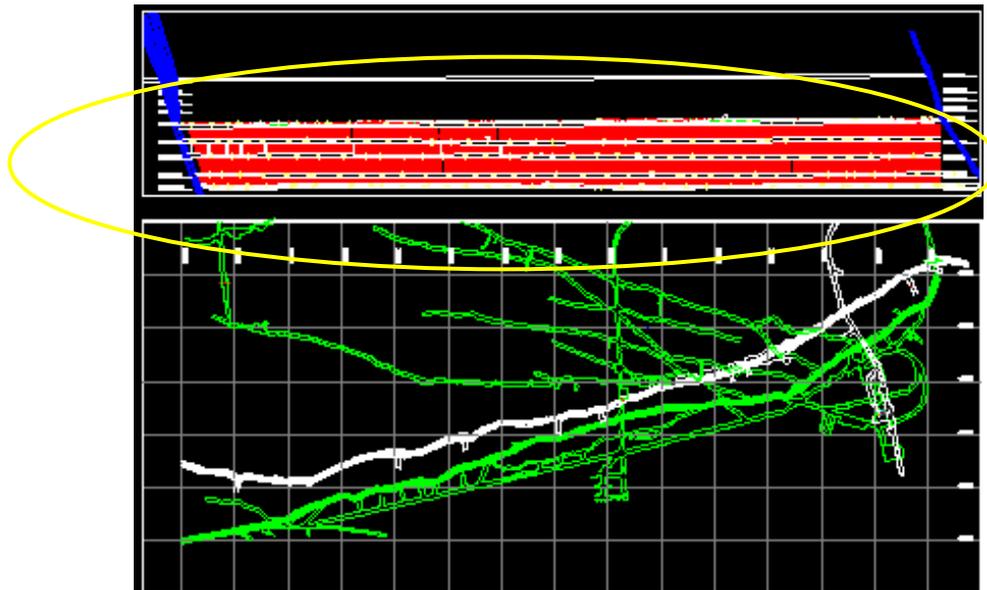


Fig. 19.- Rajo de Veta Blanca Propuesto Para La Acumulación de Lodos

NOTA.- DE COLOR ROJO RAJO VETA BLANCA DESDE NIVEL -405 A NIVEL -470

La estructura de la veta Blanca tienen rumbos que varían entre N 30° E a N 10° W e inclinaciones entre 60° a 80° lo que permitirá la deposición del residuo producido en la neutralización (lodos) por simple gravedad.

IV.7.1 Tiempo de duración del Rajo de Veta Blanca entre el Nivel -405 y el -470

La Tabla 22 muestra la cantidad de masa de residuo sólido que se producirá en la neutralización y la tabla 23 la cantidad de masa de residuo sólido que se puede almacenarse en el rajo de veta Blanca.

LODO	KILOGRAMO	TONELADAS
DÍA	187950 Kg	187,95 Ton.
AÑO	68601750 Kg	68601,75 Ton.

TABLA 22.-Cantidad de residuo sólido producido en la neutralización

VETA	KILOGRAMO	TONELADAS
BLANCA	1288800000 Kg	1288800 Ton.

TABLA 23.-Cantidad de residuo sólido que se puede almacenar en Rajo de veta Blanca

Por lo tanto:

El rajo existente en veta Blanca entre el nivel -405 y nivel -470 alcanzaría para la disposición de lodos por espacio de 18 años.

