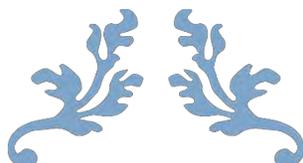




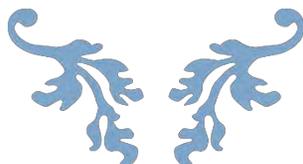
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA



“MEDICIÓN DEL VOLUMEN DE DRENAJE ÁCIDO GENERADO EN LA MINA  
TIZAPA Y PROPUESTA DE MANEJO PARA SU POSTERIOR TRATAMIENTO”



TESIS  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA DE MINAS Y METALURGISTA

PRESENTA:  
NERI OLIVA MARÍA DE LOS ÁNGELES



DIRECTOR DE TESIS:  
M.I. JOSÉ ENRIQUE SANTOS JALLATH

CD. UNIVERSITARIA, D. F. JUNIO, 2014.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Gracias

A mis padres Marcelino y Siria, por todos estos años que han estado a mi lado y me han apoyado. Sin ustedes llegar hasta aquí no hubiese sido posible.

A mis hermanas Alejandra, Elsa, Nancy e Ivonne y a mi hermano Carlos que me han apoyado y han estado conmigo en momentos difíciles.

A Sarita.

A Romelia y a Nicolás por escucharme y alegrar mi vida.

---

---

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se hizo gracias al apoyo del proyecto PAPIIT IN114113 “Control de Drenaje Ácido en Minas Subterráneas mediante un Sistema de Tratamiento Pasivo In Situ”.

A Minera Tizapa S.A DE C.V. de grupo Peñoles, por las facilidades, la ayuda y el apoyo que nos brindaron durante este tiempo.

Inmensamente a esta gran casa de estudios la UNAM, y a la Facultad de Ingeniería por haberme acogido durante tantos años y ayudarme en mi formación como persona.

Al ingeniero José Santos por la invitación al proyecto y el asesoramiento brindado para el desarrollo de este trabajo.

A mis sinodales, los ingenieros Guadalupe Contreras Ordaz, Enrique Cesar Valdéz, Ana Alejandrina Castro Rodríguez y Manuel G. Landa Piedra, por su disponibilidad de tiempo, así como sus comentarios para la mejora de este trabajo.

A mis amigos y compañeros de la Facultad de Ingeniería.

A todos mis profesores que me ayudaron a mejorar como persona y estudiante

Al laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología.

Y a todas las personas que de alguna u otra forma han estado en mi vida. Gracias.

---

---

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	10
<b>CAPITULO 1: GENERALIDADES DE LA MINA TIZAPA</b> .....	12
1.1 Ubicación.....	12
1.2 Historia .....	12
1.3 Condiciones del entorno .....	13
1.3.1 Clima.....	13
1.3.2 Precipitación pluvial .....	13
1.3.3 Hidrología .....	14
1.4 Descripción geológica .....	15
1.5 Obras mineras .....	17
<b>CAPITULO 2: ESCURRIMIENTOS DE AGUA NEUTRA (AN)</b> .....	20
2.1 Condiciones geohidrológicas.....	20
2.2 Escurrimientos neutros .....	24
2.3 Características del agua neutra .....	28
<b>CAPITULO 3: GENERACIÓN Y MANEJO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM)</b> .....	34
3.1 Manifestación .....	34
3.2 Problemática .....	34
3.3 Puntos de generación .....	35
3.4 Canalización .....	42
3.5 Tratamiento.....	44
<b>CAPÍTULO 4: MEDICIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS DE AGUA NEUTRA Y AGUA ÁCIDA</b> .....	49
4.1 Procedimiento de aforo.....	49
4.2 Medición de escurrimientos de agua neutra (AN).....	51

---

---

4.3 Medición de escurrimientos de DAM .....	56
4.4 Volumen de agua neutra y agua ácida total .....	58
<b>CAPÍTULO 5: PROPUESTA DE MANEJO DE LOS ESCURRIMIENTOS DE AGUA .....</b>	<b>61</b>
5.1 Separación de AN en la rampa Gemela.....	61
5.2 Adecuación de los puntos de generación de AN y DAM para su medición .....	62
5.3 Programa de medición .....	63
5.4 Aprovechamiento del agua neutra .....	64
5.5 Canalización del DAM y el AN. ....	64
5.6 Estimación de costos .....	65
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>71</b>

---

---

## Lista de figuras.

<b>Figura 1.</b> Localización geográfica de la unidad Minera Tizapa (Dowa Holdings, Co., Ltd, 2011).....	12
<b>Figura 2.</b> Precipitación anual en la unidad minera Tizapa del año 1997 al 2013.....	13
<b>Figura 3.</b> Precipitación mensual durante el año 2013 en la mina de Tizapa.....	14
<b>Figura 4.</b> Mapa geológico de la región Zacazonapan (COREMI, 1996).....	15
<b>Figura 5.</b> Rocas predominantes en la mina de Tizapa (Gatica, 2012).....	17
<b>Figura 6.</b> Rampa Gemela.....	18
<b>Figura 7.</b> Uso de marcos de madera.....	18
<b>Figura 8.</b> Zarpeo de las obras en la mina Tizapa.....	18
<b>Figura 9.</b> Ubicación geográfica del acuífero Temascaltepec. (CONAGUA, 2008).....	21
<b>Figura 10.</b> Mapa del fracturamiento del nivel 1200 m.s.n.m., que corresponde a obras en las que actualmente se está generando DAM.....	21
<b>Figura 11.</b> Arroyo el Ahogado.....	22
<b>Figura 12.</b> Profundidades registradas en pozos y norias en el acuífero Temascaltepec. (CONAGUA, 2008).....	22
<b>Figura 13.</b> Elevación del acuífero en distintos puntos. (CONAGUA, 2008).....	23
<b>Figura 14.</b> Esquema del acuífero con respecto a la mina.....	23
<b>Figura 15.</b> Mezcla del drenaje ácido con los escurrimientos neutros en el cruce de la rampa Cocodrilos.....	24
<b>Figura 16.</b> Mapa con la ubicación de los escurrimientos neutros sobre la rampa Gemela.....	26
<b>Figura 17.</b> Ubicación del escurrimiento AN-11, sobre la rampa Sur.....	26
<b>Figura 18.</b> Ubicación de los contrapozos que presentan escurrimiento neutro.....	27
<b>Figura 19.</b> Muestra de agua del C/p 800.....	28
<b>Figura 20.</b> Toma de muestra del agua bombeada de la mina.....	29
<b>Figura 21.</b> Toma de muestra de agua de manantial.....	29
<b>Figura 22.</b> Toma de agua del arroyo el ahogado.....	30
<b>Figura 23.</b> Resultados de análisis por iones mayores de las muestras de agua neutra.....	31
<b>Figura 24.</b> Resultados de los análisis de elementos traza en las muestras de agua neutra.....	32
<b>Figura 25.</b> Diagrama PIPER del agua neutra.....	33
<b>Figura 26. a)</b> Coloración amarilla sobre la rampa Sur. <b>b)</b> Oxidación de la roca presentando una coloración rojiza.....	34
<b>Figura 27.</b> Malla ciclónica presentando corrosión por el DAM.....	35
<b>Figura 28.</b> Rebaje viejo.....	36
<b>Figura 29.</b> Ubicación del DAM en la rampa Sur.....	36
<b>Figura 30.</b> DA-2. Rampa Sur.....	37
<b>Figura 31.</b> DA-3. Rampa Sur.....	37
<b>Figura 32.</b> DA-4. Rampa Sur.....	38
<b>Figura 33.</b> DA-5. Rampa Sur.....	38
<b>Figura 34.</b> DA-6. Rampa Sur.....	39
<b>Figura 35.</b> DA-7. Rampa Sur.....	39
<b>Figura 36.</b> DA-8. Cruce Cocodrilos.....	40
<b>Figura 37.</b> Unión de escurrimientos neutros a la acequia en la rampa Sur.....	40
<b>Figura 38.</b> DA-10. Rampa Sur.....	41
<b>Figura 39.</b> Pileta. Rampa Sur.....	41
<b>Figura 40.</b> Uso de muro de concreto.....	42

---



---

<b>Figura 41.</b> Uso de muro de material estéril .....	42
<b>Figura 42.</b> El agua que se desborda por el muro de concreto, es canalizada mediante una acequia que cruza la rampa para de manera posterior incorporarse a la acequia principal..	43
<b>Figura 43.</b> Canaletas sobre la rampa Sur .....	43
<b>Figura 44.</b> Vista de la ubicación de las canaletas con respecto a la acequia .....	44
<b>Figura 45.</b> Instalación de una manguera para la canalización del drenaje ácido. Rampa Sur .....	44
<b>Figura 46.</b> Dimensiones de la pileta. ....	45
<b>Figura 47.</b> Pileta. Rampa Sur.....	45
<b>Figura 48.</b> Disposición de tuberías en la pileta. Rampa Sur.....	45
<b>Figura 49.</b> Pileta de mezclado. Planta de tratamiento .....	46
<b>Figura 50.</b> Bombeo de solución neutralizante a la pileta en la rampa Sur .....	46
<b>Figura 51</b> 1. El agua de manantial es enviada a la pileta de mezcla de agua más carbonato, 2. La mezcla carbonatada es enviada a la pileta en la que se acumula el drenaje ácido, 3. El drenaje ácido se mezcla con la solución carbonatada y se envía hacia los cárcamos .....	47
<b>Figura 52.</b> Aplicación de la solución carbonatada tanto en la pileta como en los cárcamos. ....	48
<b>Figura 53.</b> Medición del tiempo de captación del escurrimiento .....	49
<b>Figura 54.</b> Medición de escurrimiento de DAM, haciendo uso de la bolsa de lona.....	50
<b>Figura 55.</b> Uso de la cubeta como medio de captación .....	50
<b>Figura 56.</b> Uso de la lona como medio para captar los escurrimientos del cielo de las obras y contrapozos.....	51
<b>Figura 57.</b> Medición del volumen de agua de tuberías.....	51
<b>Figura 58.</b> Gasto de agua de manantial en la mina.....	55
<b>Figura 59.</b> Mantenimiento a los rebajes con presencia de DAM .....	58
<b>Figura 60.</b> Volúmenes de DAM y AN.....	60
<b>Figura 61.</b> Re direccionamiento de los escurrimientos neutros hacia el nivel 1050 m.s.n.m .....	61
<b>Figura 62.</b> Uso de un sistema de piletas con desnivel para el almacenamiento del agua neutra .....	62
<b>Figura 63.</b> Acondicionamiento de los muros para realizar una medición más eficiente .....	62
<b>Figura 64.</b> Medición de escurrimientos de agua de acuerdo a la precipitación.....	63
<b>Figura 65.</b> Propuesta de canalización de AN-11. ....	65

---

---

## Lista de tablas.

<b>Tabla 1.</b> Resultados de pH y conductividad de las muestras de agua neutra.....	30
<b>Tabla 2.</b> Resultados de pH en los escurrimientos de agua de la rampa Sur .....	41
<b>Tabla 3.</b> Volúmenes de agua neutra registrados en el mes de julio .....	53
<b>Tabla 4.</b> <i>Recopilación de las mediciones realizadas en los escurrimientos neutros.</i> .....	54
<b>Tabla 5.</b> Medición de escurrimiento AN-11 en L/min. ....	55
<b>Tabla 6.</b> Registro del volumen obtenido en los contrapozos de ventilación y tepetateros. .	56
<b>Tabla 7.</b> Medición de volumen del DAM en el mes de abril.....	57
<b>Tabla 8.</b> Recopilación de los volúmenes de DAM obtenidos en los meses de mayo, julio y septiembre.....	57
<b>Tabla 9.</b> Cálculo del volumen total de agua neutra en L/min.....	59
<b>Tabla 10.</b> Cálculo del DAM total a tratar en L/min.....	59
<b>Tabla 11.</b> Resumen de costos de las obras.....	68

---

---

## RESUMEN

El presente trabajo es parte de un proyecto de investigación que tiene como objetivo desarrollar un sistema de tratamiento pasivo que haga uso de la roca encajonante de la mina Tizapa para controlar el drenaje ácido de mina (DAM). En esta etapa del proyecto el objetivo específico es identificar los sitios de la mina donde se genera el DAM y cuantificar el volumen producido. Además, se evaluar el manejo que se hace de él para proponer alternativas para su canalización hacia los sitios donde se instalen los sistemas de tratamiento. Los sitios con presencia de DAM se localizaron en los cruceros sobre la rampa Sur entre los niveles 1226 y 1040 m.s.n.m., en rebajes que se han dejado de explotar y en los que han quedado expuestos minerales sulfurados, principalmente pirita. La medición de los escurrimientos de drenaje, se realizó en los meses de mayo, julio y septiembre dando un volumen de 43.7 a 104.22 L/min, los cuales se generan en once obras identificadas sobre la rampa Sur. El drenaje ácido fluye por medio de la acequia de la rampa hacia el nivel 1040 msnm en donde se localiza la planta de tratamiento que usa una solución neutralizante a base de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) más agua. Se identificaron también escurrimientos agua neutra sobre obras de la rampa Gemela. El agua neutra fluye por esta acequia y en el nivel 1050 se desvía hacia la rampa Cocodrilos hasta juntarse con el drenaje ácido de la rampa Sur. El volumen de agua neutra que se aforó fue de 102.12 a 122.9 L/min; la mezcla de esta agua con el agua ácida llega a la planta de tratamiento, por lo que el volumen tratado varía desde 166.6 hasta 206.34 L/min. Como resultado de este trabajo, se recomienda que se separen los escurrimientos neutros de los ácidos, de tal manera que el agua neutra pueda ser canalizada y almacenada para ser usada en los procesos de la operación, y solo reciban tratamiento los 68 L/min de agua ácida. El sistema de tratamiento a instalar en la mina deberá tener la capacidad suficiente para este volumen de DA

---

---

## INTRODUCCIÓN

El Drenaje Ácido de Mina (DAM) se produce por la oxidación natural de minerales con contenido de azufre siendo el sulfuro de hierro (pirita) el mayor generador en presencia de agua y oxígeno. Este drenaje se caracteriza por tener un pH menor a 4 y por su contenido de metales pesados, metaloides y sulfatos en solución (Lottermoser, 2007). Sin embargo, la generación de drenaje ácido está limitada por la presencia de minerales alcalinos con capacidad de neutralización, como lo es la calcita (Gatica y Santos, 2002).

La generación de drenaje ácido se presenta en las obras mineras en terreros y presas de jales que han quedado expuestas a los factores ambientales tras haber sido extraído el mineral de interés, en presencia de agua y oxígeno. Una vez generado el DAM solubiliza los metales presentes en el mineral, como lo son el cadmio, cobre, hierro, magnesio, arsénico, zinc, etc., y forma altas concentraciones de sulfatos. El DAM puede afectar la calidad de los suelos y de los cuerpos de agua, así como a los acuíferos cuando éste se genera en obras subterráneas.

En la mina de Tizapa, se tiene la presencia de DAM ya que tiene un yacimiento constituido de sulfuros masivos Zn- Pb-Cu, con pirita como principal mineral de ganga. En los niveles superiores de la mina se manifiesta la presencia de DAM por escurrimientos de agua provenientes de un acuífero y de infiltraciones de la precipitación pluvial.

Dado la existencia del DAM en las obras, se han tomado medidas para mitigar sus efectos mediante la aplicación de un sistema de tratamiento activo a base de una mezcla de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) con agua. Con éste tratamiento se ha controlado el DAM pero de manera limitada, puesto que hace falta conocer la calidad del drenaje ácido; la cantidad que se genera en la mina y por último en qué medida se está remediando el problema.

Actualmente a nivel mundial, el control del drenaje ácido se inclina hacia el uso de sistemas de tratamiento pasivos, los cuales usan materiales naturales con capacidad de neutralizar el agua y retener los metales y metaloides en solución. Este tipo de tratamientos por ejemplo son humedales aerobios y anaerobios, canales abiertos de caliza, sistemas anóxicos de caliza, sistemas sucesivos de producción de alcalinidad, barreras permeables, entre otros (López, et al., 2002; Jhonson y Hallberg, 2005).

Es por esto que en la actualidad se está llevando a cabo un trabajo de investigación, que tiene como propósito desarrollar un sistema de tratamiento pasivo capaz de neutralizar el drenaje ácido y que pueda ser implantado dentro de la mina para el control del DAM aún después de concluidas las operaciones.

De manera previa a este trabajo, se hizo un estudio para caracterizar la calidad del drenaje ácido y evaluar la capacidad de neutralización de las rocas. Los resultados indicaron que la roca encajonante de Tizapa es apta para neutralizar los escurrimientos de drenaje ácido (Cervantes, 2014).

---

---

Después de haber analizado esta primera fase, es importante conocer el volumen de DAM para el diseño del sistema de tratamiento, por lo que este trabajo tiene como objetivo general determinar el volumen de DAM que se genera dentro de la mina.

Como objetivos particulares se tienen los siguientes:

- 1) Identificar las zonas con escurrimientos de agua ácida y neutra dentro de la mina.
- 2) Realizar aforos volumétricos para conocer el flujo de agua ácida y neutra.
- 3) Conocer y evaluar la manera en que se canalizan los escurrimientos ácidos y neutros.
- 4) Evaluar el sistema de tratamiento al cual se somete el drenaje ácido.
- 5) Conocer las variaciones del flujo del DAM en los distintos meses del año.

La información generada en este trabajo, es un aporte significativo para diseñar el sistema de tratamiento pasivo en las siguientes fases del proyecto.

---

---

## CAPITULO 1 GENERALIDADES DE LA MINA TIZAPA

### 1.1 Ubicación

La mina de Tizapa del Grupo Peñoles se encuentra dentro del municipio de Zacazonapan en la porción SW del Estado de México, a 67 km al SW en línea recta de la Ciudad de Toluca de Lerdo y a 4 km al SE de la cabecera municipal de Zacazonapan. Se localiza a los 19°02' de latitud norte y 100°13' de longitud oeste.



*Figura 1. Localización geográfica de la unidad Minera Tizapa (Dowa Holdings, Co., Ltd, 2011)*

Para llegar a Tizapa la mejor ruta es la carretera 130 de Toluca a Temascaltepec, antes de llegar tomar el entronque a Zacazonapan, hasta el entronque de la gasolinera ubicada en Zacazonapan y transitar 6 km para arribar a unidad Tizapa (SA Peñoles,2011).

### 1.2 Historia

Antes de iniciar con la minería, la población de Zacazonapan tenía como principales actividades económicas la ganadería y la agricultura.

De 1977 a 1985, personal del Consejo de Recursos Minerales (CRM), ahora Servicio Geológico Mexicano (SGM), a través de imágenes de satélite, define el área de Tizapa como prospectiva por sulfuros masivos y después de realizar visitas de campo y analizar las primeras muestras se crea el Proyecto Rocas Metamórficas para realizar la evaluación geológico-minera de la zona de Tizapa, habiéndose aprobado y ejecutado un programa de 10,000 metros de barrenación a diamante, resultando exitoso.

De 1986 a 1990, a través de un convenio de cooperación para exploración, celebrado entre el gobierno mexicano y japonés, se continúa con la exploración del proyecto Tizapa.

---

---

Mediante el convenio se realizan 750 m de obra minera y 7540 m de barrenación a diamante en superficie e interior mina.

De 1991 a 1992, el CRM y el gobierno federal licitan la concesión del yacimiento con planes de inversión. La licitación es otorgada a Industrias Peñoles y Dowa Mining Company y posteriormente se integra a la sociedad Sumitomo Corporation para formar Minera Tizapa, S.A. de C.V.

En 1993 se inician las labores de construcción de la nueva unidad minera y para agosto de 1994 se inician las operaciones en la planta concentradora con una capacidad de 240,000 toneladas por año y después de realizar dos ampliaciones la capacidad actual de la planta concentradora es de 550,000 toneladas por año (SA Peñoles, 2011).