IV.7.2 Propuesta de Nuevo Balance Hídrico de Colquiri

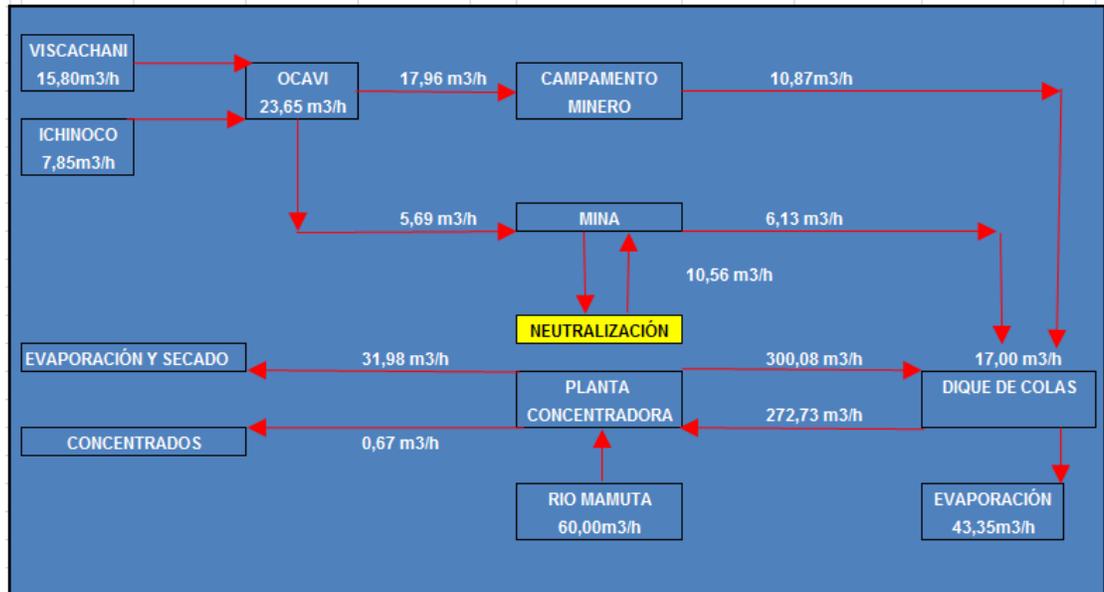


Fig. 20.- Propuesta de Nuevo Balance Hídrico del Centro Minero Colquiri

Con la neutralización del DAM del Nivel -470 y su empleo se reducirá la cantidad de agua que ingresa a interior mina desde el sector de Ocavi, permitiendo de esta manera incrementar el caudal de agua para el consumo de la población civil de Colquiri desde 12,96 m³/h a 17,96 m³/h.

Así mismo se incrementa el caudal en interior mina de 10,69 m³/h a 16,25 m³/h, eliminando el déficit de agua que actualmente se tiene.

El caudal de agua que se evacua al dique de colas se reduce de 27 m³/h a 17m³/h, permitiendo de esta manera que a futuro los costos de restauración del dique de colas sean significativamente menores.

CAPÍTULO-V

CAPÍTULO V

V.1 CONCLUSIONES

- La caracterización físico-química de las aguas ácidas de mina de los niveles – 470, - 405 y - 365 reveló que las mismas tienen una elevada acidez y concentraciones de metales pesados más altas que las permisibles por la ley del medioambiente de nuestro país.
- El DAM del nivel – 470 es menos ácido y está menos contaminada que el de los niveles -405 y -365.
- El tratamiento del DAM del nivel -470 empleando como agente neutralizante la Cal es la opción económica y técnica más apropiada para la mina Colquiri, en virtud de:
 - La solución final del tratamiento por Neutralización con Cal del Nivel -470, puede ser utilizada incluso para riego pues alcanza a $\text{pH} = 9.8$.
 - El costo total estimado para la instalación de la planta de neutralización en el nivel -405 es de 40000 \$us (Dólares Americanos) y el costo anual para la neutralización del DAM del nivel -470, empleando Cal, es de 5000 \$us (Dólares Americanos).
 - El rajo existente en veta Blanca entre el nivel -405 y nivel -470 sería empleado como disposición final para los lodos y abastecería para 18 años.
 - El buzamiento de veta Blanca entre 60° a 80° permitiría la deposición del residuo producido en la neutralización (lodos) desde el nivel -405 al nivel -470 por simple gravedad.

V.2 BIBLIOGRAFÍA

- GERARDO ZAMORA ECHENIQUE: Formación, Predicción y Tratamiento de DAM, Oruro, 2007.
- CARLOS SANDY ANTEZANA: Metodologías y Técnicas de Investigación, Oruro, 1999.
- FAUSTO BALDERRAMA FLORES, ANTONIO SALAS CASADO: Neutralización del DAR Combinando Procesos de Lixiviación Y Recuperación de Cobre Metálico, UTO-Carrera de Ingeniería Metalúrgica, 2009
- F.M. ROMERO: Drenaje de ácido en zonas mineras, Caracterización, Manejo y Control, México, 2008.
- VENTURA BECERRIL, JOSÉ FLORES, YANET ZAMORA, ROSA RIVERO: Generación de Drenaje Ácido de Mina de Jales de Tizapa México, Universidad Autónoma de México, México.
- LÓPEZ PAMO: Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro, Boletín Geológico, 2002
- ESTANISLAO DE LA CRUZ CARRASCO: Mitigación de drenaje ácido en minas subterráneas aplicando fangos artificiales, Revista del Instituto de Investigaciones, Perú, 2006
- ROSARIO HUANCA B: Tratamiento de Drenaje Ácido de Mina Para el cumplimiento de la Ley de medio Ambiente, UMSA-Facultad Técnica, La Paz, 2003.

ANEXO-1
FOTOS



Fotografía N° 9
Nivel -405 Veta Rosario



Fotografía N° 10
Nivel -470 Veta Blanca



Fotografía N° 11
Nivel -405 SN1
Veta San Antonio



Fotografía N° 12

Empleo de Agua para refrigeración de máquina de perforación



Fotografía N° 13

DAM en el Nivel -470



Fotografía N° 14

DAM en el Nivel -470



Fotografía N° 15

Toma de muestra del Nivel -365



Fotografía N° 16

Toma de muestra del Nivel -405

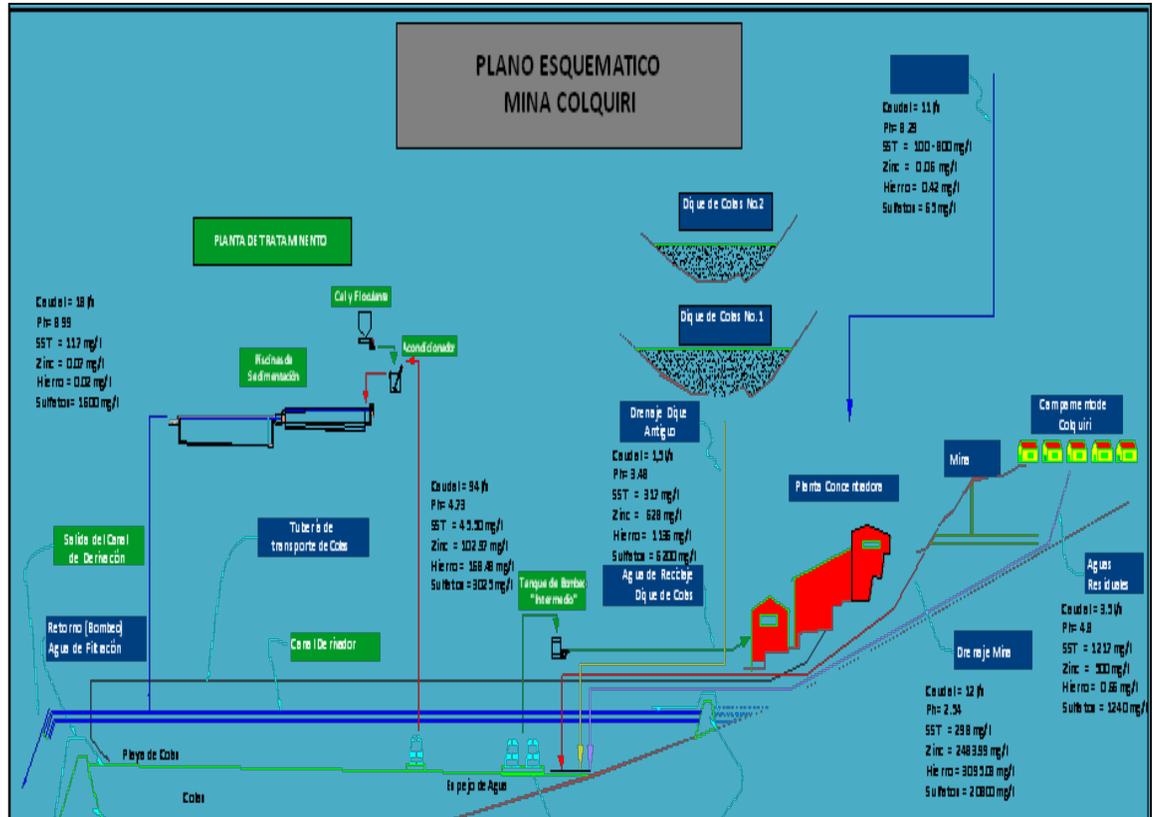


Fotografía N° 17

Toma de muestra del Nivel -470

ANEXO-2
BALANCE DE AGUA
COLQUIRI

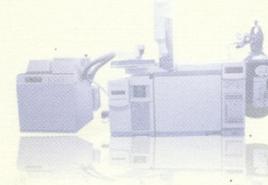
BALANCE DE AGUA CENTRO MINERO COLQUIRI



ANEXO-3
ANÁLISIS QUÍMICO



Servicios Analíticos - Laboratorio Químico
Unidad Descentralizada - Universidad Técnica de Oruro