### 1.3 Condiciones del entorno

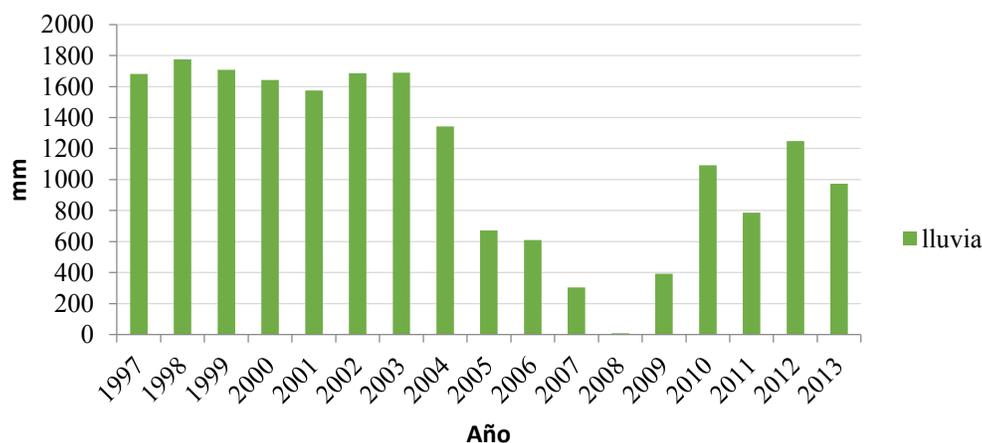
#### 1.3.1 Clima

El clima predominante en Zacazonapan es de templado a cálido y se divide típicamente en las épocas de lluvias en verano y la época de secas en invierno, siendo los meses de julio, agosto y septiembre los meses más lluviosos.

La temperatura de verano sobrepasa los 30° y la precipitación anual media es de 1,500 mm. La temperatura de invierno oscila entre 10 y 16° C (Neri, 1998).

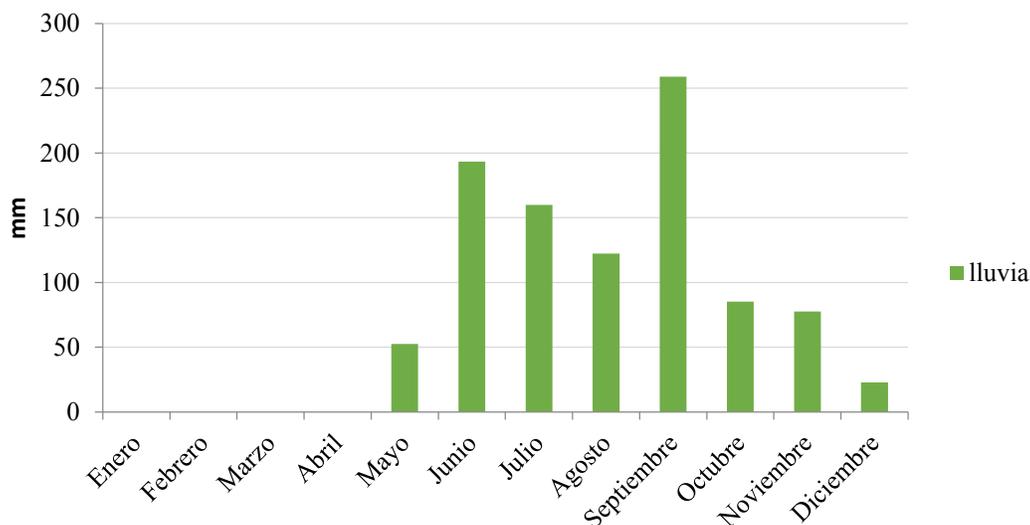
#### 1.3.2 Precipitación pluvial

De acuerdo a datos tomados por la estación meteorológica de la empresa, en los últimos 15 años se han tenido precipitaciones promedio que van desde los 1,800 mm/año hasta los 7 mm/año, como se muestra en la Figura 2.



*Figura 2. Precipitación anual en la unidad minera Tizapa del año 1997 al 2013*

De estos datos se tiene que en promedio la precipitación pluvial es de 1140 mm/año, aunque durante los últimos 8 años se ha visto que la precipitación ha disminuido considerablemente; pero siguen siendo junio, julio, agosto, septiembre y parte de octubre, los meses con mayor precipitación, con valores que van desde los 260 mm a 0 mm de precipitación, como se ve en la Figura 3.



*Figura 3. Precipitación mensual durante el año 2013 en la mina de Tizapa.*

Considerar la precipitación en este trabajo, resulta muy importante, puesto que en el interior de la mina se presentan importantes escurrimientos que se infiltran a las obras, haciendo que la oxidación de los sulfuros esté presente y el transporte de los lixiviados se vea favorecido. Esta infiltración se ve favorecida por el gran fracturamiento presente en las rocas, así como por la presencia de un acuífero localizado arriba de las obras. Este acuífero se puede pensar que es recargado por el agua proveniente de la precipitación, por lo tanto, al reflejarse el agua por medio de los escurrimientos, se puede obtener información sobre cómo varían los volúmenes en los escurrimientos según la temporada del año.

### 1.3.3 Hidrología

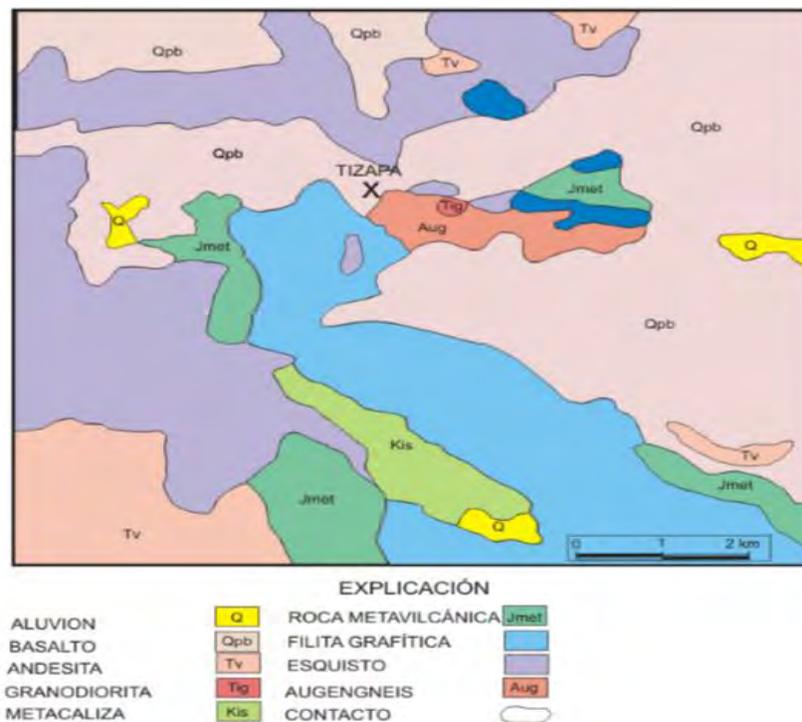
La hidrografía de Zacazonapan se complementa con una serie de manantiales, bordos y represas distribuidos en el territorio municipal, cuyo uso se destina para el abrevadero de ganado, uso doméstico y para irrigar pequeñas superficies. Es importante mencionar la Presa del Pinal de Osorios, construida en la época colonial, que aunque se localiza en Valle de Bravo, sirve para distribuir el vital líquido a la mayor parte de la superficie de riego en el municipio. Asimismo, otro recurso de importancia es el manantial La Huerta, localizado en el municipio de Temascaltepec, pues es la fuente de abastecimiento para toda la población del municipio.

El municipio de Zacazonapan se ubica en la región hidrológica RH 18, río Balsas uno de los ríos más grandes del país, se alimenta de la cuenca del río Cutzamala, subcuenca del río Temascaltepec, el recurso más importante, el cual presenta su trayecto al sur del municipio;

adicionalmente se cuenta con los arroyos Zacazonapan, el Ahogado, la Antigua, Salto Prieto, la Papaya, el Temascal y el San José mismo que llega al este del límite municipal (Programa Trianual de Asistencia Social 2013-2015 del Sistema DIF municipal de Zacazonapan e INEGI., SF.)

## 1.4 Descripción geológica

La mina de Tizapa se encuentra en una zona de base estratigráfica de roca metamórfica del periodo Jurásico, constituidas por esquistos y pizarras. Sobre las rocas metamórficas del jurásico yacen rocas del Cretácico constituidas por lutitas, calizas y areniscas. Cuerpos intrusivos riolíticos se han identificado en la parte norte de la zona de estudio. Finalmente, coronando la columna estratigráfica se identifican basaltos, brechas basálticas y material aluvial del Cuaternario (Figura 4).



*Figura 4. Mapa geológico de la región Zacazonapan (COREMI, 1996)*

### 1.4.1 Origen del yacimiento

El yacimiento de sulfuros masivos de Tizapa es de tipo volcanosedimentario Zn- Pb-Cu con valores de Ag y Au. El yacimiento se formó a partir de la exhalación de fluidos hidrotermales por debajo del piso marino. Estos fluidos viajaron a través de fracturas transportando sulfuros ricos en Fe, Zn, Pb, Cu, As y sulfosales de Ag. Los sulfuros se depositaron encima de las rocas volcánicas previamente formadas por la actividad volcánica andesítica, dacítica y de toba riolítica, una vez que el agua marina ocasionó una precipitación rápida, lo cual limitó la formación de minerales de grano medio o grueso.

---

---

Después de haberse depositado el mineral sobre el piso marino y como continuidad de la actividad sedimentaria se tiene el cubrimiento del mineral por sedimentos terrígenos finos de composición carbonosa. Estos eventos son fundamentales para la conservación del yacimiento, ya que la sedimentación de terrígenos finos carbonosos permitió un ambiente favorable que impidió la erosión del sulfuro masivo. Los eventos compresivos que dieron origen a la deformación de las rocas y del propio yacimiento ocasionaron el movimiento al este y el levantamiento de los sulfuros masivos (SA Peñoles, 2011).

#### 1.4.2 Mineralogía

Los cuerpos minerales en la mina de Tizapa están constituidos por mantos cuya mineralización consiste principalmente de sulfuros. El sulfuro más abundante es la pirita con un 78% total y se presenta como un mosaico fracturado en cuyos intersticios están emplazados otros sulfuros tales como la esfalerita y la calcopirita. La esfalerita es el segundo mineral de sulfuro en abundancia, con un 12%, mientras que los otros sulfuros se presentan en menor proporción.

La galena es la mena principal de plomo, se presenta como cristales anhedrales ocupando los intersticios, intercrecida mutuamente con la esfalerita y en ocasiones reemplazando a la calcopirita y también como inclusiones globulares en la pirita. El 2.1% de los sulfuros es galena.

La calcopirita es el sulfuro que se presenta en menor cantidad, presentándose como cristales anhedrales, ocupando los intersticios en los cristales de pirita y reemplazando a la pirita.

La roca que predomina en la unidad de Tizapa, está integrada por sulfuros, esquisto de clorita, esquisto de sericita y por filita grafitica, las cuales tienen las siguientes características.

**Sulfuro:** consiste en pirita de grano fino con bandas y disseminaciones de esfalerita, galena, arsenopirita y calcopirita. Los cuerpos mineralizados se encuentran con echado de 30° a 45°, siendo la densidad del sulfuro en promedio de 4.16.

**Esquisto de clorita:** el cual se encuentra al bajo del mineral y se observa en la rampa Sur y acceso a los rebajes.

**Esquisto de sericita:** el cual se presenta en contacto con el mineral.

**Filita grafitica:** se encuentra al alto del mineral en forma de capas que se alteran rápidamente a los cambios de temperatura y humedad comunes en el interior de la mina, éste material al absorber la humedad se expande y genera caídos de roca, por lo que es importante mantener la temperatura en las obras.

En la Figura 5 se pueden ver los diferentes tipos de roca que existe en la mina de Tizapa.



*Figura 5. Rocas predominantes en la mina de Tizapa (Gatica, 2012)*

El conocer el tipo de roca que existe en la mina, resulta ser importante para ser tomada como un elemento de diseño de un sistema de tratamiento pasivo para el DAM, al tener que la filita grafitica contiene carbonatos, útiles para lograr una neutralización. Este es un tema que fue abordado por Cervantes, 2014, en el que precisamente habla sobre la capacidad de neutralización de las rocas.

### **1.5 Obras mineras**

La mina de Tizapa cuenta con dos rampas principales a una elevación de 1226 m.s.n.m: la rampa Sur y la rampa Gemela, las cuales son utilizadas para el acceso, profundización, ventilación y la introducción de los servicios necesarios para la operación; tales como agua y electricidad, entre otros. Las rampas tienen dimensiones de 6.0 metros de ancho por 4.3 metros de altura con pendientes de 12% en zonas rectas y 10% en zonas de curva. Las rampas están desarrolladas en esquistos de clorita y en algunas zonas se presentan intercalaciones de esquistos de sericita, diques riolíticos o andesíticos. Todas las obras mineras permanentes y en donde se observa inestabilidad son zarpeadas con concreto lanzado por cuestiones de seguridad.



*Figura 6. Rampa Gemela*

A partir de la rampa principal los accesos se desarrollan hasta cortar perpendicularmente el cuerpo. Dichos accesos se cuelan con secciones de 5.0 x 4.0 metros y por lo general se encuentran al bajo del mineral en esquistos. Al igual que las rampas, toda la sección va recubierta con concreto lanzado para evitar el intemperismo debido a que al alto del mineral se encuentra la filita grafitica que se dispone en capas y se altera rápidamente a los cambios de temperatura y la humedad. En algunas partes de la rampa, aún se conservan antiguos marcos de madera como medio de soporte.



*Figura 7. Uso de marcos de madera*



*Figura 8. Zarpeo de las obras en la mina Tizapa*

Las frentes y cruceros se realizan cruzando el cuerpo de mineral de manera perpendicular del bajo hasta llegar al alto y después se continúa su proyección longitudinalmente hacia ambos extremos del cuerpo, hasta delimitar el cuerpo del mineral. Estas obras son de dimensiones de 5.00 x 4.00 metros SA Peñoles (2011).

---

---

Anteriormente, en la mina de Tizapa también existían algunos socavones localizados por arriba de la rampa a aproximadamente cinco metros de los cuales se extraía mineral. Hoy día estas obras están clausuradas, pero son importantes debido a que son los primeros sitios en los que se nota la presencia de minerales generadores de DAM, al manifestarse como escurrimientos en el cielo de las obras en los primeros niveles de la rampa Sur.

---

---

## CAPÍTULO 2

### ESCURRIMIENTOS DE AGUA NEUTRA (AN)

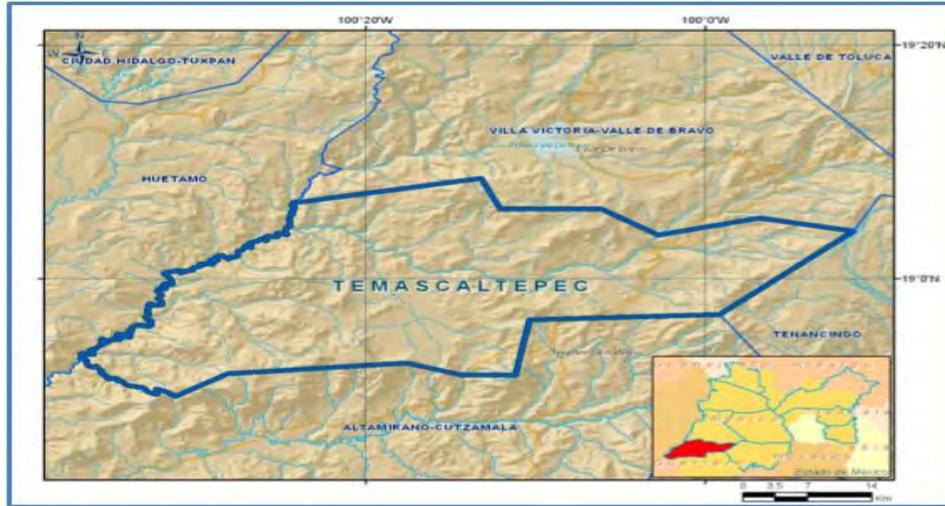
En el interior de la mina, los escurrimientos neutros se presentan en algunas de la rampa Gemela y por debajo del nivel 1040 msnm sobre la rama Sur. El porqué de considerar los escurrimientos neutros en un trabajo que habla sobre el drenaje ácido, radica en que como se ha mencionado, el agua neutra es uno de los principales factores que favorecen la oxidación de los sulfuros y por ende la acidificación del agua, además de que en el interior de la mina la canalización de los mismos en algunos puntos es desfavorable en términos operacionales y ambientales como se verá en el capítulo 2.2. Otra razón es porque actualmente no se tiene una estimación sobre la cantidad de agua neutra que se está generando en las distintas obras, por lo que se desconoce la cantidad de agua que se podría estar infiltrando hacia niveles inferiores. Debido a estas razones, se realizaron visitas durante el 2013 en los meses de marzo, mayo, julio y septiembre para recabar esta información, dejando ver que la rampa Gemela es la que mayor cantidad de escurrimientos de agua neutra tiene y que la gran mayoría de ellos se presentan en antiguos accesos, sobre las acequias y en el cielo de las obras, como se detallará más adelante.

Estos escurrimientos se han dividido en dos partes para fines prácticos; los que se encuentran por arriba de la planta de tratamiento de DAM, es decir arriba del nivel 1040, y los escurrimientos de algunos contrapozos localizados por debajo de este nivel.

#### 2.1 Condiciones geohidrológicas

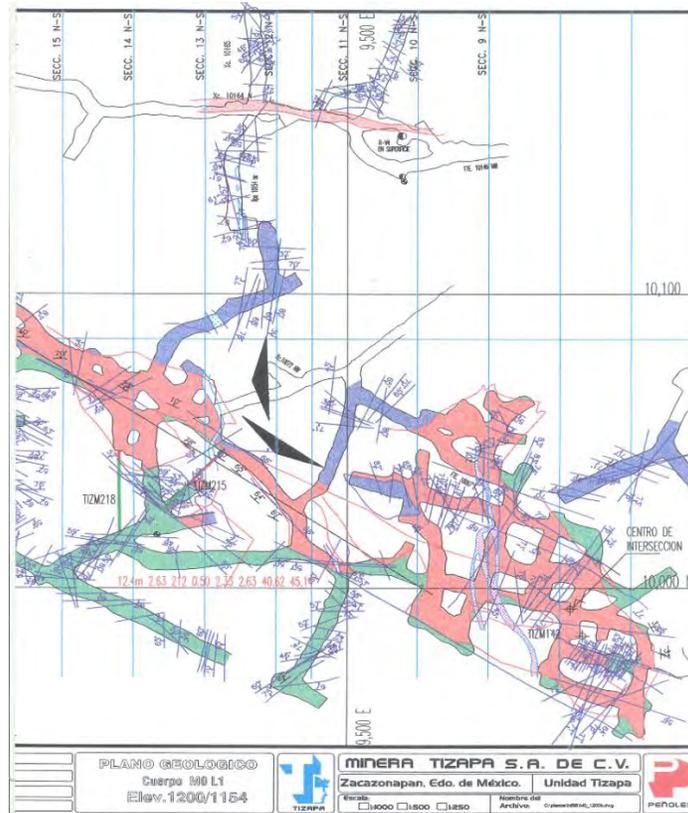
Para comprender mejor el origen de los escurrimientos neutros, además de conocer la precipitación de la zona, es necesario conocer las condiciones geohidrológicas de Tizapa.

De datos obtenidos por CONAGUA, se tiene registrada la existencia del acuífero Temascaltepec definido con la clave 1509 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS). Este acuífero se localiza en la porción suroeste del Estado de México (Figura 9), abarcando completamente el municipio de Zacazonapan y parcialmente los municipios de Otzoloapan, San Simón de Guerrero, Tejupilco, Temascaltepec, Valle de Bravo y una pequeña porción de Texcatitlan, ocupando una superficie aproximada de 1,410 km<sup>2</sup> (CONAGUA,2008).



**Figura 9.** Ubicación geográfica del acuífero Temascaltepec. (CONAGUA, 2008)

El acuífero de Temascaltepec se presenta en la mina de Tizapa como un acuífero del tipo libre, cayendo en la categoría de permeabilidad de media a baja, debido a que la mina está constituida por un yacimiento del tipo vulcanosedimentario y en la parte superior de la mina se tiene un alto grado de fracturamiento con un sistema de fallas inversas y plegamiento en las rocas (Figura 10).