INFORME DE ENSAYO

N°.: 24300

NOMBRE DEL CLIENTE Ing. Edgar Camacho
DIRECCIÓN DEL CLIENTE Calle Presidente Montes entre Belzu y Oblitas
PROCEDENCIA Mina Colquiri**
CARACTERISTICAS Agua
RESPONSABLE MUESTREO ** FECHA DE MUESTREO **
FECHA RECEPCION: 2009-10-14 FECHA DE ENSAYO Según detalle
PAGINA 1/4 FECHA DE ENTREGA 2009-10-30

RESULTADOS:		Código Cliente	470	405
		Código Laboratorio	5677	5678
Parámetros	Unidades	Fecha de Ensayo	Norma / Método	L.D.
pH		2009-10-16	ASTM D 1293-99	
Conductividad	[μS/cm]	2009-10-16	ASTM D 1125-95	5
Sólidos Disueltos	[mg/l]	2009-10-30	STM 2540 C	5
Sólidos Suspendidos	[mg/l]	2009-10-30	DIN 38409 T2	1
Cianuro Libre CN ₂ ⁻	[mg/l]	2009-10-14	ASTM D 2036-98	0,002
Cloruro Cl ⁻	[mg/l]	2009-10-20	ASTM D - 512-04	1
Bicarbonatos HCO ₃ ⁻	[mg/l]	2009-10-12	ASTM D 3875-03	3
Sulfatos SO ₄ ⁼	[mg/l]	2009-10-18	ASTM D 516-02	0,2
Sulfuro S ⁼	[mg/l]	2009-10-18	EPA 376.2	0,001

REFERENCIAS

** Responsabilidad del Cliente

LD/ ppm = Limite de determinación en partes por millón .

Valor con símbolo "<" implica por debajo del límite de determinación.

Conductividad Electrica = microsiemens /cm = micromhos/cm, medida a 21,2 °C

spectro lab
Servicios Analíticos - Laboratorio Químico
Unidad Descentralizada
Universidad Técnica de Oruro

T.S. Rosmery Torrez Y.
Supervisor

Ing. Jenny A. Espinoza Z.
Jefe de Laboratorio

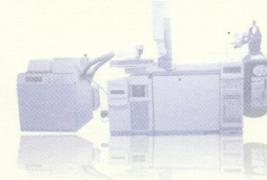
Ing. Juan Carlos Montaña S.
Resp. Control de Calidad

- Las firmas de los responsables de este trabajo confirman que los resultados finales reflejan verdaderamente los datos originales. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas.
- El Informe de Ensayo es válido solo si presenta sello seco.
- En caso de que el laboratorio no efectuó el muestreo, no es responsable para la representabilidad, ni la preservación de las muestras.
- Las muestras serán almacenadas por un lapso no mayor a 3 meses en un depósito del laboratorio (en relación a la estabilidad).
- Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin previa autorización escrita del laboratorio.

Dirección: Ciudadela Universitaria
Zona Sud: Final Av. Dehene, Bloque Metalurgia
Casilla 252

e-mail: spectrolab@coteor.net.bo
Página Web: <http://www.uto.edu.bo/servicios/spectrolab.html>
Oruro - Bolivia

Tel/Fax.: (591-2) 5260008
Telfs.: 5262983
5264666



INFORME DE ENSAYO

Nº.: 24300

NOMBRE DEL CLIENTE Ing. Edgar Camacho
DIRECCIÓN DEL CLIENTE Calle Presidente Montes entre Belzu y Oblitas
PROCEDENCIA Mina Colquiri**
CARACTERÍSTICAS Agua
RESPONSABLE MUESTREO **
FECHA RECEPCION: 2009-10-14 **FECHA DE MUESTREO** **
PAGINA 4/4 **FECHA DE ENSAYO** Según detalle
FECHA DE ENTREGA 2009-10-30

RESULTADOS:					Código Cliente	365	325
					Código Laboratorio	5679	5680
Parámetros	Unidades	Fecha de Ensayo	Norma / Método	L.D.			
Antimonio	Sb [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 3697-02	0,002	0,002	0,002	
Arsénico	As [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 2972-03B	0,002	0,037	0,194	
Calcio	Ca [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 511-03	0,02	51,67	151,05	
Cadmio	Cd* [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 3557-02A	0,05	3,57	7,24	
Cobre	Cu* [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 1688-02A	0,05	3,53	10,45	
Cromo VI	Cr ⁶⁺ [mg/l]	2009-10-12	USGS I 1230-85	0,005	<0,005	<0,005	
Estaño	Sn [mg/l]	2009-10-16	EPA 7870 (SW-846)	0,5	<0,5	<0,5	
Hierro	Fe [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 1068-05A	0,02	3639,13	5631,08	
Magnesio	Mg [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 511-03	0,04	684,87	699,12	
Plomo	Pb* [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 3559-03A	0,03	0,43	0,62	
Potasio	K [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 4191-03	0,01	1,51	0,60	
Silicio	Si [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 859-05	0,002	18,014	43,901	
Sodio	Na [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 3561-02	0,03	9,11	2,97	
Zinc	Zn* [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 1691-02A	0,05	2567,14	3605,08	

REFERENCIAS

** Responsabilidad del Cliente

LD/ ppm = Límite de determinación en partes por millón .

Valor con símbolo "<" implica por debajo del límite de determinación.

(*) Parámetro que es parte del alcance de Acreditación en el marco del Programa de Reconocimiento PRS-001:2005

DTA-

T. S. Rosmery Torrez Y.
Supervisor

Ing. Jenny A. Espinoza Z.
Jefe de Laboratorio

Ing. Juan Carlos Montaña S.
Resp. Control de Calidad

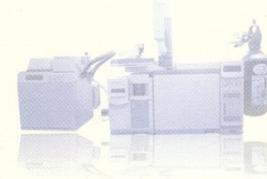

 Servicios Analíticos - Laboratorio Químico
 Unidad Descentralizada
 Universidad Técnica de Oruro

- Las firmas de los responsables de este trabajo confirman que los resultados finales reflejan verdaderamente los datos originales. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas.
- El Informe de Ensayo es válido solo si presenta sello seco.
- En caso de que el laboratorio no efectuó el muestreo, no es responsable para la representabilidad, ni la preservación de las muestras.
- Las muestras serán almacenadas por un lapso no mayor a 3 meses en un depósito del laboratorio (en relación a la estabilidad).
- Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin previa autorización escrita del laboratorio.

Dirección: Ciudadela Universitaria
 Zona Sud: Final Av. Dehene, Bloque Metalurgia
 Casilla 252

e-mail: spectrolab@coteor.net.bo
 Página Web: <http://www.uto.edu.bo/servicios/spectrolab.html>
 Oruro - Bolivia

Tel/Fax.: (591-2) 5260008
 Telfs.: 5262983
 5264666



INFORME DE ENSAYO

N°.: 24300

NOMBRE DEL CLIENTE Ing. Edgar Camacho
DIRECCIÓN DEL CLIENTE Calle Presidente Montes entre Belzu y Oblitas
PROCEDENCIA Mina Colquiri**
CARACTERISTICAS Agua
RESPONSABLE MUESTREO **
FECHA RECEPCION: 2009-10-14 **FECHA DE MUESTREO** **
PAGINA 3/4 **FECHA DE ENSAYO** Según detalle
FECHA DE ENTREGA 2009-10-30

RESULTADOS:

Parámetros	Unidades	Fecha de Ensayo	Norma / Método	L.D.	Código Cliente	
					470	405
					Código Laboratorio	
					5677	5678
Antimonio	Sb [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 3697-02	0,002	0,003	0,002
Arsénico	As [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 2972-03B	0,002	0,011	0,029
Calcio	Ca [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 511-03	0,02	286,22	186,75
Cadmio	Cd* [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 3557-02A	0,05	0,23	0,38
Cobre	Cu* [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 1688-02A	0,05	0,20	0,70
Cromo VI	Cr ⁶⁺ [mg/l]	2009-10-12	USGS I 1230-85	0,005	<0,005	<0,005
Estaño	Sn [mg/l]	2009-10-16	EPA 7870 (SW-846)	0,5	<0,5	<0,5
Hierro	Fe [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 1068-05A	0,02	3387,39	2883,19
Magnesio	Mg [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 511-03	0,04	674,39	462,97
Plomo	Pb* [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 3559-03A	0,10	1,01	0,62
Potasio	K [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 4191-03	0,01	13,04	6,94
Silicio	Si [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 859-05	0,002	26,641	37,431
Sodio	Na [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 3561-02	0,03	2,97	2,14
Zinc	Zn* [mg/l]	2009-10-16	ASTM D 1691-02A	0,05	1616,37	1736,59

REFERENCIAS

** Responsabilidad del Cliente

LD/ ppm = Límite de determinación en partes por millón .