**Figura 10.** Mapa del fracturamiento del nivel 1200 m.s.n.m., que corresponde a obras en las que actualmente se está generando DAM.

---

---

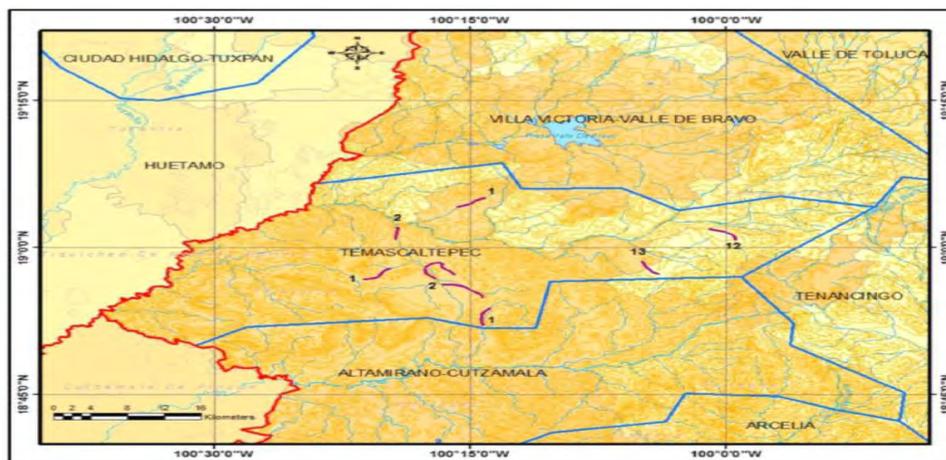
En este trabajo no se profundiza el comportamiento de las fracturas en las rocas, pero se está desarrollando un trabajo en el que se aborda de manera más detallada este tema.

Así mismo el acuífero aporta agua al arroyo el Ahogado que fluye a un costado de la mina y cuyo aporte se ve favorecido por la diferencia de elevaciones entre el acuífero y el arroyo que se encuentra a una elevación de 1220 m.s.n.m (Figura 11) aproximadamente.



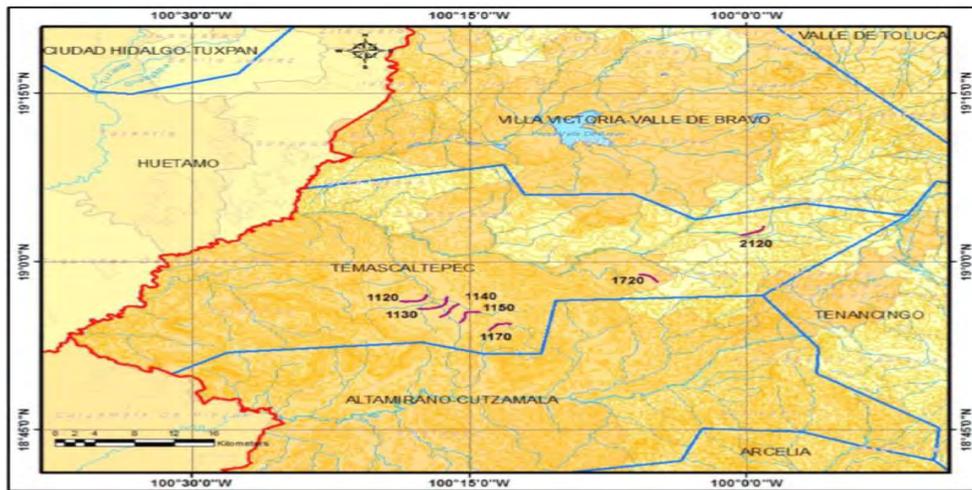
*Figura 11. Arroyo el Ahogado.*

CONAGUA (2008), registra que la profundidad del nivel estático (Figura 12) en la zona de Temascaltepec, está asociada a la topografía y a la posición de los materiales que presentan diferente permeabilidad; de esta manera, se tiene una gran cantidad de pequeños valles intermontañosos, en donde la profundidad del nivel del agua es muy diferente entre uno y otro, teniendo que las menores profundidades se localizan en pozos y norias ubicados en la comunidad de Villa de Luvianos que se encuentra a 1,300 m.s.n.m, donde los valores encontrados varían entre 1 y 2 m de profundidad. Hacia el sureste de Temascaltepec, en las inmediaciones de la población de San Simón de Guerrero, se localizaron varias norias que tienen una profundidad al nivel estático mayor a 10 m, y con lo que respecta a Zacazonapan, no se tiene una referencia de la profundidad del nivel estático, pero se tienen datos registrados cercanos en los que se registra una profundidad de 1 a 2 metros de profundidad.



*Figura 12. Profundidades registradas en pozos y norias en el acuífero Temascaltepec. (CONAGUA, 2008)*

Por otra parte se tiene que en la zona central del acuífero, las elevaciones varían de 1 110 a 1 200 m.s.n.m; hacia San Simón al oriente del acuífero las elevaciones son de 2 120 m.s.n.m y en Zacazonapan la elevación es de 1 350 m.s.n.m (Figura 13).



*Figura 13. Elevación del acuífero en distintos puntos. (CONAGUA, 2008)*

Aunque no se tiene información exacta de la mina de Tizapa, de los datos antes mencionados se recopila que de manera aproximada el acuífero en Zacazonapan se encuentra a una profundidad de 1 a 2 metros y a una elevación de 1 350 m.s.n.m, es decir por arriba de las obras.

Se elaboró un esquema de la ubicación del acuífero con respecto a las obras mineras tomando como referencia la información de elevaciones que proporciona el sistema Google Earth y con la profundidad del acuífero Temascaltepec que proporciona CONAGUA (Figura 14).



*Figura 14. Esquema del acuífero con respecto a la mina.*

---

---

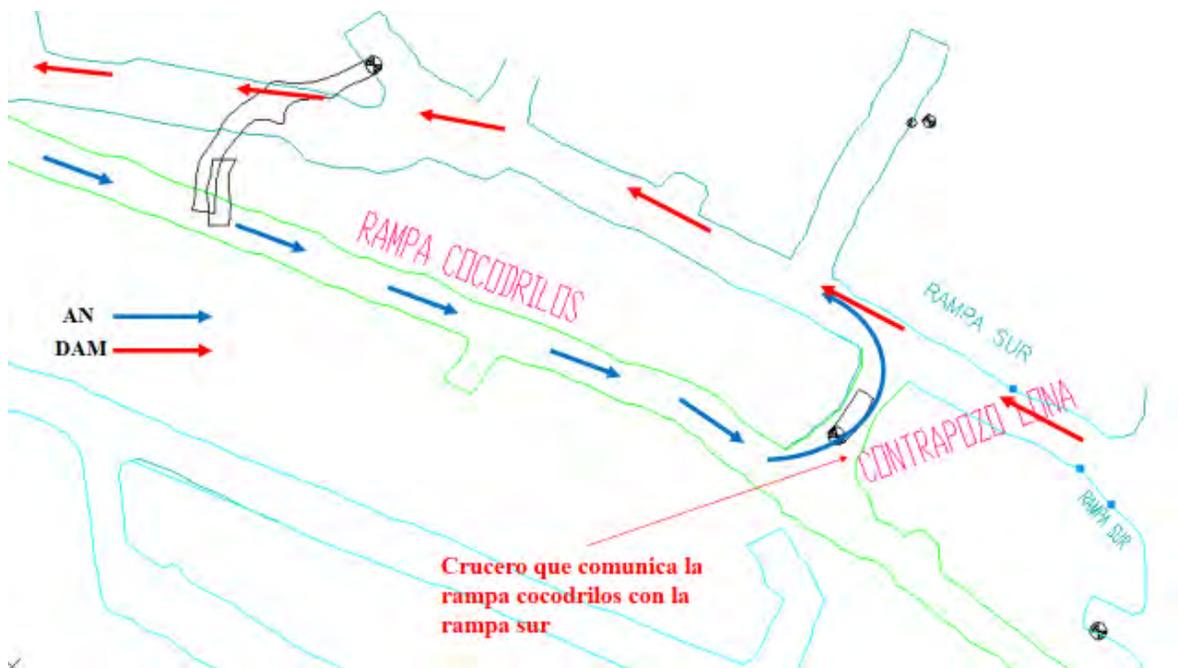
Con estos datos se tiene que debido a la posición del acuífero por arriba de las obras, el fracturamiento e inclusive la intersección de las obras con el acuífero, han permitido que el agua se infiltre hacia los primeros niveles en ambas rampas y se lleve a cabo el proceso de oxidación del mineral.

## 2.2 Esgurrimientos neutros

### 2.2.1 Arriba del nivel 1040 m.s.n.m

Los esgurrimientos designados como “Arriba del nivel 1040 m.s.n.m” son los esgurrimientos que fluyen desde los primeros niveles de la mina (1226 m.s.n.m) sobre la rampa Gemela, hasta desviarse por la rampa Cocodrilos. Este flujo neutro al descender por la rampa Cocodrilos se mezcla con el esgurrimiento de drenaje ácido que viene por la rampa Sur proveniente de niveles superiores (Figura 15). La mezcla de flujos cruza la rampa Sur y se incorpora hacia la acequia principal de la rampa Sur para finalmente llegar a la planta de tratamiento en el nivel 1040.

En la Figura 15 se puede ver la manera en que se comportan los esgurrimientos neutros con los ácidos en el cruce de la rampa Cocodrilos.



*Figura 15. Mezcla del drenaje ácido con los esgurrimientos neutros en el cruce de la rampa Cocodrilos.*

Esta mezcla de esgurrimientos neutros con esgurrimientos ácidos, es una situación que afecta la calidad del agua por no contar con un sistema de canalización más eficiente. Como parte del estudio de estos esgurrimientos se procedió en primera instancia a identificar las zonas con mayor aporte de agua neutra, para de manera posterior realizar su medición y así tener la suficiente información para determinar la cantidad de agua neutra que va a la planta

---

---

de tratamiento. Para conocer las zonas con aporte de AN (agua neutra) se realizaron recorridos en los meses de mayo y julio sobre la rampa Gemela, obteniendo así los siguientes puntos.

**AN-1:** Se trata de un flujo abundante que sale del Robbin de Ventilación 13 (RV-13) pasando la tolva 1.

**AN-2:** Esguerrimiento presente en la tabla izquierda de la rampa, entre el Crucero 1 (Cr-1) y la rampa 10,000

**AN-3:** Se localiza por debajo de AN-2, presentando un menor flujo.

**AN-4:** Sobre la rampa 10,000 existe uno de los aportes de agua neutra más importantes que sale de un antiguo rebaje.

**AN-5:** Este flujo proviene de un contrapozo el cual ha sido canalizado por medio de una tubería y que descarga sobre la rampa Gemela.

**AN-6:** Esguerrimiento que cae del cielo después del C/p del aforo AN-5, antes de la curva, bajando sobre la rampa.

**AN-7:** Pequeño esguerrimiento sobre la tabla izquierda de la rampa Gemela.

**AN-8:** Esguerrimiento que sale de un acceso cubierto con tepetate del lado derecho antes de llegar a la rampa Cocodrilos.

**AN-9:** Se trata de esguerrimientos provenientes del cielo de la rampa.

**AN-10:** En el crucero Cocodrilos, viniendo desde la rampa Gemela al pasar la cortina, debajo de la cuña se encuentra este esguerrimiento.

Todos estos puntos fueron nombrados de acuerdo al orden en que se fueron localizando con la nomenclatura AN (agua neutra) seguida del número de orden de localización, y se midió en cada punto el pH con papel indicador, presentando todos los esguerrimientos un pH mayor o igual a 6.

En la Figura 16 se muestra la ubicación de los puntos identificados sobre la rampa Gemela.

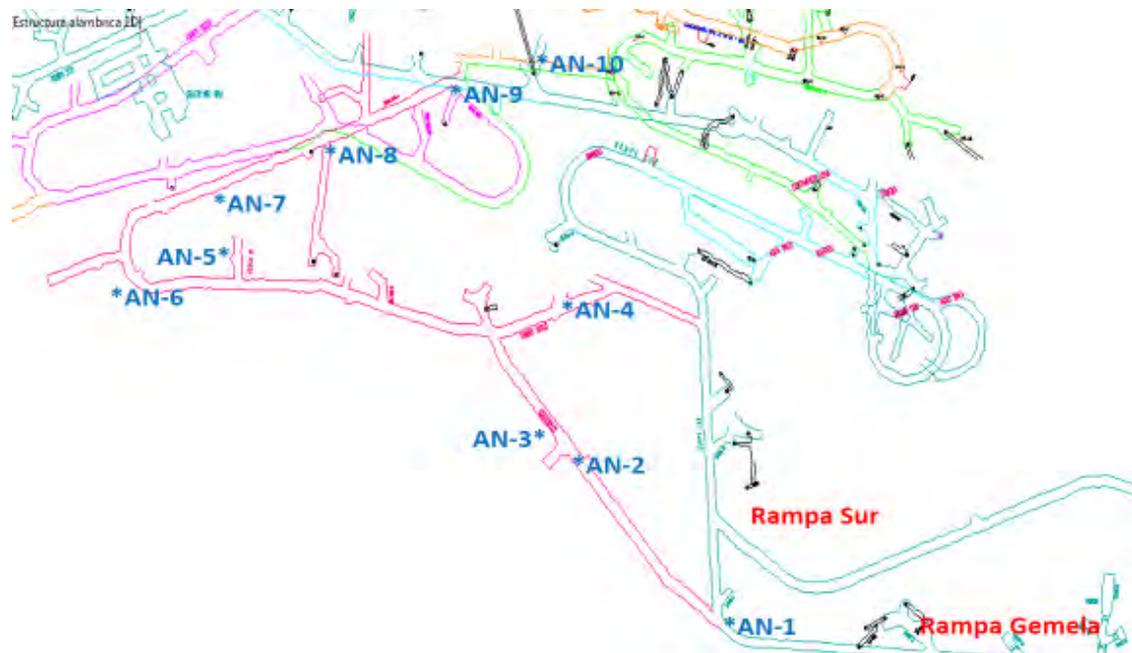


Figura 16. Mapa con la ubicación de los escurrimientos neutros sobre la rampa Gemela.

No todos los escurrimientos que están presentes sobre la rampa Gemela fueron identificados con una clave, ya que en algunos puntos donde hay escurrimientos el acceso no es seguro y por lo tanto no se midieron.

Un punto que no se localiza sobre la rampa Gemela, pero que es importante considerar, es el punto denominado como AN-11 (Figura 17), ya que se localiza en la rampa Sur, antes del nivel 1040, y se mezcla con el DAM proveniente de la acequia y que va a la planta de tratamiento.



Figura 17. Ubicación del escurrimiento AN-11, sobre la rampa Sur.

---

---

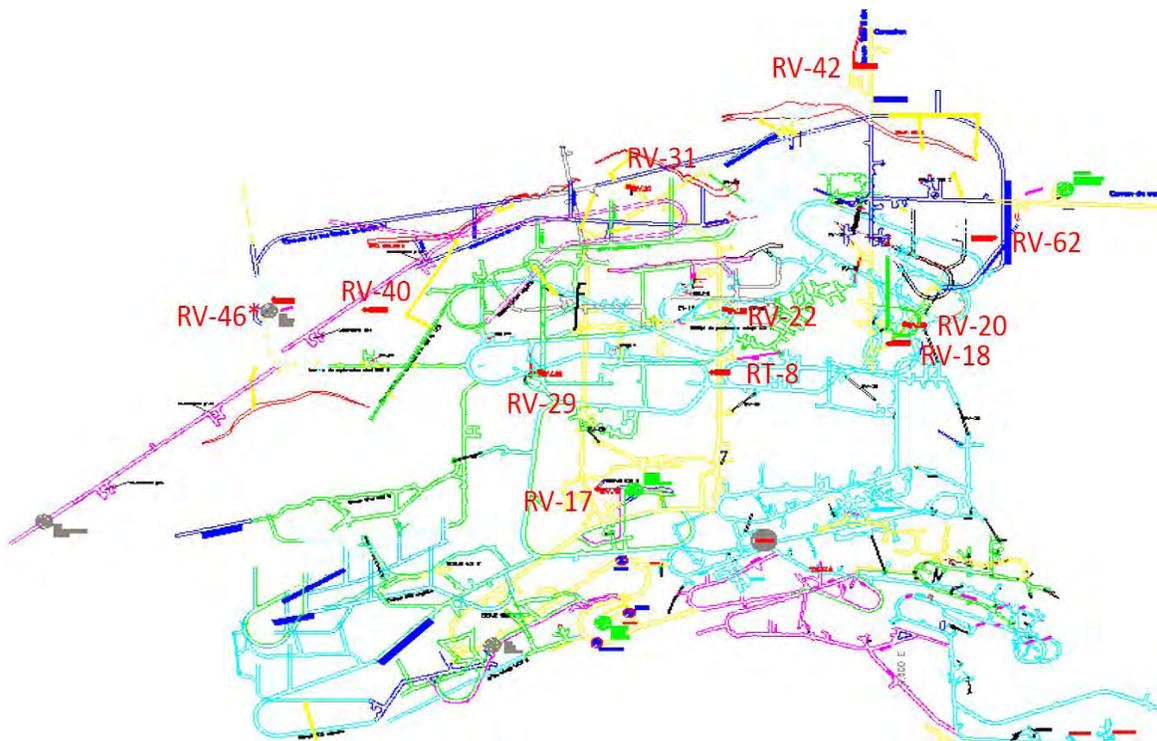
Después de que se localizaron los sitios con aporte de AN, se procedió a medir el flujo en cada uno de ellos, como se verá en el capítulo 4.

### 2.2.2 Contrapozos

Por debajo del nivel 1040 también existen escurrimientos neutros, pero a diferencia de los localizados por arriba de la planta de tratamiento, estos escurrimientos provienen de contrapozos de ventilación y tepetateros<sup>1</sup> que han cortado el acuífero.

El aforo y localización de estos escurrimientos surge de la necesidad de evaluar si el volumen de agua que escurre es suficiente para abastecer las necesidades de agua en las operaciones de la mina; ya que actualmente en algunas zonas de la mina se utiliza agua de manantial. Según datos registrados en el 2012 el consumo mensual de agua para las operaciones fue de 3230 m<sup>3</sup>. Se considera que se puede cubrir esta demanda mensual con el agua que escurre dentro de la mina, lo que facilitaría en gran medida el aspecto operacional y ambiental, ya que además de ser el agua de acuífero de buena calidad, el agua se encuentra ya dentro de la mina y muy cerca del desarrollo de las nuevas obras.

Los contrapozos que se midieron son: RV-62, RV-46, RV-42, RV-40, RV-31, RV-29, RV-22, RV-20, RV-18 y RT-8, y se muestra su localización en la Figura 18.



*Figura 18. Ubicación de los contrapozos que presentan escurrimiento neutro.*

---

<sup>1</sup> Contrapozos usados para la transferencia de material estéril (tepetate).

---

---

Es evidente que se deben considerar muchos aspectos en cuanto a costo-beneficio, pero es una buena propuesta para satisfacer las necesidades de agua en el interior de la mina.

### 2.3 Características del agua neutra

Debido a que en el interior de la mina se han clasificado los escurrimientos neutros como por arriba del nivel 1040 m.s.n.m y por debajo de este nivel, se hizo una caracterización del agua tomada en distintos puntos de la mina y ver si entre estas se presentan diferencias por localizarse en distintas zonas, pero sobre todo saber si la presencia del DAM en los primeros niveles ha influido en la calidad del agua neutra. También se tomó una muestra de agua en el arroyo El Ahogado que pasa a un costado de la mina para conocer su composición y compararla con el agua del interior de la mina. Para esta caracterización, se realizó la determinación de sulfatos, metales pesados y metaloides.

#### 2.3.1 Muestreo

Se eligieron algunos puntos dentro de la mina con aporte de agua neutra para determinar su calidad, siendo los puntos seleccionados la rampa Cocodrilos y del contrapozo 800 (C/p 800) (Figura 19) por el elevado flujo de agua que se presenta.



*Figura 19. Muestra de agua del C/p 800.*

Fuera de la mina se tomaron muestras en la descarga del agua que se bombea del interior de la mina hacia superficie y que es utilizada en el proceso de beneficio (Figura 20).



*Figura 20. Toma de muestra del agua bombeada de la mina*

Otras fuentes de agua que no se localizan dentro de la mina y que surgen de manera natural son el manantial que suministra agua potable a la unidad minera (Figura 21) y el agua proveniente del arroyo El Ahogado que corre a un costado de la mina (Figura 22). De esta agua también se tomaron muestras para su análisis.



*Figura 21. Toma de muestra de agua de manantial.*



*Figura 22. Toma de agua del arroyo el ahogado*

De cada punto se obtuvieron de 1 a 2 litros de muestra para su posterior análisis.

### 2.3.2 Análisis y resultados

Las pruebas a las que se sometieron las muestras de agua fueron de pH medido con un potenciómetro Hanna Instruments, HI-98185, la medición de conductividad se realizó con un conductímetro OAKTON Con 700. El agua también se sometió a análisis para determinar los elementos por espectrometría de emisión óptica con plasma de inducción acoplado (ICP-OES) en un equipo Pekín Elmer y por último se analizaron las concentraciones de iones mayoritarios por cromatografía iónica con un cromatógrafo Basic IC plus 883, Metrohm.

Los resultados obtenidos del pH y la conductividad, muestran que todos los escurrimientos son neutros, siendo los más altos los localizados afuera de la mina junto con el agua del C/p 800, mientras la conductividad de igual manera es baja en comparación con la del agua proveniente de la mina y de la rampa Cocodrilos (Tabla 1).

*Tabla 1. Resultados de pH y conductividad de las muestras de agua neutra.*

Escurrimiento	pH	Conductividad eléctrica (ms)
Mina	5.94	4.51
Manantial	7.07	0.17
Arroyo	7.38	0.07
C/p 800	7.89	0.73
Cocodrilos	6.15	1.24

Los resultados obtenidos por plasma y cromatografía, muestran que las concentraciones de los iones sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), cloro ( $\text{Cl}^-$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y ácido carbónico ( $\text{HCO}_3^-$ ), son mayores en las muestras de la mina en comparación con las muestras del arroyo y el agua de manantial (Figura 23).

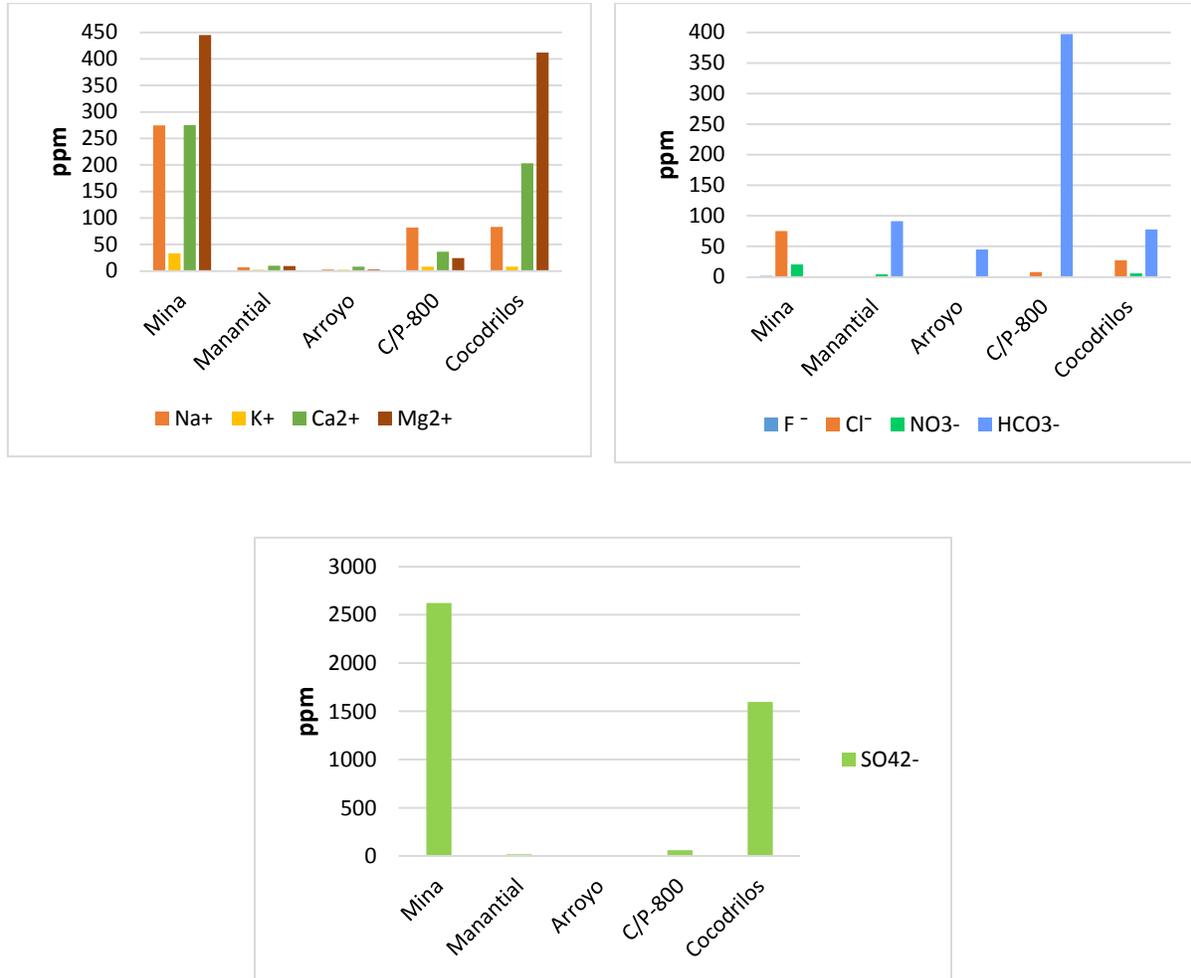
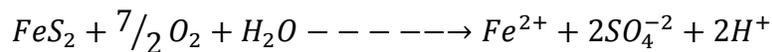


Figura 23. Resultados de análisis por iones mayores de las muestras de agua neutra.

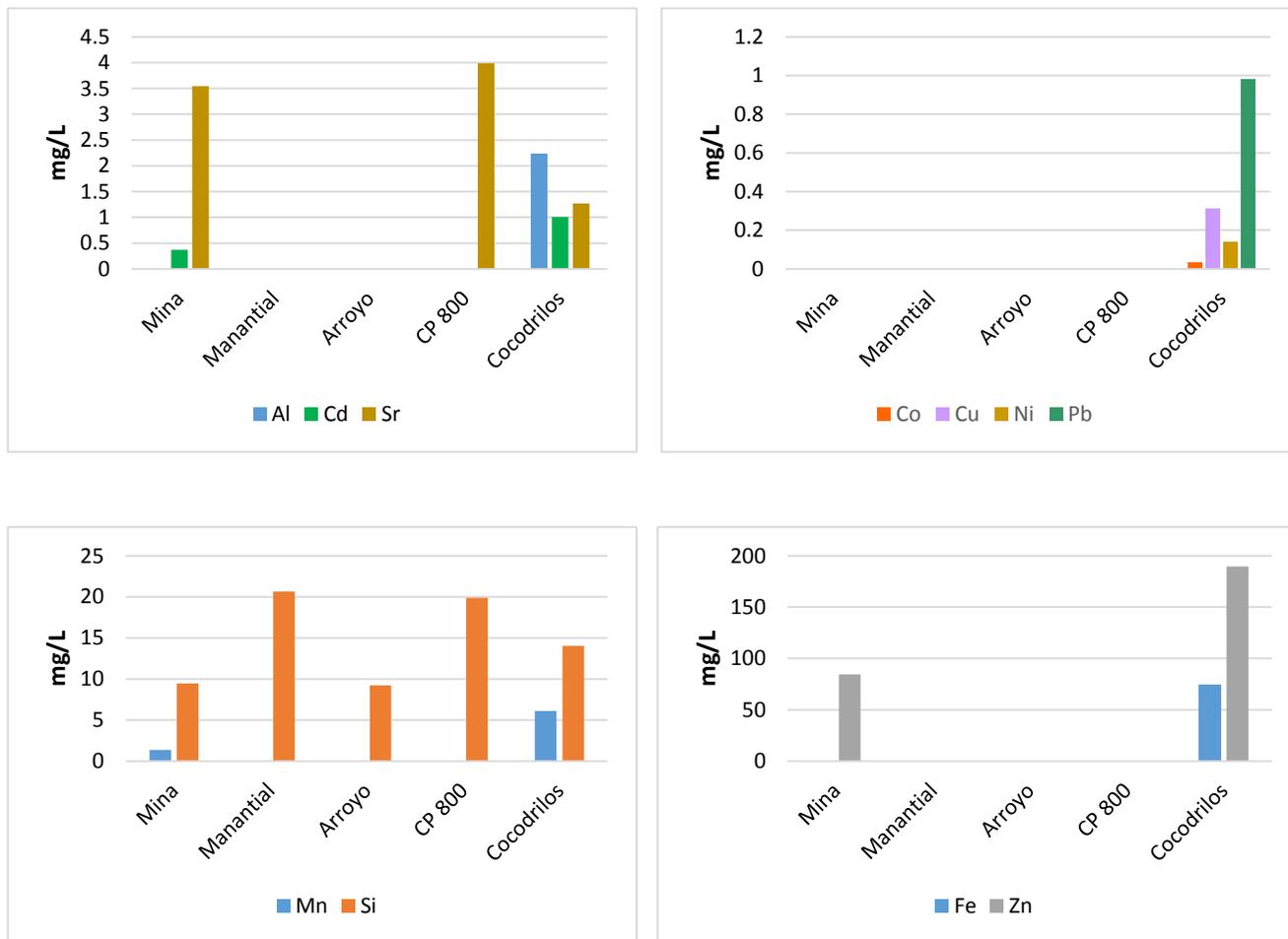
Como lo explica Cervantes (2014), el drenaje ácido además de contar con concentraciones elevadas de metales, también presenta la generación de iones sulfato, ya que inicialmente, los sulfuros reaccionan con el oxígeno y el agua, para formar sulfato ( $\text{SO}_4$ )<sup>2-</sup>, hierro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) e iones de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) como se muestra en la siguiente reacción.



Al analizar la Figura 24, se tiene que a pesar de que todos los escurrimientos analizados son neutros, resulta de interés ver que el agua proveniente de la rampa Cocodrilos tiene más de 1500 ppm de iones sulfato, lo que podría clasificarla inicialmente como un agua ácida, pero que al medir su pH tanto con papel indicador como con un potenciómetro marca EcoSense pH100, los resultados arrojan pH mayor a 6. Esta situación sugiere que el agua neutra trae consigo algunos escurrimientos ácidos que al entrar en contacto con el agua neutra pierden su propiedad de acidez, pero se siguen conservando los iones en solución o bien que los

escurrimientos ácidos pasan a través de un medio neutralizante, como lo son las filitas grafiticas por su alto contenido de carbonatos, y neutralizan los escurrimientos ácidos.

También como parte de los análisis se obtuvo la presencia y concentración de metales en solución (Figura 24).

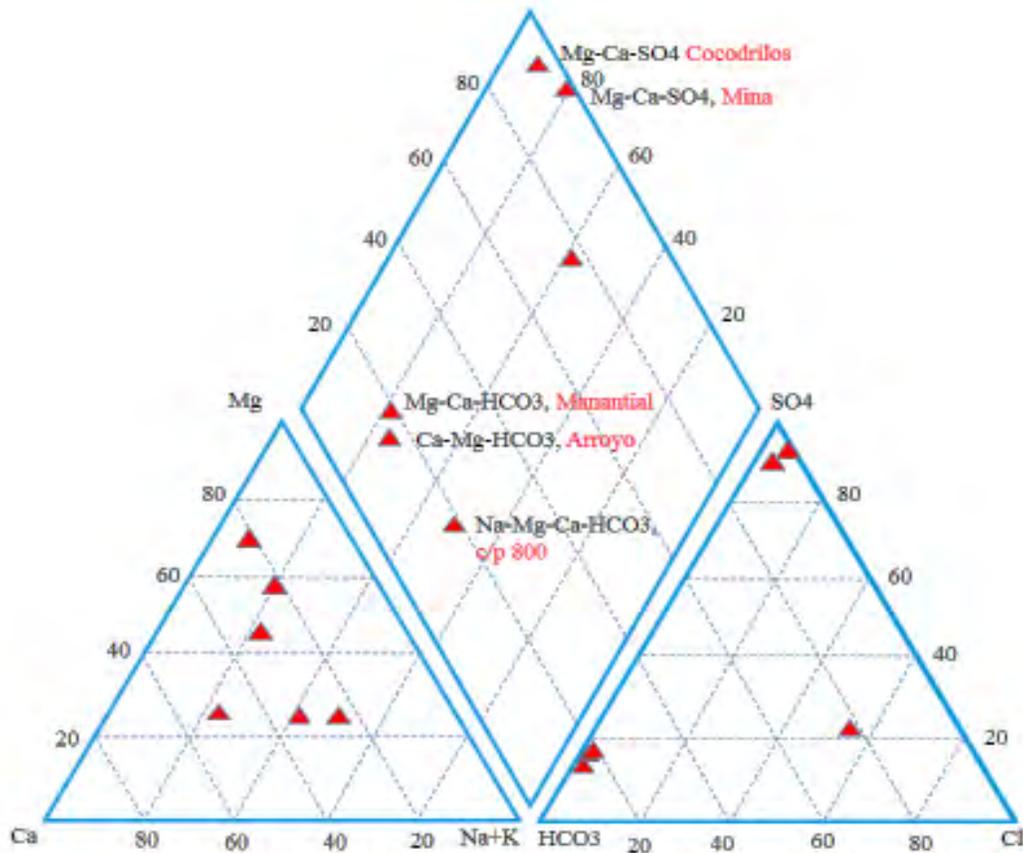


**Figura 24.** Resultados de los análisis de elementos traza en las muestras de agua neutra

De igual manera que en los datos obtenidos en el análisis por iones mayores, el agua de la mina es la que mayor cantidad de elementos en solución tiene, entre los que destacan cadmio, manganeso, silicio, estroncio y zinc. El agua del manantial y el arroyo tienen menor cantidad de elementos en solución.

De estos datos se concluye que el agua que se encuentra en las obras al estar en contacto con los minerales y presentarse procesos de oxidación y disolución, da como resultado que se cambien las características químicas del agua aumentando tanto los iones, como los elementos en suspensión y al comparar los escurrimientos con agua con menor concentración de sólidos disueltos como lo son el arroyo y el manantial se ve claramente la influencia de la exposición de los escurrimientos con medios ricos en minerales.

Como parte de esta comparación, también se realizó el análisis cualitativo, sobre la relación existente entre las distintas fuentes de agua analizadas. Para ello se hizo uso de un software llamado Aquachem, el cual permite clasificar las aguas de acuerdo a sus características químicas como se muestra en la Figura 25.



*Figura 25. Diagrama PIPER del agua neutra*

El diagrama anterior, es un diagrama de PIPER en el que se muestra que el agua del manantial y el agua del arroyo tienen las mismas características químicas siendo el HCO<sub>3</sub> primordial para ser clasificada como un agua con capacidad de neutralizar, mientras que el agua de la rampa Cocodrilos y el agua de la mina son escurrimientos con alto contenido de sulfatos, es decir escurrimientos que han pasado por un proceso de oxidación o que se han mezclado con escurrimientos ácidos.

---

---

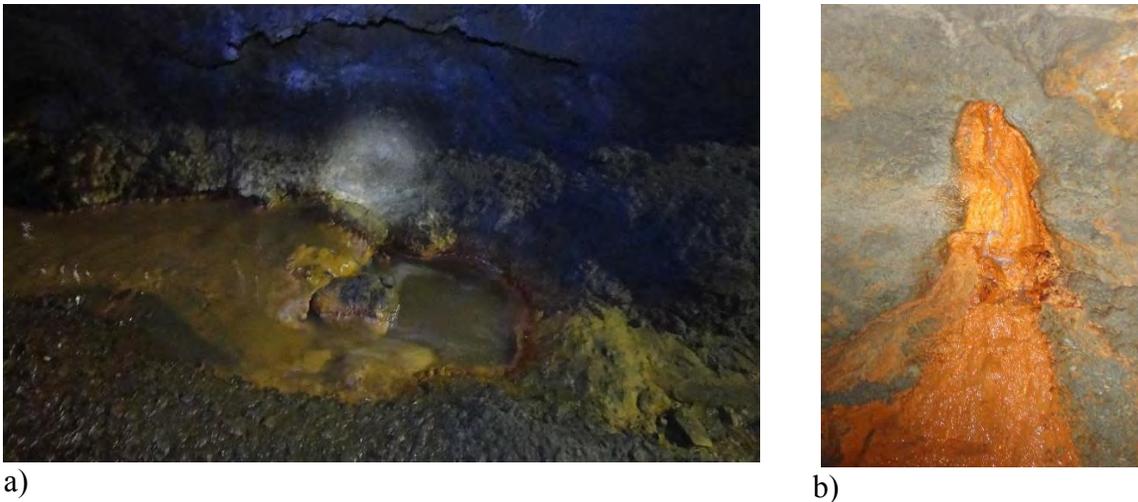
## CAPÍTULO 3

### GENERACIÓN Y MANEJO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM)

Los rebajes que se encuentran por arriba de la rampa Sur entre el nivel 1226 y 1040 m.s.n.m han llegado al fin de su explotación quedando abandonados y sin un monitoreo que evalúe las condiciones que presentan en la actualidad. Debido a que los elementos que generan los procesos naturales de oxidación (presencia de agua y oxígeno) no pueden ser controlados, estos rebajes son los sitios donde actualmente se está generando el drenaje ácido, ya que en los niveles inferiores a la planta de tratamiento, no se ha identificado la presencia de éste.

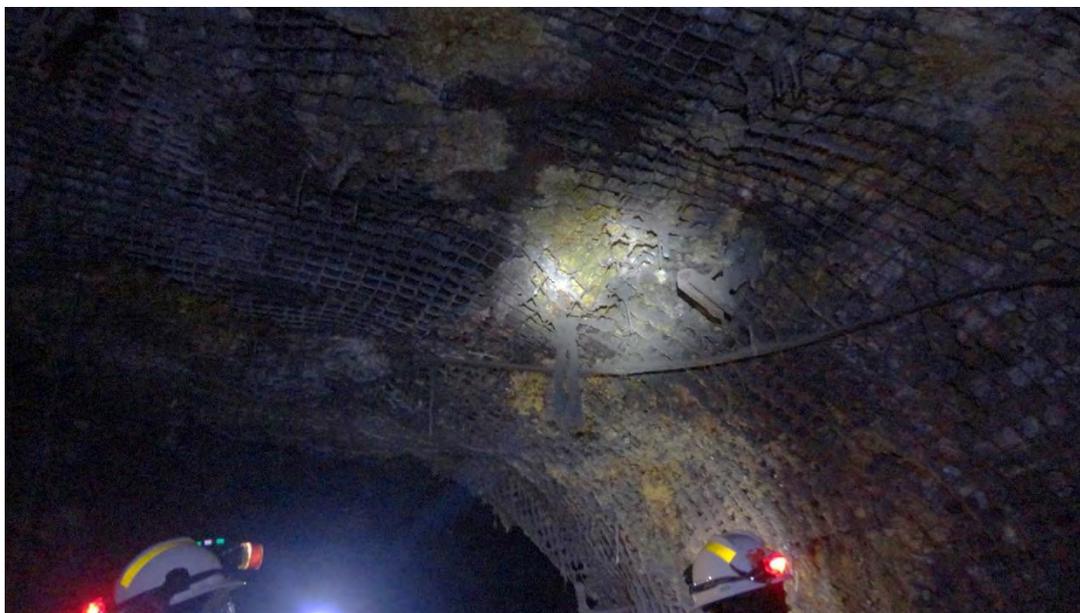
#### 3.1 Manifestación

En el año 2002 se realizó un trabajo para identificar la presencia de drenaje ácido en la mina (Gatica y Santos, 2002). En un recorrido por la mina se ubicaron las obras con presencia de DAM, así como de sulfuros, principalmente pirita, y de los escurrimientos de agua. Se observó la coloración amarilla ocre propia de la oxidación de los sulfuros de hierro (Figura 26).