Valor con símbolo "<" implica por debajo del límite de determinación.

(*) Parámetro que es parte del alcance de Acreditación en el marco del Programa de Reconocimiento PRS-001:2005

DTA-

T.S. Rosmery Torrez Y.
Supervisor

Ing. Jenny A. Espinoza Z.
Jefe de Laboratorio

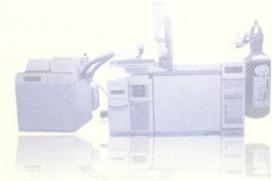
Ing. Juan Carlos Montaña S.
Resp. Control de Calidad

- Las firmas de los responsables de este trabajo confirman que los resultados finales reflejan verdaderamente los datos originales. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas.
- El Informe de Ensayo es válido solo si presenta sello seco.
- En caso de que el laboratorio no efectuó el muestreo, no es responsable para la representabilidad, ni la preservación de las muestras.
- Las muestras serán almacenadas por un lapso no mayor a 3 meses en un depósito del laboratorio (en relación a la estabilidad).
- Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin previa autorización escrita del laboratorio.

Dirección: Ciudadela Universitaria
Zona Sud: Final Av. Dehene, Bloque Metalurgia
Casilla 252

e-mail: spectrolab@coteor.net.bo
Página Web: <http://www.uto.edu.bo/servicios/spectrolab.html>
Oruro - Bolivia

Tel/Fax.: (591-2) 5260008
Telfs.: 5262983
5264666



INFORME DE ENSAYO

Nº.: 24300

NOMBRE DEL CLIENTE Ing. Edgar Camacho
DIRECCIÓN DEL CLIENTE Calle Presidente Montes entre Belzu y Oblitas
PROCEDENCIA Mina Colquiri**
CARACTERISTICAS Agua
RESPONSABLE MUESTREO **
FECHA RECEPCION: 2009-10-14 **FECHA DE MUESTREO** **
PAGINA 2/4 **FECHA DE ENSAYO** Según detalle
FECHA DE ENTREGA 2009-10-30

RESULTADOS:		Código Cliente		365	325
		Código Laboratorio		5679	5680
Parámetros	Unidades	Fecha de Ensayo	Norma / Método	L.D.	
pH		2009-10-16	ASTM D 1293-99		2,5
Conductividad	[µS/cm]	2009-10-16	ASTM D 1125-95	5	12550
Sólidos Disueltos	[mg/l]	2009-10-30	STM 2540 C	5	28238
Sólidos Suspendidos	[mg/l]	2009-10-30	DIN 38409 T2	1	939
Cianuro Libre	CN ₂ ⁻ [mg/l]	2009-10-14	ASTM D 2036-98	0,002	<0,002
Cloruro	Cl ⁻ [mg/l]	2009-10-20	ASTM D - 512-04	1	94
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	2009-10-12	ASTM D 3875-03	3	<3
Sulfatos	SO ₄ ⁻ [mg/l]	2009-10-18	ASTM D 516-02	0,2	18161,8
Sulfuro	S ⁼ [mg/l]	2009-10-18	EPA 376.2	0,001	<0,001

REFERENCIAS

** Responsabilidad del Cliente

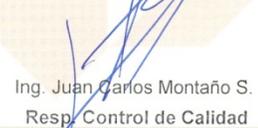
LD/ ppm = Limite de determinación en partes por millón .

Valor con simbolo "<" implica por debajo del limite de determinación.

Conductividad Electrica = microsiemens /cm = micromhos/cm, medida a 21,2 °C


T.S. Rosmery Torrez Y.
Supervisor


Ing. Henry A. Espinoza Z.
Jefe de Laboratorio


Ing. Juan Carlos Montaña S.
Resp. Control de Calidad

- Las firmas de los responsables de este trabajo confirman que los resultados finales reflejan verdaderamente los datos originales. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas.
- El Informe de Ensayo es válido solo si presenta sello seco.
- En caso de que el laboratorio no efectuó el muestreo, no es responsable para la representabilidad, ni la preservación de las muestras.
- Las muestras serán almacenadas por un lapso no mayor a 3 meses en un depósito del laboratorio (en relación a la estabilidad).
- Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin previa autorización escrita del laboratorio.