#### 3.2 Problemática

El efecto que produce el drenaje ácido se puede observar en la malla ciclónica, las tolvas, los muros, las tuberías, y en general en todas las estructuras metálicas que se encuentran en contacto con el DAM, produciendo la corrosión de las mismas (Figura 27).



*Figura 27. Malla ciclónica presentando corrosión por el DAM*

Además de esta corrosión, el DAM ha provocado la disolución de metales (Fe, Al, Cu, Cd, Zn y Mn) y su incorporación a escurrimientos naturales de agua neutra como sucede en el cruce de la rampa Cocodrilos. Esta integración del DAM con agua neutra, ocasiona que sea necesario el tratamiento de un mayor volumen de agua para eliminar los metales en solución.

En prospectiva, la consecuencia que puede llegar a tener el drenaje es que escurra hacia niveles inferiores hasta mezclarse con escurrimientos neutros como los presentes en los contrapozos. Así mismo, por debajo de la zona de estudio las condiciones son similares en cuanto a mineralogía y presencia de agua, lo que implica la posibilidad de que se continúe generando DAM en la mina.

### **3.3 Puntos de generación**

En las primeras visitas realizadas en los meses de marzo y mayo del 2013, se hizo el reconocimiento de la mina para identificar los puntos de generación de DAM. Básicamente estos puntos se localizan sobre la rampa Sur abarcando una zona comprendida desde el nivel 1226 hasta el nivel 1040 m.s.n.m, al igual que se realizó con los escurrimientos neutros.

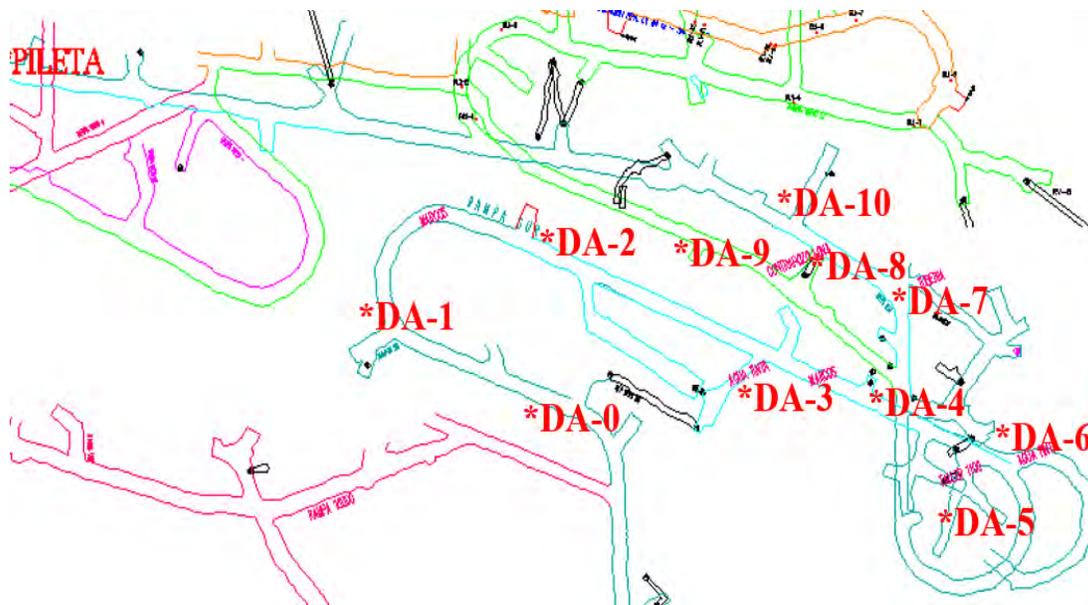
Los puntos de generación identificados son rebajes viejos que han dejado de explotarse y que se encuentran expuestos a los factores ambientales. Dichos rebajes han sido rellenados con material estéril por lo que es imposible ver en qué estado se encuentran las demás obras, pero se puede deducir que al tratarse de obras viejas, el DAM se ha generado y almacenado en estos sitios. En la Figura 28 se muestra una imagen de un rebaje viejo que es generador de acidez (Gatica y Santos, 2002).



*Figura 28. Rebaje viejo*

A pesar de que los rebajes han sido bloqueados, en los accesos que comunican con la rampa Sur hacia estos rebajes, se ha confinado el DAM por medio de muros de material estéril o por muros de concreto, para finalmente incorporar el drenaje hacia la acequia principal. Otras obras con aporte de drenaje ácido son los contrapozos ya sea que fueran usados para la ventilación o para transferencia de tepetate, lo que denota que en niveles superiores el motor de oxidación sigue vigente.

Los puntos estudiados (Figura 29) fueron nombrados con la nomenclatura DA (drenaje ácido), seguida de la numeración consecutiva. Todos estos puntos se localizaron sobre la rampa Sur.



*Figura 29. Ubicación del DAM en la rampa Sur*

---

---

A continuación se describe cada uno de los escurrimientos de DAM localizados.

**DA-0.** Es el primer sitio en el que se puede ver el drenaje ácido escurriendo a través de la acequia. Se localiza en el nivel 1154 arriba de la subestación y debajo del crucero de la rampa 10,000.

**DA-1.** Se presenta en un crucero ubicado arriba de los marcos (estructuras metálicas) y se encuentra confinado por un bordo construido por tepetate de la mina.

**DA-2** (Figura 30). Se localiza debajo de los marcos de madera sobre la rampa Sur en un crucero que aparte de almacenar el agua, almacena material estéril. Debido a que el agua ha excedido la altura del bordo de concreto, el agua escurre por varios puntos y se junta en una canaleta que cruza la rampa hasta unirse a la acequia principal.



*Figura 30. DA-2. Rampa Sur*

**DA-3** (Figura 31). Se encuentra en un acceso del lado derecho y de igual manera que los primeros puntos de generación, está almacenado por un bordo construido con material estéril.



*Figura 31. DA-3. Rampa Sur*

---

---

**DA-4** (Figura 32). Se encuentra en un cruceo en el lado izquierdo después de los segundos marcos. Debido a que está tapado con material estéril, y que la cantidad de drenaje es mínima, el escurrimiento no es visible sobre la rampa.



*Figura 32. DA-4. Rampa Sur*

**DA-5** (Figura 33). De este punto no hay un escurrimiento que se incorpore a la acequia de la rampa, pero se almacena en una pileta.



*Figura 33. DA-5. Rampa Sur*

**DA-6** (Figura 34). Se encuentra enfrente del taller 1100 y como referencia existe un contrapozo en este punto. El agua es almacenada por un muro de concreto y este punto es el sitio en el que se da la mayor generación de DAM, tal que el agua se desborda por el muro de concreto y se une a la acequia de la rampa Sur.



*Figura 34. DA-6. Rampa Sur*

**DA-7** (Figura 35). Se encuentra en un cruceo sobre la rampa Sur, el cual está tapado con tepetate y el escurrimiento que presenta es mínimo.



*Figura 35. DA-7. Rampa Sur*

**DA-8** (Figura 36). Se tratan del escurrimiento del contrapozo Lona el cual presenta uno de los mayores aportes de drenaje ácido, aunque su pH no es tan bajo como el que se encuentra en los escurrimientos de la rampa Sur. En este punto se une el agua neutra de la rampa Cocodrilos.



*Figura 36. DA-8. Crucero Cocodrilos*

Sobre la acequia de la rampa Sur a un costado de DA-8, hay una tubería por la cual se une el flujo proveniente de la rampa Cocodrilos y del DA-8. Esta tubería es muy importante porque en este punto se realizaron las mediciones del flujo (aforo) de DAM generado por arriba de DA-8 (Figura 37).



*Figura 37. Unión de escurrimientos neutros a la acequia en la rampa Sur*

**DA-9.** Se trata de pequeños escurrimientos que se localizan sobre la rampa Cocodrilos y cuya aportación es mínima.

---

---

**DA-10.** (Figura 38). Se trata de un cruceo que ha sido bloqueado mediante un muro metálico, por lo que la cantidad de DAM que escurre en este sitio es mínima.



*Figura 38. DA-10. Rampa Sur*

**Pileta** (Figura 39). Se localiza sobre la rampa Sur y es un punto importante en la mina por ser el sitio en el que se recolecta toda el agua neutra y ácida que se genera en las rampas.



*Figura 39. Pileta. Rampa Sur*

Además de ubicar las zonas con presencia de DAM, se hizo una medición del pH con un potenciómetro marca EcoSense pH100 (Tabla 2) para comprobar el proceso de acidificación en estos puntos.

*Tabla 2. Resultados de pH en los escurrimientos de agua de la rampa Sur*

Punto	DA-1	DA-2	DA-3	DA-4	DA-5	DA-6	DA-7	DA-8	DA-9	DA-10
pH	3.04	2.96	2.48	2.89	2.83	2.43	2.58	3	3.01	2.59

---

---

Posterior a marzo y mayo, en el mes de julio se realizó una visita, y se observó que en un antiguo rebaje llamado L1, se ha comenzado a rehabilitar mediante labores de bombeo, resultando que el agua bombeada presenta acidez, por lo que se comprueba nuevamente que los rebajes antiguos son los principales puntos de generación de drenaje ácido y que a medida que se continúe con la rehabilitación de estos, habrá presencia de DAM.

Después de la localización de los escurrimientos ácidos se hizo la medición del volumen que aporta cada uno de estos puntos para finalmente tener una estimación del total de DAM que se genera en la mina.

### 3.4 Canalización

La gran mayoría de los escurrimientos presentes en los rebajes localizados entre el nivel 1226 y 1040, han sido contenidos mediante un muro de concreto (Figura 40) o bien por material estéril de la mina (Figura 41).



*Figura 40. Uso de muro de concreto*



*Figura 41. Uso de muro de material estéril*

Los escurrimientos provenientes de las distintas obras, están regulados por los muros de contención, que permiten que solo una porción del DAM fluya hacia las acequias.

Debido a que la acequia corre por el costado derecho de la rampa, en los puntos de generación localizados del lado izquierdo el agua ácida se conduce por canaletas localizadas al pie de los muros y cruza la rampa para incorporarse a la acequia. Las canaletas tienen dimensiones variables y en gran medida dependen de la cantidad de flujo de agua como se muestra en las Figuras 42, 43 y 44.



*Figura 42. El agua que se desborda por el muro de concreto, es canalizada mediante una acequia que cruza la rampa para de manera posterior incorporarse a la acequia principal.*



*Figura 43. Canaletas sobre la rampa Sur*



*Figura 44. Vista de la ubicación de las canaletas con respecto a la acequia*

La rampa Sur y la rampa Gemela se encuentran revestidas de concreto y cuentan con una acequia localizada a un costado. En las acequias se puede ver que en algunos puntos se ha colocado una tubería (Figura 45) por la cual se canaliza el agua y que para este trabajo resultaron de gran utilidad para la medición de flujos.



*Figura 45. Instalación de una manguera para la canalización del drenaje ácido. Rampa Sur*

### **3.5 Tratamiento**

La planta de tratamiento se localiza en el nivel 1040 en la rampa Sur y consta de dos cárcamos en donde se recolecta el agua proveniente de la rampa, un tanque de mezclado donde se prepara la solución neutralizante y un potenciómetro que mide el pH final del agua tratada. El agua que ha sido procesada se manda a la planta de bombeo en el nivel

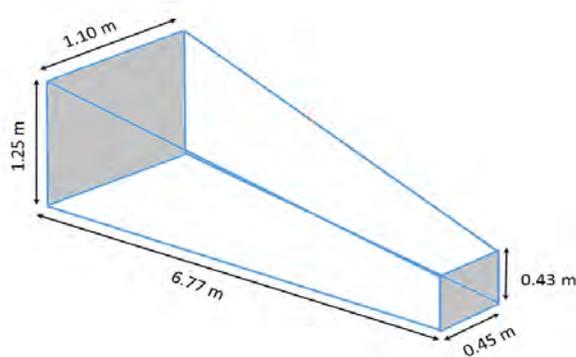
---

---

989, en donde se mezcla con agua neutra de otros niveles para ser enviada a superficie y después a la planta de beneficio.

A continuación se detalla la manera en que se realiza el tratamiento.

Después de que el agua acidificada es recolectada en la acequia sobre la rampa Sur, el agua llega a la pileta mencionada en el capítulo 3.3, sobre la que se deposita de manera temporal el DAM para continuar con su tratamiento. La pileta tiene una forma piramidal de dimensiones variables y una capacidad de  $3.5 \text{ m}^3$  (Figuras 46 y 47).



**Figura 46.** Dimensiones de la pileta.



**Figura 47.** Pileta. Rampa Sur

La pileta, además de estar conectada con esta tubería, tiene integrada una manguera de 6" de diámetro (Figura 48) en el otro extremo para la salida del drenaje ácido hacia la planta de tratamiento. Por arriba de la pileta sobre la tabla de la rampa Sur hay una tubería que transporta agua de manantial, para llevar a cabo la preparación de la solución neutralizante.



**Figura 48.** Disposición de tuberías en la pileta. Rampa Sur

El tanque de mezclado tiene una capacidad de 5,000 litros y cuenta con un agitador para realizar la mezcla del agua de manantial con carbonato de sodio (Figura 49).

---

---

La cantidad de carbonato de sodio que se utiliza no se tiene especificada con precisión; sino que se agrega de acuerdo a la acidez que presente el DAM. Por ejemplo, si el pH del DAM se encuentra en el orden de 4, se agregan de 6 a 8 bultos de 15 kg de carbonato de sodio hasta tener un pH de 11 en la solución neutralizante.



*Figura 49. Pileta de mezclado. Planta de tratamiento*

La solución neutralizante es bombeada hacia la pileta y mezclada directamente con el DAM, después la mezcla se manda por la tubería de 6 " hacia los cárcamos dentro de la planta de tratamiento (Figura 50).



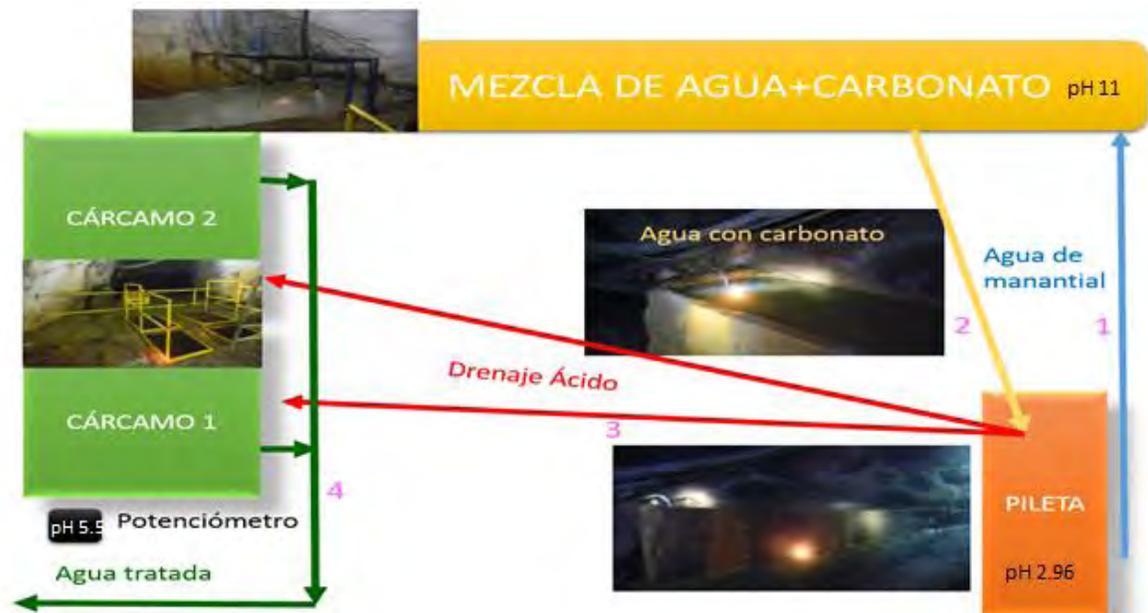
*Figura 50. Bombeo de solución neutralizante a la pileta en la rampa Sur*

La razón por la que la solución neutralizante es enviada hacia la pileta y no directamente a los cárcamos es que la neutralización se lleva a cabo con mayor intensidad al viajar por la tubería.

Dentro de los cárcamos el DAM alcanza un pH mayor a 5 y es monitoreado mediante un potenciómetro. Además de servir como receptores del agua, los cárcamos ayudan a que se produzca la sedimentación de hidróxidos de hierro que precipitan al subir el pH.

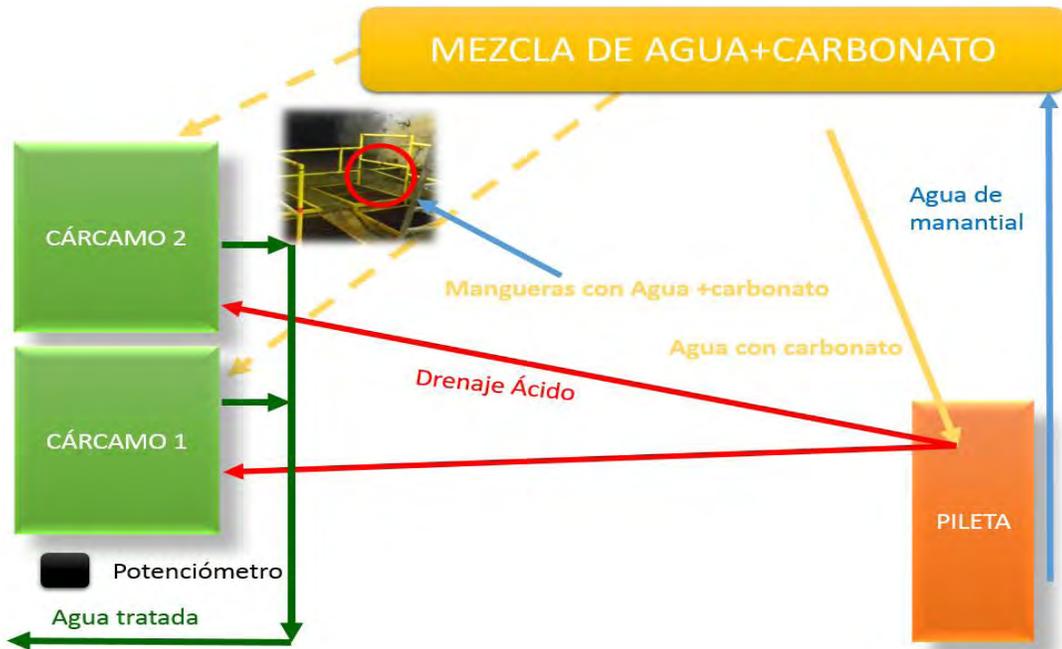
Finalmente el agua se decanta en los cárcamos y es recolectada por una canaleta que se integra a la rampa Sur para llegar al nivel 989 en donde se localiza la planta de bombeo. En la planta de bombeo, el agua tratada se mezcla con el agua proveniente de niveles inferiores al nivel 989, y es enviada hacia superficie.

En la Figura 51 se muestra cómo se lleva a cabo el tratamiento.



**Figura 51** 1. El agua de manantial es enviada a la pileta de mezcla de agua más carbonato, 2. La mezcla carbonatada es enviada a la pileta en la que se acumula el drenaje ácido, 3. El drenaje ácido se mezcla con la solución carbonatada y se envía hacia los cárcamos

Una variante (Figura 52) que se observó en el tratamiento es que de manera directa la solución carbonatada se envía a los cárcamos mediante una manguera, y se suspende o se sigue vertiendo la solución carbonatada hacia la pileta de la rampa Sur de acuerdo al criterio del operador. Esta variante no se usa a menudo porque la mezcla del drenaje ácido no es tan efectiva como cuando se bombea desde la pileta de la rampa Sur, según los operadores de la planta.



*Figura 52. Aplicación de la solución carbonatada tanto en la pileta como en los cárcamos.*

Durante las visitas que se realizaron a la mina, se pudo ver que la capacidad de almacenamiento de la pileta sobre la rampa Sur es insuficiente para la cantidad de drenaje ácido que se está generando, ya que se pudo observar en una de las visitas el derrame del DAM sobre la rampa Sur hasta incorporarse hacia la planta de bombeo 989 sin haberse tratado.

Así mismo es poco conveniente que se haga uso del agua de manantial para mezclarse con el drenaje ácido, ya que en vez de solucionar un problema se genera otro, que es la sobreexplotación de los recursos naturales.

Por eso es necesario desarrollar un sistema de tratamiento pasivo, que sea capaz de evitar el uso de reactivos y aproveche las rocas presentes en la mina, tal y como se está desarrollando en un trabajo que se realiza a la par de éste.

---

---

## CAPÍTULO 4

### MEDICIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS DE AGUA NEUTRA Y AGUA ÁCIDA

Debido a que no se cuenta en mina con instrumentación para medir los escurrimientos de DAM y AN, se utilizó el método de aforo volumétrico para medir los flujos de DAM en los diferentes puntos de generación. Se hizo uso de cubetas de plástico, de probetas de 1 y 2 litros y de un cronómetro; así mismo se diseñó una bolsa de polilona con capacidad de 10 litros para tener mayor flexibilidad en la toma de volúmenes, y también se hizo uso de una lona de 1.5 metros de largo para captar los escurrimientos provenientes del cielo de las obras.

#### 4.1 Procedimiento de aforo

La manera en que se desarrollaron las diferentes mediciones dependió de la forma en que se encontraba el escurrimiento. Por ejemplo:

En los puntos en donde el escurrimiento descendía por los muros, se usó la bolsa (Figura 53) haciendo que la mayor parte del escurrimiento se captara. Este tipo de aforos resultan ser los menos precisos ya que el flujo del agua se pierde al escurrir por el muro.



*Figura 53. Medición del tiempo de captación del escurrimiento*

Para facilitar estas mediciones también se usó un plástico flexible delgado y resistente para poder manipular el escurrimiento y dirigirlo hacia la bolsa de lona (Figura 54).



*Figura 54. Medición de escurrimiento de DAM, haciendo uso de la bolsa de lona*

Los escurrimientos provenientes del cielo de las obras, se midieron mediante la cubeta (Figura 55), tal y como se hizo en el DA-8, por tratarse de un escurrimiento que descarga en un solo punto.



*Figura 55. Uso de la cubeta como medio de captación*

En otros sitios en los que el escurrimiento proviene del cielo de las obras fue más conveniente hacer uso de la lona (Figura 56) ya que permite captar la totalidad del escurrimiento en el mismo sitio. Así mismo, en los contrapozos, por tener un diámetro mayor, resultó acertado el uso de la lona por captar la totalidad de agua.



*Figura 56. Uso de la lona como medio para captar los escurrimientos del cielo de las obras y contrapozos.*

La lona también fue usada en las tuberías (Figura 57) que se localizan en las acequias por tratarse de puntos en los que se recolecta un mayor volumen.



*Figura 57. Medición del volumen de agua de tuberías*

La ventaja de las mediciones en las tuberías es que resultan ser más precisas, debido a que todos los escurrimientos por arriba de estos puntos pasan a través de la tubería.

En ambas rampas la metodología para medir los escurrimientos neutros y ácidos fue la misma y se realizaron en distintos meses del año, para ver en qué medida están variando los escurrimientos según los temporales.

#### **4.2 Medición de escurrimientos de agua neutra (AN)**

Después de haber identificado los puntos que presentan mayor escurrimiento de agua neutra, se realizó la medición del volumen que aporta cada punto. En un principio se estableció que era conveniente que cada uno de los puntos se aforara en un mismo tiempo, pero no en todas ellas fue posible por las condiciones presentes en cada sitio, así como en

---

---

algunos puntos se vio afectada por las actividades de la mina, como sucedió con el tránsito de camiones.

Cuando no se podía aforar un sitio porque resultaba ser inaccesible o simplemente el lugar no se prestaba para poder realizar la medición, se tomaron mediciones en tuberías cercanas y por diferencia se pudo obtener el gasto de los lugares que no pudieron ser aforados.

Las mediciones que se realizaron se hicieron tanto arriba del nivel 1040 m.s.n.m como por debajo de este.

#### 4.2.1 Arriba del nivel 1040 m.s.n.m

El primer punto localizado AN-1 fue medido obteniéndose un volumen de 7.2 L/min (1.9 gal/min). Este escurrimiento se desvía por debajo de la rampa 10000 y para corroborar que en efecto sigue el mismo flujo se volvió a medir, obteniéndose un volumen de 10.6 L/min (2.8 gal/min), lo que significa que sobre la rampa existen más escurrimientos que aportan la diferencia, esta última medición se designó como AN-1\*.

El segundo punto corresponde al AN-2 dando un gasto de 0.25 L/min (0.06 gal/min), un volumen que resulta ser pequeño pero también es canalizado por medio de la acequia.

En el escurrimiento 3 no se pudo realizar un aforo porque se trata de un volumen muy pequeño que fue imposible de medir.

El punto AN-4 es el agua proveniente de la rampa 10000, y es el punto que más agua neutra aporta a la acequia. Debido a que el agua no se encuentra canalizada por tubería, sino que escurre a través de la acequia, las mediciones que se hicieron en este punto variaron de 2 a 4 litros en todas las mediciones. Aproximadamente se obtuvo un gasto de 79 L/min (20.8 gal/min).

El aforo AN-5 proviene de un antiguo contrapozo el cual cruza la acequia mediante una manguera. De manera inmediata a este escurrimiento, se localiza una tubería (Tubería A) la cual recolecta desde el escurrimiento AN-5 a AN-1.

Al aforar esta tubería se obtuvo un gasto de 90.4 L/min (23.8 gal/min).

El punto AN-6 es un escurrimiento que cae del cielo. Se obtuvo un volumen de 0.8 L/min (0.2 gal/min).

El punto de AN-7 es un escurrimiento pequeño que no se pudo medir. Justo en este punto se encuentra una tubería (Tubería B) por la cual fluyen los escurrimientos de AN-7 a AN-1, es decir los escurrimientos que se localizan por arriba de dicha tubería. El aforo de esta tubería se hizo en 3 segundos dando un volumen de 4.9 litros (1.3 gal/min).

El punto de AN-8 en 10 segundos tuvo un gasto de 4.3 litros (1.1 gal/min).

El punto AN-9 en 1 minuto descargó 0.75 litros (0.2 gal/min).

Y el punto de AN-10 se tiene un pequeño volumen de 0.32 litros en 1 minuto (0.08 gal/min).

Para poder estimar la cantidad de agua que se descarga de AN-7, se hizo el siguiente análisis:

Si la tubería B recolecta de AN-1 a AN-7, se le pueden restar las mediciones de la tubería A y el escurrimiento de AN-6 por ser las mediciones que si se obtuvieron en campo, dando como resultado:

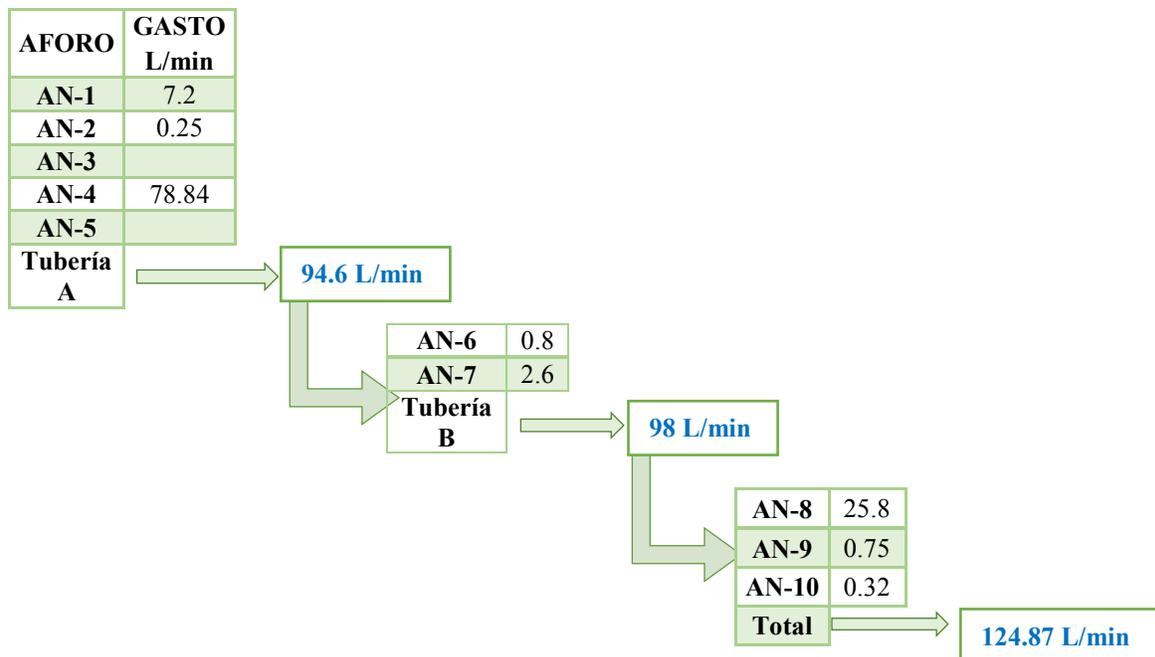
$$AN7 = \text{Tubería B} - (\text{Tubería A} + AN6)$$

$$AN7 = 98 - (94.6 + 0.8)$$

$$AN7 = 2.6 \text{ L/min (0.7 gal/min).}$$

Las mediciones realizadas se muestran en la Tabla 3, en la que se puede ver que de AN-1 a AN-5 descargan en la Tubería A, y por debajo de este punto AN-6 y AN-7 se suman para descargar en la tubería B y que de esta última tubería los escurrimientos AN-8, AN-9 y AN-10 de igual se suman para tener el total de agua neutra que escurre por la rampa cocodrilos.

*Tabla 3. Volúmenes de agua neutra registrados en el mes de julio*

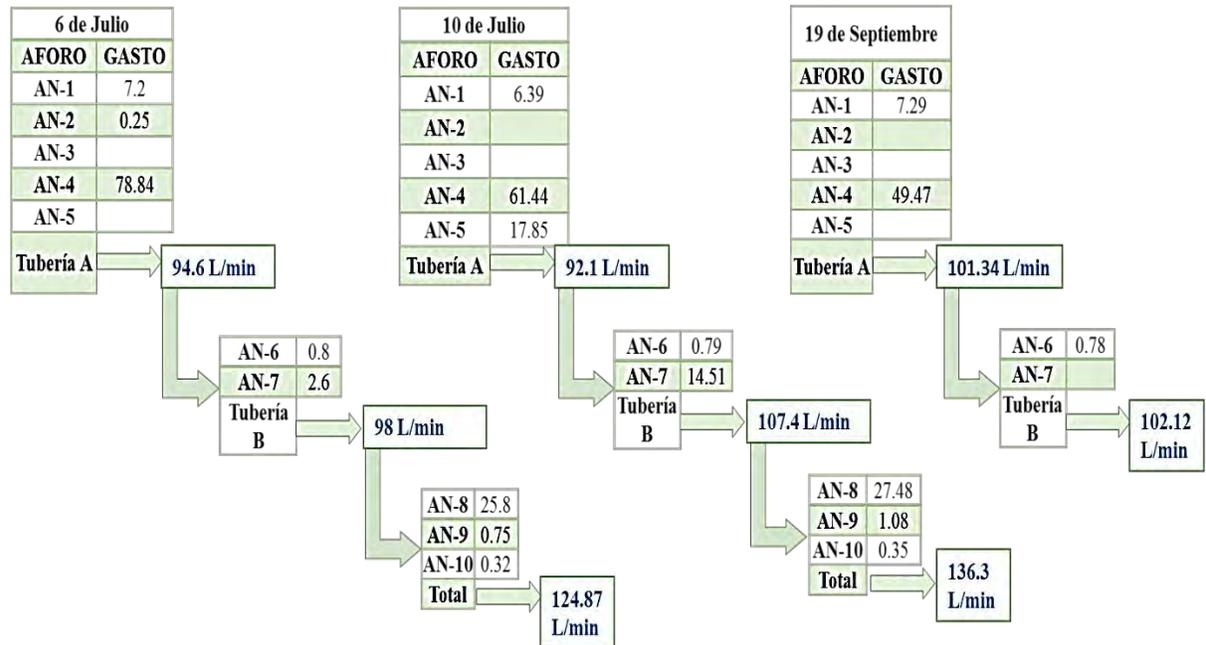


Nota: Las mediciones en negritas son menos exactas con respecto a las mediciones registradas en color azul que corresponden a tuberías.

Con el uso de las mediciones en las tuberías resultó ser más sencillo contabilizar el total de agua neutra que se descarga en la rampa Gemela. Al sumar los flujos de la tubería B más los que se encuentran por debajo de este punto que son AN-8, AN-9 y AN-10 (Tabla 3), resultando 124.87 L/min (32.9 gal/min) que descargan de la rampa cocodrilos.

En el mes de septiembre se volvieron a medir los escurrimientos y se registraron (Tabla 4) para comparar los cambios en los puntos medidos.

**Tabla 4.** Recopilación de las mediciones realizadas en los escurrimientos neutros.



Las mediciones en color azul, corresponde a sitios en donde hubo menor incertidumbre en el aforo.

Analizando la Tabla 4 se tiene en promedio 120 L/min (31.7 gal/min) de agua neutra, además, existe poca variación en el volumen, aunque se puede observar que las mediciones del punto AN-4, varían más de 20 litros en el mes de julio que en septiembre. La razón de esta diferencia, se debe a que es el sitio que mayor dificultad representa, ya que el agua no solo fluye por la acequia sino que viaja también por la rampa, haciendo que la medición no sea exacta.

También se puede ver en la Tabla 4 que no obstante que se intentó medir todos los aforos tomados en un inicio, algunos de ellos no se registraron en septiembre debido a las condiciones de la mina, además de que simplemente aforando las tuberías resulta ser más precisa la medición del volumen de agua neutra.

Como se mencionó en el capítulo 3, existe un escurrimiento sobre la rampa Sur llamado AN-11, que de igual manera se midió obteniéndose que en promedio el escurrimiento aporta 3.5 L/min que van a parar en el DAM de la rampa Sur (Tabla 5).

**Tabla 5.** Medición de escurrimiento AN-11 en L/min.

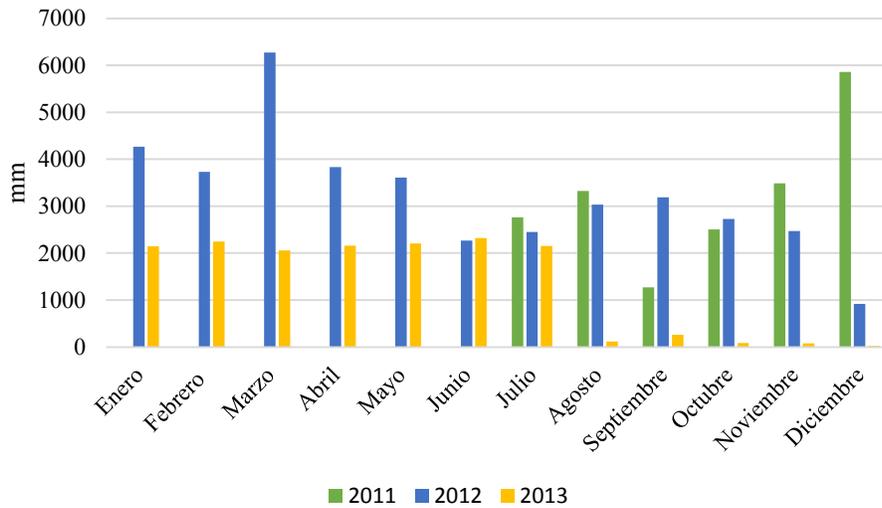
	Julio	Julio	Septiembre
<b>AN-11</b>	3.03	4.56	3.06

Sumando ambos flujos del agua proveniente de la rampa Cocodrilos, con el agua de la rampa Sur, se tienen 124.5 L/min (32.8 gal/min), un gran volumen comparado con el DAM a tratar.

#### 4.2.2 Contrapozos

Desde el momento en que se observaron los escurrimientos en los contrapozos, se aprecia que la cantidad de agua que escurre por los mismos es mucho mayor que los escurrimientos de la rampa Gemela. Es por eso que a los contrapozos se les ha visto como una posible fuente de abastecimiento de agua en la mina.

Analizando si es posible llevar a cabo esto, se tiene que en los últimos tres años la cantidad de agua de manantial usada mensualmente en la mina varía desde los 1200 m<sup>3</sup> hasta más de 6000 m<sup>3</sup> (Figura 58), sin embargo, en el año 2013 se registró el uso de 2000 m<sup>3</sup> en promedio.



**Figura 58.** Gasto de agua de manantial en la mina

Siendo el 2012 el año más cercano y del cual se tiene registrado el gasto mensual de todo el año, se registró un gasto de 38,781 m<sup>3</sup> de agua, es decir que mensualmente se gastaron 3,230 m<sup>3</sup> en promedio.

Considerando este último dato y realizando algunos cálculos se tiene que el gasto por minuto es de 74.8 L/min (19.7 gal/min).

$$3230 \text{ m}^3/\text{mes} * \frac{1000 \text{ L}}{1\text{m}^3} * \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 74.8 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

En el mes de septiembre, se realizó una visita específica a la mina para conocer el volumen de los contrapozos obteniéndose los resultados de la Tabla 6.

*Tabla 6. Registro del volumen obtenido en los contrapozos de ventilación y tepetateros.*

C/p	pH	vol ml	Tiempo min	Gasto L/min
CRO-EXP 740	8	20000	1	20
RT-8	7	28540	1	28.5
RV-17	7	8700	0.5	17.4
RV-18	6	7535	1	7.5
RV-20	7			
RV-22	7	6650	0.1	80.1
RV-28				
RV-31	7	6300	1	6.3
RV-40	7			25
RV-42	6	1580	1	1.6
RV-46	7	2820	1	2.8
RV-46	7	4900	1	4.9
RV-62	7			
			<b>TOTAL</b>	<b>194.1</b>

Algunas de las mediciones no se pudieron realizar debido a que el acceso es difícil, así como la operación de la mina no permitió que algunos de los contrapozos fueran posibles de medir, esto pasó en los contrapozos RV 20, RV 28 y RV 62.

Con los resultados obtenidos, se tiene que por minuto se hace uso de 74.8 litros, y que los contrapozos en el mismo tiempo, proporcionan un volumen de 194.1 litros (51 gal), es decir casi 3 veces más de lo que necesita la mina, sin contar lo que aportan los contrapozos que no pudieron ser medidos. Con esto se verifica la consideración planteada en el capítulo 2.2.2, al decir que el agua de los contrapozos es suficiente para las necesidades que se tienen en la mina, por lo cual no se requiere usar agua de manantial.

Es evidente que se tienen que evaluar más factores para tomar decisiones, como por ejemplo la influencia de la precipitación en los escurrimientos, pero no cabe duda de que esta es una buena opción para evitar el uso de agua de manantial y aprovechar el agua que escurre en el interior de la mina.

#### **4.3 Medición de escurrimientos de DAM**

No obstante que se presentan distintos puntos de generación de drenaje ácido en la mina, no en todos ellos es posible medir su volumen, debido a que se trata de mínimos escurrimientos, o bien se encuentran estancados.

Durante la primera visita realizada en el mes de abril los volúmenes obtenidos fueron los de la Tabla 7.

**Tabla 7.** Medición de volumen del DAM en el mes de abril

Aforo	Gasto (L/min)
DA-1	5.2
DA-2	1.2
DA-3	0.52
DA-4	
DA-5	
DA-6	29.4
DA-7	
DA-8	6.9
DA-9	60.5

De las mediciones obtenidas, se tiene que los puntos que más drenaje ácido generan son los puntos correspondientes a DA-1, DA-6, y DA-8, mientras que los escurrimientos DA-4, DA-5 y DA-7, no se pudieron medir debido a que el drenaje solo se encuentra encharcado.

Se hizo el intento de medir la cantidad de DAM que está llegando a la pileta de la rampa Sur, pero no se logró obtener un dato confiable, al realizar varias mediciones se obtuvieron datos muy dispersos, pero de igual manera se tomaron en cuenta.

Durante los meses de julio y septiembre se realizaron otras mediciones puntuales que se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Recopilación de los volúmenes de DAM obtenidos en los meses de mayo, julio y septiembre

AFORO	pH	3 de mayo	3 de julio	19 de septiembre
DA-1	3.04	5.2		
DA-2	2.96	1.7		
DA-3	2.48	0.52		
DA-4	2.89			
DA-5	2.83			
DA-6	2.43	29.4	22.22	27.72
DA-7	2.58			
DA-8	3	6.9	6.32	6
Tubería (DA8+Cocodrilos)	4.64	129.8	136.44	108.12
DA-9	6.01	60.5		
DA-10	2.59			
PILETA	2.96	166.6	193.68	206.34*

Las mediciones resaltadas en color azul, son los puntos en donde el aforo fue preciso. \* El volumen que aporta es igual a 54 gal/min.

De acuerdo a las mediciones obtenidas se tiene que la variación de volumen de DAM, se ha visto cambiante de acuerdo a la temporada del año, siendo mayo un mes con menos lluvia a diferencia de julio y septiembre, aparte de presentarse diferencia de volumen en estos dos últimos meses, también se observaron distintas modificaciones en los primeros sitios

---

---

correspondientes a DA-1, DA-2, DA-3, ya que algunos de los muros que contenían el drenaje fueron quitados (Figura 59), por lo que no se pudieron aforar.



*Figura 59. Mantenimiento a los rebajes con presencia de DAM*

Afortunadamente por arriba de la pileta se habilitó una tubería por la que pasa todo el flujo de agua, es decir que si bien no se aforó la pileta de manera precisa en las primeras visitas, esta tubería fue una adecuación perfecta para tener el volumen total de agua que llega a la planta de tratamiento de manera más precisa.

Teniendo ya los volúmenes de los escurrimientos neutros y ácidos, se puede determinar la cantidad real a tratar en la planta, como se desarrolla a continuación.

#### **4.4 Volumen de agua neutra y agua ácida total**

De acuerdo a los escurrimientos que se midieron tanto en la rampa Sur como en la rampa Gemela, es importante relacionar el comportamiento de estos flujos, porque existe la problemática de que la cantidad de drenaje ácido aumenta debido a que ambos flujos son mezclados y que como consecuencia se tiene que el tratamiento no es eficiente para tratar todo el volumen que llega a la planta de tratamiento.

Como ya se mencionó anteriormente, el punto más crítico del sistema de drenaje se localiza en el crucero de la rampa Cocodrilos, sitio en el que se lleva la mezcla de drenaje ácido con los escurrimientos neutros (Figura 15).

Tomando en cuenta los datos obtenidos en el aforo de la pileta, el punto DA-8 (C/p Lona) y la tubería (Cocodrilos + C/p Lona) localizada sobre la rampa Sur a un costado de DA-8, se puede determinar la cantidad de DAM y AN total, con las siguientes consideraciones:

Si al volumen de la tubería (Tabla 8) se le resta el aforo de DA-8, se obtiene la cantidad total de AN, que no debería de mezclarse (Tabla 9).

*Tabla 9. Cálculo del volumen total de agua neutra en L/min.*

<b>AFORO</b>	<b>Tubería (DA-8 +Cocodrilos)</b>	<b>DA-8 (C/p Lona)</b>	<b>AN Total</b>
6 de julio	129.8	6.9	122.9
10 de julio	136.44	6.32	130.12
19 de septiembre	108.12	6	102.12

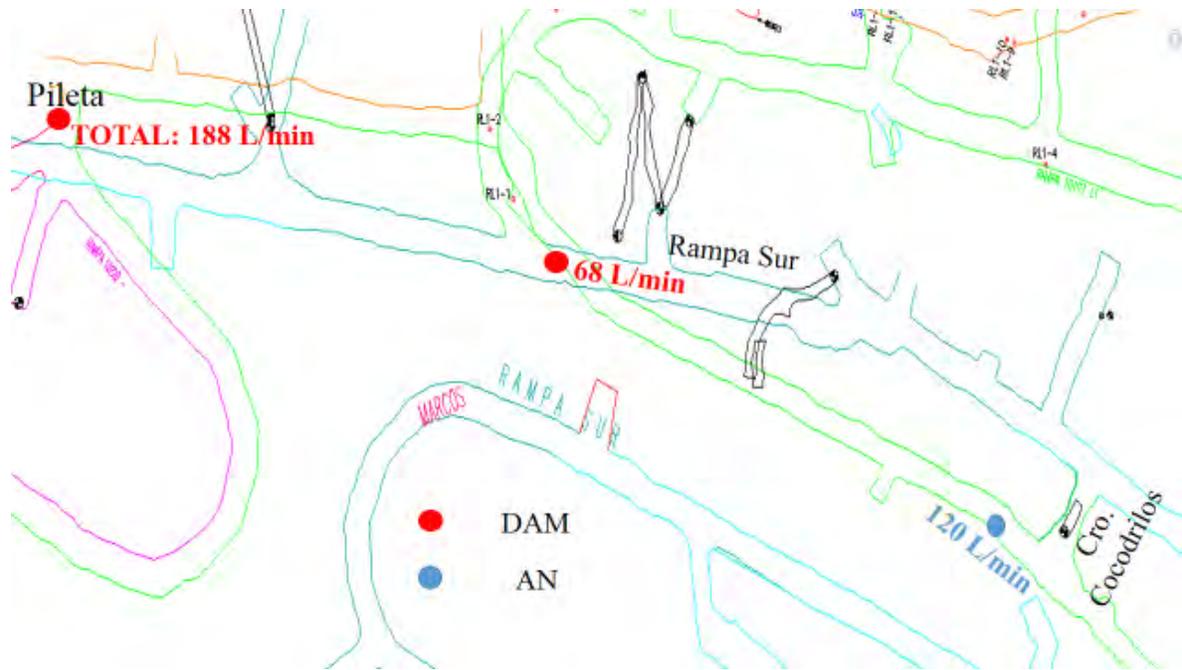
Ahora, si se toma en cuenta que al aforo de la pileta de la rampa Sur se le resta el flujo de AN total calculado anteriormente (Tabla 9), se puede obtener la cantidad de DAM que debe tratarse (Tabla 10).

*Tabla 10. Cálculo del DAM total a tratar en L/min.*

<b>AFORO</b>	<b>Pileta</b>	<b>AN total</b>	<b>DAM</b>
6 de julio	166.6	122.9	43.7
10 de julio	193.68	136.44	57.37
19 de septiembre	212.34	108.12	104.22

En la Figura 60 se muestra que al analizar los resultados de la Tabla 9 y 10, se tiene que de los 188 L/min (49.5 gal/min) que se tratan en la actualidad de acuerdo a las mediciones realizadas en las visitas, 120 L/min (31.6 gal/min) son de agua neutra y sólo 68 L/min (17.9 gal/min) son de DAM, lo que significa que la planta de tratamiento solo debería tratar aproximadamente la mitad de lo que se trata.

Además de esto, sigue siendo visible que en los meses que presentan mayor precipitación, la cantidad de DAM y AN aumenta, por lo que es necesario emprender un plan para separar los escurrimientos.



*Figura 60. Volúmenes de DAM y AN.*

---

---

## CAPÍTULO 5

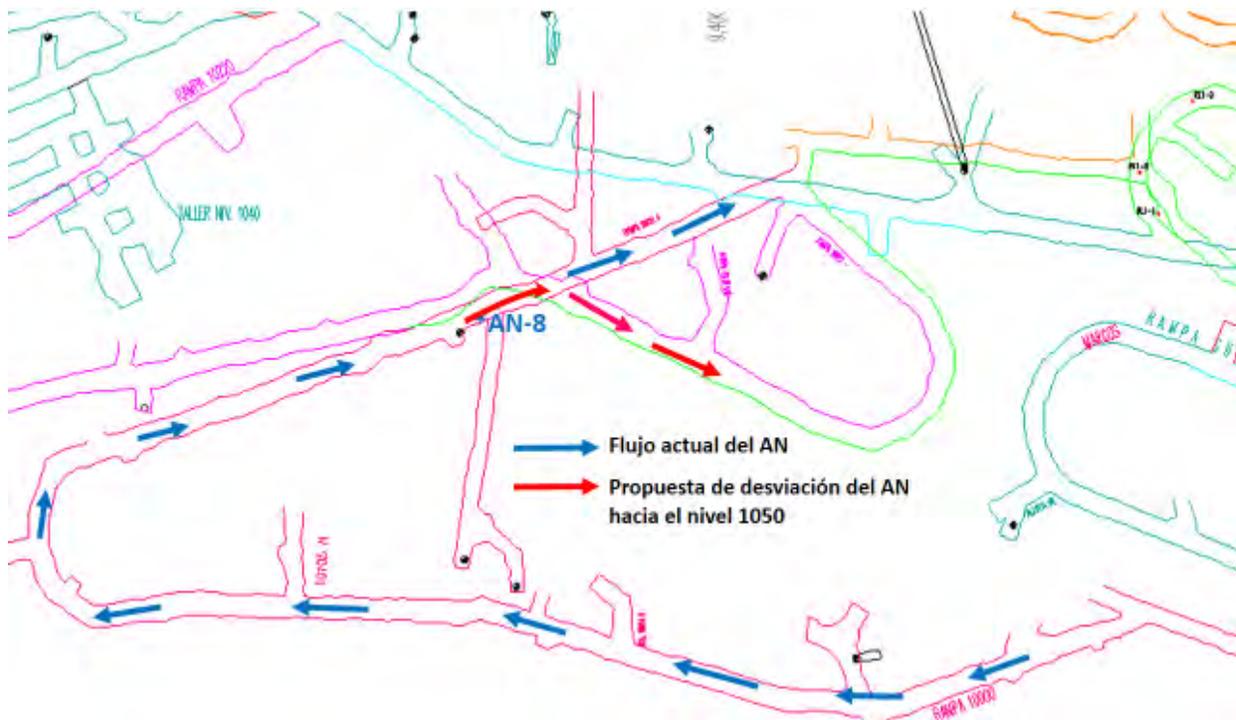
### PROPUESTA DE MANEJO DE LOS ESCURRIMIENTOS DE AGUA

Después de conocer que la cantidad de agua a tratar aumenta a más de la mitad por la adición de los escurrimientos neutros al DAM, es importante realizar una canalización más eficiente de ambos escurrimientos porque además de elevar los costos del tratamiento, se mezcla el agua neutra que podría ser empleada para la propia operación de la mina, en vez de desperdiciarse de esta manera. Es por ello que en este capítulo se propone implantar algunas medidas de separación del agua neutra (rampa cocodrilos), además de proponer algunas adecuaciones en los puntos en donde hay presencia de escurrimientos para hacer una mejor medición y tener mayor control de los mismos.

#### 5.1 Separación de AN en la rampa Gemela

Debido a la manera en que se manejan los escurrimientos ácidos y neutros, se propone llevar a cabo su separación a través de un diseño que sea sencillo, que no estropee la operación, pero sobre todo que favorezca el manejo de estos flujos.

Una de las propuestas que se tiene, es que por debajo de AN-8 en la rampa Gemela que es el punto localizado justo antes de desviarse el agua hacia la rampa Cocodrilos, se instale una tubería por debajo de la rampa tal que el flujo continúe su curso hacia el nivel 1050 (Figura 61), en donde se instale una pileta que pueda ser usada para abastecer los primeros niveles de la mina, o también se puede hacer una canaleta que desvíe el agua hacia esta pileta, en vez de la tubería, ambos diseños se verán favorecidos por la pendiente de la rampa sin necesidad de bombeo.

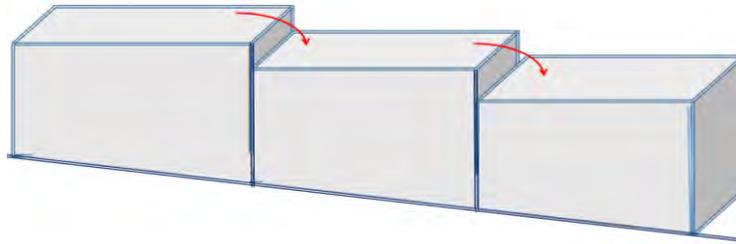


*Figura 61. Re direccionamiento de los escurrimientos neutros hacia el nivel 1050 m.s.n.m*

---

---

Esta pileta se puede diseñar desde una forma rectangular sencilla, hasta un diseño ya más elaborado como puede ser un conjunto de piletas a desnivel para favorecer la sedimentación de los sólidos en suspensión (Figura 62).



*Figura 62. Uso de un sistema de piletas con desnivel para el almacenamiento del agua neutra*

Dichas piletas tendrán que tener la capacidad suficiente para almacenar temporalmente el AN independientemente de la precipitación pluvial presente en la zona.

Sin duda alguna esta desviación resulta ser la más conveniente y con mayores beneficios para la mina.

## **5.2 Adecuación de los puntos de generación de AN y DAM para su medición**

En sitios en donde el escurrimiento se encuentra confinado mediante un muro o bordo, las mediciones tuvieron que realizarse más de una vez porque la descarga de agua se presenta en varios puntos del muro. Es por eso que para tener mejores condiciones para la medición se propone la instalación de tubos de PVC (Figura 63), ya que esto ayudará sin duda alguna a tener mayor precisión en los aforos al estar el escurrimiento descargando por un solo punto.



*Figura 63. Acondicionamiento de los muros para realizar una medición más eficiente*

En algunos puntos sobre la rampa se puede ver que el agua pasa por medio de una tubería, es conveniente instalar en puntos clave este tipo de tuberías que durante los aforos permitieron realizarlos de manera más cómoda, a diferencia de los que se tomaban sobre la acequia.

Otro punto importante a mejorar es la pileta de la rampa Sur, ya que el agua que no es almacenada se derrama y no es tratada como el resto del DAM. Esto se debe a que la pileta almacena sedimento, restando espacio para la recepción del drenaje ácido, por lo que es importante también limpiar las piletas que almacenan los escurrimientos de agua.

Una alternativa para la medición de los escurrimientos es la instalación de un flujómetro por arriba de la pileta de la rampa Sur, por ser más precisa y confiable y sencilla sin hacer uso de un método de aforo volumétrico.

Si bien no se instala un sistema más sofisticado para realizar la medición de los escurrimientos, sí se pueden obtener resultados confiables como se realizó en este trabajo.

### 5.3 Programa de medición

Después de conocer la cantidad de drenaje ácido y agua neutra que escurre por las obras se propone un plan de medición a lo largo del año para generar una base de datos y corroborar el comportamiento de los escurrimientos en los meses de menor y mayor precipitación.

De acuerdo a los datos presentados en el capítulo 1, se tiene que la precipitación tiende a ser mayor a mitad del año y disminuir al inicio y final (Figura 3), es por eso que tomando como referencia la precipitación del 2013, se proponen seis periodos de medición en los meses de febrero, abril, junio, agosto, septiembre y noviembre con un mínimo de tres mediciones en una semana para finalmente generar una base de datos con los resultados (Figura 64).

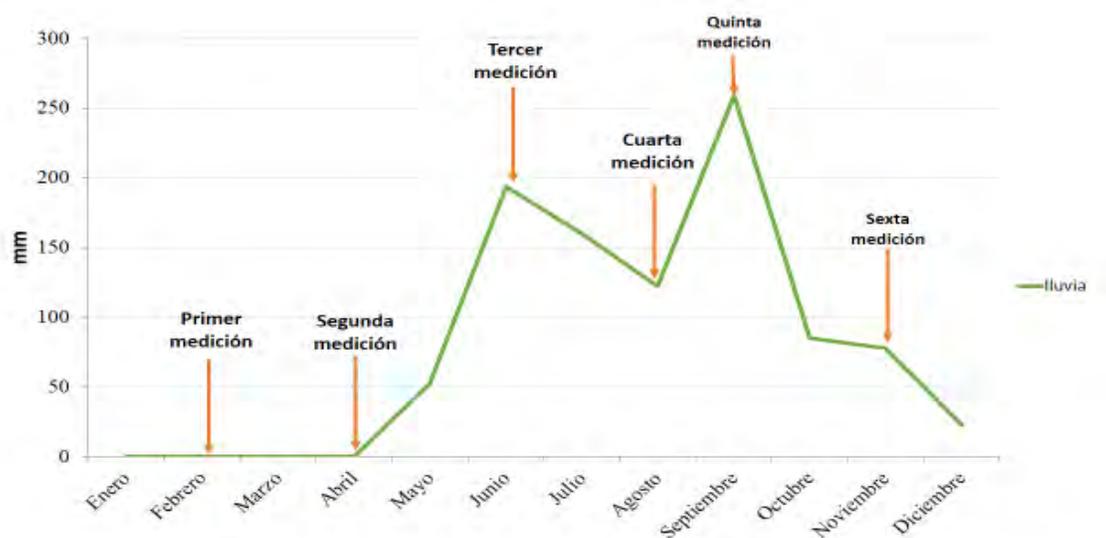


Figura 64. Medición de escurrimientos de agua de acuerdo a la precipitación

---

---

La medición de igual manera como se realizó en este trabajo puede realizarse con instrumentos sencillos con variaciones de tiempo pero rectificando las mediciones con distintas repeticiones.

A través de la información generada se puede lograr tener un mayor control sobre algunos puntos como lo son el DA-6, DA-8 y la pileta, por ser los escurrimientos que son constantes.

#### **5.4 Aprovechamiento del agua neutra**

Con la separación de los escurrimientos neutros de los ácidos, los escurrimientos de la rampa Cocodrilos pueden ser usados para abastecer los niveles localizados por arriba del nivel 1050 m.s.n.m, o bien si se continua con el mismo sistema de tratamiento, puede ser usado para realizar la mezcla de agua más carbonato.

Por otra parte los contrapozos por tener un gran aporte de agua neutra, puede ser usada para los niveles que se localizan debajo del nivel 1040 m.s.n.m, por tratarse de un agua que es limpia y que no representa ningún riesgo químico y que como se estudió es suficiente para cubrir las necesidades de la mina.

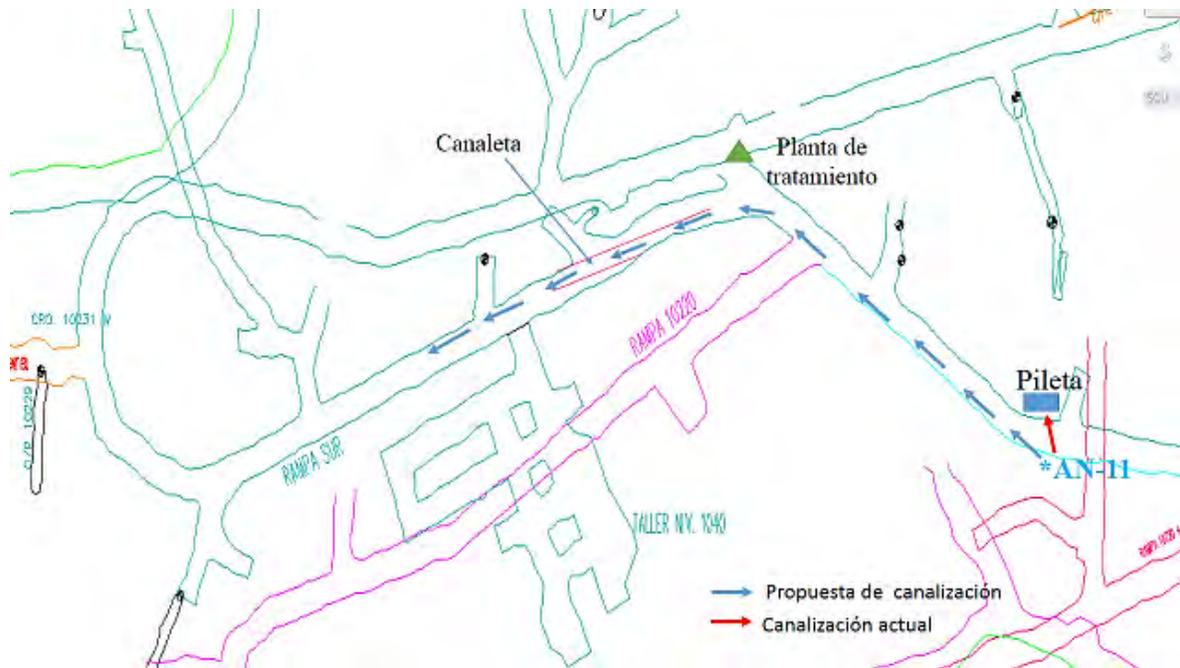
El fin de este aprovechamiento es el de disminuir el impacto que se genera al hacer uso del agua de manantial en la operación de la mina, y hacer uso del agua de la mina sin necesidad de recurrir a fuentes de agua externas.

#### **5.5 Canalización del DAM y el AN.**

La manera en que se canalizan ambos escurrimientos se puede ver favorecida al entubarse los escurrimientos, ya que las acequias presentan mucho material rocoso haciendo que el agua no fluya sobre la acequia sino que salga de la misma; además de proponer una canalización, es recomendable que el mantenimiento a las acequias sea con mayor frecuencia.

Uno de los problemas que influyó de manera significativa en las mediciones, se presentó en el punto AN-4, debido a que el agua no solo fluye sobre la acequia sino que lo hace por la rampa, esto sugiere que la zona de recolección del agua, es decir la acequia aumente sus dimensiones, o bien que el escurrimiento se confine para que ya no se presente esta situación.

Además de canalizar los escurrimientos neutros sobre la rampa Gemela, también debe considerarse el punto AN-11. Esta canalización puede consistir en re direccionar el escurrimiento (Figura 65), mediante una canaleta que incorpore el flujo a la acequia de la rampa Sur por debajo de la planta de tratamiento, que es el punto en donde el agua tratada sigue su curso hasta la planta de bombeo.



*Figura 65. Propuesta de canalización de AN-11.*

## 5.6 Estimación de costos

Las adecuaciones necesarias para canalizar y separar el flujo de agua neutra proveniente de la rampa Gemela del DAM, requieren de las obras que se recomendaron en el capítulo anterior.

Las obras propuestas son las siguientes:

- Instalación de tubería sobre la rampa Gemela (en AN-8) para cruzar el flujo de agua neutra y enviarlo a pileta de sedimentación.
- Construcción de pileta de sedimentación sobre rampa Gemela a la altura del acceso a rampa cocodrilos
- Construcción de muros de contención en los cruceros de donde escurre el drenaje ácido hacia la rampa Sur y en algunos puntos de la rampa Gemela.
- Instalación de un flujómetro antes de la pileta de la planta de tratamiento
- Limpieza de la pileta de sedimentación

Es por eso que se hizo una estimación de los costos de construcción, tomando como referencia el catálogo de obras de la Dirección General de Obras de la UNAM (DGOC, 2014), cuyas especificaciones se muestran al final del documento en el Anexo. Dichos costos podrán ser ajustados de acuerdo a las condiciones específicas de la mina.

---

---

### ***Instalación de tuberías sobre la rampa Gemela***

Los costos abrir una ranura en el concreto para la instalación de la tubería que cruce la rampa se obtuvo calculando el volumen por demoler y multiplicando por el costo unitario.

La tubería de polipropileno a instalar tendrá un diámetro de 6" y se colocará con una inclinación de 45° aproximadamente con respecto a la horizontal en la rampa. La ranura tendrá 7.6 m de longitud, 0.6 m de ancho y una profundidad de 0.3 m; por lo que el volumen de concreto a remover es de 1.4 m<sup>3</sup>. El costo de demolición de losa de concreto por m<sup>3</sup> es de \$ 301.35.

$$\text{Costo de ranurado} = \$ 421.90$$

En el manual de obras no se especifica el costo por la instalación de la tubería de polipropileno de 6", pero se manejan costos por tuberías de menor diámetro y con base a estos costos se realizó una estimación quedando que el costo unitario por la tubería de 6" es de \$254.00/m y se requiere la instalación de 7.6 m de tubería.

$$\text{Costo de instalación de tubería} = \$ 1,930.00$$

La tubería a colocar ocupa un volumen de 0.13 m<sup>3</sup>, por lo que el concreto a colocar sobre la ranura es de 1.27 m<sup>3</sup>. El costo unitario del concreto es de \$2,021.01/ m<sup>3</sup>.

$$\text{Costo de concreto} = \$2,566.70$$

$$\text{El costo total de obra} = \$4,918.60$$

### ***Construcción de piletas***

El flujo proveniente de la rampa Gemela es de 7,100 L/h, si se agrega un factor de seguridad del 25%, las 3 piletas propuestas, deberán tener una capacidad de almacenamiento de 8.8 L/h, por lo que las piletas se harán con dimensiones de 1.5 m de ancho x 2 m de largo x 1 m de profundidad, es decir que cada pileta tendrá un volumen de 3 m<sup>3</sup>, volumen suficiente para la recepción del agua neutra.

La construcción de las piletas necesita de una losa de concreto en el piso (3m<sup>2</sup>/pileta), muros de bloque reforzados (7 m<sup>2</sup>/pileta) y cuatro castillo de concreto armado en los extremos y dos en los muros laterales (total 6 m de castillo/pileta).

El costo unitario de la losa de concreto es de \$201.19/m<sup>2</sup>, por lo que las 3 piletas requieren de 9 m<sup>2</sup> de losa.

$$\text{Costo de losa} = \$1,810.71$$

Se requiere a construcción de 21 m<sup>2</sup> de muro para las 3 piletas. El costo unitario del muro es de \$200.79/m<sup>2</sup>.

$$\text{Costo de muro} = \$ 4,216.6$$

---

---

Para 18 m de castillos de concreto armado para las 3 piletas, se tiene un costo unitario de \$200.29/m.

Costo de castillo de concreto = \$ 3,605.22

Costo total de obra = \$9,632.50

### ***Instalación de medidor de flujo de DA***

El costo del flujómetro es de 3,952 USD + IVA y se considera un 30% del precio por los servicios de instalación.

Costo de flujómetro = \$59,600.00

Costo de instalación = \$17, 900

Costo total = \$77,500.00

El Cambio de USD a moneda nacional se tomó como \$13.00.

### ***Construcción de muros de contención***

Los muros de contención se colocarán en 5 sitios de la mina, los cuales tendrán secciones de 5 metros de largo por 1 metro de altura y se les colocará una trabe para reforzar la estructura.

El costo unitario del muro de contención es de \$225.78/m<sup>2</sup>. Para los 5 muros se necesitan 25 m<sup>2</sup>.

Costo de muro = \$5,644.50

La trabe tiene un costo de \$321.09/m y se necesita de 25 m para las 5 piletas.

Costo de trabe = \$8,027.25

Costo de obra = \$13,671.80

### ***Limpieza de piletas***

La limpieza de piletas no se especifica en el manual de obras de la UNAM, pero se estimó como una jornada de limpieza de 8 horas realizada por dos personas. El costo unitario es de \$436.00.

Costo por limpieza = \$872.00.

---

---

## Resumen de costos

Después de calculados los costos de las obras y servicios, se tiene el siguiente resumen:

*Tabla 11. Resumen de costos de las obras.*

<b>Obra o servicio</b>	<b>Total</b>
<i>Instalación de tuberías sobre la rampa Gemela</i>	\$4,918.60
<i>Construcción de piletas</i>	\$9,632.50
<i>Instalación de medidor de flujo de DA</i>	\$77,500.00
<i>Construcción de muros de contención</i>	\$13,671.80
<i>Limpieza de piletas</i>	\$872.00.
<i>Total</i>	<b>\$106,595.00</b>

---

---

## CONCLUSIONES

Mediante los recorridos en el interior de la mina se conocieron los puntos de generación de DAM sobre la rampa Sur y los escurrimientos neutros sobre la rampa Gemela entre los niveles 1226 y 1040 y por abajo del nivel 1040 en los contrapozos.

Los escurrimientos ácidos actualmente se presentan solo en los niveles más cercanos a la superficie (arriba del 1040) y provienen de antiguos rebajes. El agua que escurre por estos rebajes posiblemente proviene de un acuífero localizado por arriba de las obras según información proporcionada por la empresa y otra reportada por CONAGUA, aunque también parte de esta agua puede provenir de agua pluvial que se infiltra desde la superficie.

El uso del método de aforo volumétrico permitió medir la cantidad de agua neutra y de drenaje ácido que aporta cada uno de los puntos identificados. El total de agua ácida que recibe tratamiento varía desde 166.6 hasta 206.34 L/min, sin embargo, el volumen de DAM que se genera en las obras de la rampa Sur es sólo de 43.7 a 104.22 L/min. El volumen restante corresponde al agua neutra de la rampa Cocodrilos que se une con el DAM y que varía de 102.12 a 122.9 L/min.

El conocer el flujo de DAM es muy importante ya que con este dato se deberá hacer el diseño del sistema de tratamiento pasivo. Aunque el sistema de tratamiento actual permite neutralizar el agua ácida, su operación no es del todo eficiente por tratar volúmenes de agua que no requieren tratamiento (rampa Cocodrilos), además de que se usa agua de manantial y se aumenta el uso de reactivos. Por lo tanto, es conveniente modificar el flujo de agua de la rampa Cocodrilos hacia zonas de operación donde pueda ser aprovechada.

Por otra parte, los escurrimientos neutros que provienen de los contrapozos de ventilación y de servicios pueden ser una fuente de agua para abastecer las necesidades de la mina, ya que se midió un flujo de 194.1 L/min, y el gasto requerido para las operaciones es de 74.8 L/min. Sin embargo, esta cuantificación se hizo en una sola fecha por lo que es conveniente aforar el agua de estos contrapozos en las diferentes épocas del año.

Los análisis realizados a las muestras de agua neutra permitieron ver diferencias entre fuentes de agua natural como lo son el arroyo, el manantial y el C/p 800 al ser estas clasificadas como agua bicarbonatadas cálcicas-magnésicas, aunque esta última con una mayor cantidad de sodio; mientras que los escurrimientos neutros de la rampa Cocodrilos y el agua de la mina son aguas sulfatadas cálcicas-magnésicas, esto debido a la oxidación de los sulfuros. En cuanto a los elementos traza se observa la presencia de pequeñas concentraciones de manganeso, cadmio y zinc solubles.

---

---

## BIBLIOGRAFÍA

Cervantes Macedo A. H. (2014). Caracterización del drenaje ácido y de las rocas asociadas a una mina para evaluar su posible aplicación en un sistema de tratamiento pasivo. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería UNAM.

CONAGUA, (2008). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 1509 Temascaltepec, Estado de México. Comisión Nacional del Agua.

COREMI, (1996). Monografía Geológico–Minera del Estado de México. Consejo de Recursos Minerales, México.

Gatica Jiménez, G. (2012). "Evolución de Mecánica de Rocas en el soporte de minas subterráneas" Jornada de Mecánica de Rocas. Ciudad Universitaria: Facultad de Ingeniería.

Gatica G. y Santos J. (2002). Identificación y prevención del drenaje ácido de mina en el proceso de extracción, en minas con sulfuros. Memorias del XXV Convención Internacional de Minería. Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A.C. Acapulco, Guerrero.

Johnson D.B., Hallberg K.B. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. *SciTotal Environ* 338, 3–14.

López Pamo, Aduvire O., y Baretino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 21.

Lottermoser G. B., (2007). *Mine wastes: characterization, treatment and environmental impacts*; Second Edition; Editorial Springer, New York.

Neri, M.A. (1998). Descripción del modelo geológico del yacimiento de Sulfuros Masivos de Tizapa, Zacazonapan, Estado de México.

SA Peñoles (2011). *Minera Tizapa S. A. DE C. V.* . Documento interno. Servicios Administrativos Peñoles S.A DE C.V. División Minas.

DGOC (2014). Tabulador de costos de obra vigente al 2014. Secretaría Administrativa. Dirección General de Obras y Conservación, UNAM.

### Mesografía

Dowa Holdings, Co., Ltd. (2011). *Dowa Metals and Mining Co., LTD*. Obtenido de <http://www.dowa.co.jp/MandM/en/tizapa/index.html>. Fecha de Consulta: octubre 2013

PTAS 2013-2015 del Sistema DIF municipal de Zacazonapan e INEGI. (s.f.). *Zacazonapan, Gobierno Federal 2013-2015*. Obtenido de <http://zacazonapan.gob.mx/Portal/index.php/historia>. Fecha de Consulta: octubre 2013.

---

---

## ANEXO

### COSTOS UNITARIOS Y ESPECIFICACIONES DE OBRAS PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS DE LAS OBRAS Y SERVICIOS SUGERIDOS

A continuación se muestra la descripción y especificaciones de los rubros que se consideraron para el cálculo del volumen de obra. Fueron tomados del Tabulador de Conservación y Mantenimiento (vigente a enero de 2014) de la Dirección General de Obras y Conservación de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario
DEMOLICIÓN POR MEDIOS MANUALES DE GUARNICIONES Y BANQUETAS DE CONCRETO REFORZADO.	M <sup>3</sup>	1	\$301.35
TUBO DE POLIPROPILENO BICAPA TIPO HIDRÁULICO, DE 25 MM DE DIÁMETRO. INCLUYE: MATERIALES, MANO DE OBRA, HERRAMIENTA, ACARREOS, PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO, LIMPIEZA DEL AREA DE TRABAJO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCION. P.U.O.T.	M	1	\$44.13
TUBO DE POLIPROPILENO BICAPA TIPO HIDRÁULICO, DE 19 MM DE DIÁMETRO. INCLUYE: MATERIALES, MANO DE OBRA, HERRAMIENTA, ACARREOS, PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO, LIMPIEZA DEL AREA DE TRABAJO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCION. P.U.O.T.	M	1	\$34.23
TUBO DE POLIPROPILENO BICAPA TIPO HIDRÁULICO, DE 13 MM DE DIÁMETRO. INCLUYE: MATERIALES, MANO DE OBRA, HERRAMIENTA, ACARREOS, PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO, LIMPIEZA DEL AREA DE TRABAJO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCION. P.U.O.T.	M	1	\$24.13
PISO DE CONCRETO HIDRÁULICO ELABORADO EN OBRA RESISTENCIA NORMAL F'C= 150 KG/CM <sup>2</sup> , T.M.A 3/4", REV.10 T.M.A. 3/4" DE 8 CM DE ESPESOR REFORZADO CON MALLA ELECTRO SOLDADA 66 - 1010, INCLUYE: MATERIALES, MANO DE OBRA, HERRAMIENTA, ACARREOS, LIMPIEZA DEL AREA DE TRABAJO.	M <sup>2</sup>	1	\$201.19
MURO DE BLOCK DE CONCRETO TIPO INTERMEDIO DE 10 CM DE ESPESOR. MEDIDAS 10 X 20 X 40, CON REFUERZO HORIZONTAL A CADA DOS HILADAS. INCLUYE: MATERIALES, MANO DE OBRA, HERRAMIENTA, ACARREOS TODO LONECESARIO PARA LA CORRECTA EJECUCION DE LOS TRABAJOS. P.U.O.T.	M <sup>2</sup>	1	\$200.79
SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE CASTILLO DE CONCRETO TIPO C1 F'C = 150 ML KG/CM <sup>2</sup> AGREGADO MÁXIMO DE 3/4" CON SECCIÓN DE 12 X 20 CM (CHECARTABLA DE	M	1	\$200.29

<p>CASTILLOS TIPO INCLUIDA EN PLANOS DE ALBAÑILERÍA) ACABADO COMÚN, ARMADO CON 4 VARILLAS DE N° 3 Y ESTRIBOS DE ALAMBRÓN ¼" @ 20CM DE SEPARACIÓN. INCLUYE: BARRENO PARA ANCLAJE, HABILITADO Y ARMADO DEL ACERO DE REFUERZO, ALAMBRE RECOCIDO DEL NO. 18, CIMBRADO, FABRICACIÓN Y COLADO DEL CONCRETO, DESCIMBRADO, ACARREOS Y ELEVACIONES DENTRO DE LA OBRA HASTA EL LUGAR DE SUCOLADO, MATERIALES, DESPERDICIOS, MANO DE OBRA, ANDAMIOS, HERRAMIENTA, EQUIPO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCIÓN, CONFORME A PROYECTO Y A LA ESPECIFICACIÓN GENERAL DE CONSTRUCCIÓN: 2.1.1. PRECIO POR UNIDAD DE OBRA TERMINADA</p>			
<p>CIMBRA ACABADO COMÚN Y DESCIMBRA EN MUROS, HASTA UNA ALTURA MÁXIMA DE 4.00 M., INCLUYE: MATERIALES, MANO DE OBRA, HERRAMIENTA, ACARREOS TODO LO NECESARIO PARA LA CORRECTA EJECUCION DE LOS TRABAJOS. P.U.O.T.</p>	M <sup>2</sup>	1	\$225.78
<p>SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE CASTILLO DE CONCRETO TIPO C3 F'C = 150 KG/CM<sup>2</sup> AGREGADO MÁXIMO DE 3/4" CON SECCIÓN DE 12 X 30 CM (CHECARTABLA DE CASTILLOS TIPO INCLUIDA EN PLANOS DE ALBAÑILERÍA) ACABADO COMÚN, ARMADO CON 6 VARILLAS DE N° 4 Y ESTRIBOS DE ALAMBRÓN ¼" @ 20 CM DE SEPARACIÓN +1 GRAPA. INCLUYE: BARRENO PARA ANCLAJE, HABILITADO Y ARMADO DEL ACERO DE REFUERZO, ALAMBRE RECOCIDO DEL NO. 18, CIMBRADO, FABRICACIÓN Y COLADO DEL CONCRETO, DESCIMBRADO, ACARREOS Y ELEVACIONES DENTRO DE LA OBRA HASTA EL LUGAR DE SU COLADO, MATERIALES, DESPERDICIOS, MANO DE OBRA, ANDAMIOS, HERRAMIENTA, EQUIPO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCIÓN, CONFORME A PROYECTO Y A LA ESPECIFICACIÓN GENERAL DE CONSTRUCCIÓN: 2.1.1. PRECIO POR UNIDAD DE OBRA TERMINADA.</p>	M	1	\$321.09
<p>AYUDANTE GENERAL EN TRABAJOS DE LIMPIEZAS DISTINTAS A LAS INCLUIDAS EN TODOS LOS CONCEPTOS EJECUTADOS Y PAGADOS CON ESTE TABULADOR.</p>	JOR	2	\$436.16

---

---

## **FLUJÓMETRO**

MEDIDOR FIJO ULTRASÓNICO DE FLUJO, TIPO DOPPLER (PARA LIQUIDOS CON SOLIDOS), MODELO DFM 5.0, MARCA GREYLINE INSTRUMENTS, PARA TUBERÍA LLENA, RANGO DE DIÁMETROS: DE 1/2" HASTA 180", APLICABLE PARA CUALQUIER TIPO DE TUBERÍA, TANTO PLÁSTICA COMO METÁLICA. RANGO DE FLUJO: - 12.2 A +12.2 m/s), EXACTITUD: +/- 2%, CON TOTALIZADOR DE VOLUMEN DE 12 DÍGITOS, 2 RELEVADORES, 5 Amp SPDT, TRANSMISOR: CUBIERTA NEMA 4X (IP66), PANTALLA CON ILUMINACIÓN TRASERA, SALIDAS DE SEÑAL: 4-20 mA, PUERTO DE COMUNICACIÓN USB. FUENTE DE PODER: 100-240 VAC, 50/60 Hz. TRANSDUCTORES CON LONGITUD DE CABLE DE 230ft (70 m). SENSOR ULTRASÓNICO MODELO: SE4.

PRECIO UNITARIO: \$3,952.00 USD MÁS IVA